

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**COMPARAÇÃO DE MÉTODOS VIA SOLO E VIA
DEMANDA EVAPORATIVA PARA MANEJO DE
IRRIGAÇÃO**

TESE DE DOUTORADO

Mario Santos Nunes

**Santa Maria, RS, Brasil
2014**

COMPARAÇÃO DE MÉTODOS VIA SOLO E VIA DEMANDA EVAPORATIVA PARA MANEJO DE IRRIGAÇÃO

por

Mario Santos Nunes

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Área de Concentração Engenharia de Água e Solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito para obtenção do grau de
Doutor em Engenharia Agrícola

Orientador: Prof. Dr. Adroaldo Dias Robaina

**Santa Maria, RS, Brasil
2014
Universidade Federal de Santa Maria**

**Centro de Ciências Rurais
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola**

A Comissão Examinadora , abaixo assinada,
aprova a Tese de Doutorado

**COMPARAÇÃO DE MÉTODOS VIA SOLO E VIA DEMANDA
EVAPORATIVA PARA MANEJO DE IRRIGAÇÃO**

elaborada por
Mario Santos Nunes

como requisito parcial para a obtenção de grau de
Doutor em Engenharia Agrícola

COMISSÃO EXAMINADORA:

**Adroaldo Dias Robaina, Dr. (UFSM)
(Presidente / Orientador)**

**Ana Carla dos Santos Gomes, Dr^a,
(IF FARROUPILHA)**

**João Fernando Zamberlan, PhD.
(UNICRUZ)**

**Fátima Cibele Soares Dr^a,
(UNIPAMPA)**

**Ricardo Luiz Schons, Dr.
(IF FARROUPILHA)**

Santa Maria, RS, Brasil
2014.

Dedicatória

Dedico este trabalho aos meus queridos pais Mario Brombila. Nunes e Fátima dos Santos. Nunes, que me ensinaram através de suas vivências os melhores exemplos para vencer as incertezas da vida e confiar no futuro.
Por guiarem os meus caminhos, há vocês agradeço.

AGRADECIMENTOS

A Deus razão de toda a vida.

Aos meus pais, Mario Brombila. Nunes e Fátima dos Santos. Nunes, por sempre acreditarem em seu filho. Ao meu irmão Maurício Santos. Nunes e sua esposa, pelo afeto e amizade verdadeira. Há minha noiva Eliane Saucedo pelo o amor e companheirismo de sempre.

Ao professor Adroaldo Dias Robaina pela grande oportunidade que me deste, pelas experiências passadas no dia a dia, pela dedicação ao seu orientado.

A professora Marcia Xavier Peiter, pelo carinho, ajuda e sugestões concedidas para a elaboração deste trabalho.

A todos os colegas de laboratório em especial aos colegas Fabiano Braga e Tonismar Pereira, pela grande amizade, carinho e troca de ideias vivenciadas.

Ao grande amigo Luis Nunes pela amizade e convivência.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa concedida. A Universidade Federal de Santa Maria (UFSM).

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola pela oportunidade de realização deste curso.

Enfim a todas as pessoas que de alguma forma contribuíram para a elaboração deste trabalho.

Muito Obrigado!

“O degrau de uma escada não serve simplesmente para que alguém permaneça em cima dele, destina-se a sustentar o pé de um homem pelo tempo suficiente para que ele coloque o outro um pouco mais alto”.

Thomas Huxley

RESUMO

Tese de Doutorado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola
Universidade Federal de Santa Maria

COMPARAÇÃO DE MÉTODOS VIA SOLO E VIA DEMANDA EVAPORATIVA PARA MANEJO DE IRRIGAÇÃO DA CULTURA DA SOJA “SAFRINHA”

Autor: Mario Santos Nunes
Orientador: Adroaldo Dias Robaina
Santa Maria, 25 de agosto de 2014.

A irrigação tem a função de suprir adequadamente as demandas hídricas das culturas, para que estas expressem seu máximo potencial produtivo. Porém ocorrem variações no que diz respeito à relação solo, planta, atmosfera, que inferem de maneira a determinar diferenças nas produções das culturas, portanto, a utilização de tecnologias e equipamentos é fundamental para um bom manejo da irrigação. Técnicas que envolvem a utilização da instrumentação agrônômica com vistas em determinar lâminas brutas para manejo de irrigação são de grande importância para a pesquisa científica. Independentemente da técnica utilizada, tanto via solo quanto via clima é importante que, na determinação da lâmina bruta seja determinada de forma precisa e, de preferência, que haja facilidade na sua obtenção. Com o objetivo de comparar métodos de manejo de irrigação, buscando verificar o desempenho e sensibilidade destes métodos, a partir dos dados da curva de retenção de água no solo, foi instalado um experimento na Fazenda Liberdade no município de Santiago (RS), em um Latossolo Vermelho distrófico típico, unidade de mapeamento Cruz Alta com textura argilosa nos horizontes A e B. Para tanto, foi instalado numa área de 88,64 ha, este sob um pivô central fixo, sensores Watermark para o método de manejo via solo, como sensores de umidade, coletas de dados com o TDR e coletas de amostras de solo para determinação da umidade gravimétrica pelo método do forno elétrico. Foram analisadas as profundidades de 7,6, 10, 12, 20, 30 e 40 cm e considerando, os dados do TDR no presente estudo, como dados-padrão. Para os métodos de manejo via clima foram instalados um irrigômetro juntamente com um tanque classe A, também foram testados os métodos via clima como Hargreaves & Samani, Thornthwaite, Camargo – 71 e Penman - Montheith. Os resultados de lâmina bruta obtidos com sensores de umidade Watermark apresentou um comportamento muito próximo ao obtido pelo TDR, quando comparado aos métodos via clima o tanque classe A e Camargo – 71 subestimou ou superestimou os resultados quando comparados aos outros métodos. Os resultados obtidos pelos métodos de manejo via solo são de maior precisão do que os métodos via clima.

Palavras-chave: manejo de irrigação, lâmina bruta, solo

ABSTRACT

Doctoral Thesis

Graduate Program in Agricultural Engineering
Federal University of Santa Maria, RS, Brazil

COMPARISON OF METHODS BY SOIL AND EVAPORATIVE DEMAND TO IRRIGATION MANAGEMENT FOR SOYBEAN "OFF- SEASON"

Author: Mario Santos Nunes

Advisor: Adroaldo Dias Robaina

Santa Maria, 25 de Agosto de 2014.

Irrigation must function adequately meet the water demands of crops so that they express their full productive potential. However, there are variations with the soil-plant-atmosphere relationship, interfering to determine the differences in crop yields, therefore, the use of technology and equipment is essential for good irrigation management. Techniques involving the use of agricultural instrumentation to determine irrigation depths are of great importance to scientific research. Regardless of the technique used, by soil or weather, is important an irrigation depth accurately determined and preferably easy. In order to compare methods of irrigation management, trying to verify the performance and sensitivity of these methods, from data retention curve of soil water, an experiment was installed in Fazenda Liberdade, Santiago city (RS) in a Cruz Alta map unit, Haplustox, typical clay horizons A and B. Therefore, it was installed in an area of 88.64 ha, under a fixed central pivot, Watermark sensors to the method of handling the soil, such as humidity sensors, data collections with TDR and collection of soil samples for determination of gravimetric moisture by the electric furnace method. TDR data from the present study as a standard data depths of 7.6, 10, 12, 20, 30 and 40 cm, and considering were analyzed. For management methods via weather a Irrigameter were installed along with a tank class A, methods via climate as Hargreaves & Samani, Thornthwaite, Camargo were also tested - 71 and Penman - Montheith. The results obtained with crude blade Watermark humidity sensors showed a very close to that obtained by TDR behavior compared to the class methods via climate Camargo and The Tank - 71 underestimated or overestimated results when compared to other methods. The results obtained by the methods of managing the soil are of greater precision than the methods via climate.

Keywords: irrigation management, gross blade, soil

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Irrigâmetro.....	30
Figura 2.2 – Equipamento Speedy.....	36
Figura 2.3 – Procedimento pelo método da queima do álcool.....	38
Figura 2.4 – TDR modelo 300.....	44
Figura 2.5 – Tensiômetro.....	46
Figura 2.6 – Sensores Watermark.....	47
Figura 3.1 – Vista da área experimental.....	49
Figura 3.2 – Setores do experimento.....	50
Figura 3.3 – Curva de retenção dos valores médios de umidade do solo para cinco camadas de solo.....	52
Figura 3.4 – Dados de umidade do solo georreferenciados.....	53
Figura 3.5 – TDR e GPS.....	54
Figura 3.6 – Antena WiFi e sensores Watermark.....	57
Figura 3.7 – Funcionamento irrigâmetro.....	60
Figura 3.8 – Manejo da irrigação.....	63
Figura 4.1 – Irrigação e/ou precipitações Vs umidade volumétrica do solo.....	68
Figura 4.2 – Variação da umidade do solo em diferentes profundidades (perfis)...	72
Figura 4.3 – Umidade volumétrica do solo para a profundidade (perfil) de 20 cm.....	73
Figura 4.4 – Variação espacial para a profundidade de 20 cm	74
Figura 4.5 – Comprimento da raiz principal.....	76

Figura 4.6 – Comparativo entre os métodos utilizados para determinação de lâmina bruta..... 78

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Características físicas do solo Latossolo Vermelho distrófico típico, unidade de mapeamento Cruz Alta – Valores médios para três repetições. Parizi (2010).....	51
Tabela 02 – Descrição de alguns componentes seguidos das características da cultivar Munasqa.....	65
Tabela 03 – Valores médios de umidade volumétrica (%) em diferentes profundidades (perfis) do solo e, em diferentes setores.....	70
Tabela 04 – Valores médios da lâmina bruta média para diferentes metodologias.....	79
Tabela 05 – Correlações das determinações de lâmina bruta pelo método do TDR com demais metodologias.....	80

LISTA DE APÊNDICE

APÊNDICE 01 – Tabelas de análise da variância da umidade volumétrica para as profundidades de 7,6, 12 e 20 cm.....	101
APÊNDICE 02 – Tabela de análise da variância (teste t), para lâmina bruta para os diferentes métodos.....	102

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	18
2.1	Suprimento hídrico.....	18
2.2	A irrigação no Estado do Rio Grande do Sul.....	19
2.3	Pivô central.....	19
2.4	Manejo da irrigação.....	21
2.5	Evapotranspiração da cultura.....	22
2.5.1	Evapotranspiração de referência (ET_o).....	23
2.6	Tanque classe A.....	26
2.7	Método de Hargreaves & Samani.....	26
2.8	Método de Thornthwaite.....	31
2.9	Método Camargo-71.....	32
2.10	Método de Penman – Montheith.....	27
2.11	Irrigâmetro.....	29
2.12	Conteúdo de água no solo.....	31
2.12.1	Monitoramento da umidade do solo.....	32
2.13	Métodos diretos para a determinação da umidade do solo.....	33
2.13.1	Método padrão da estufa.....	33
2.13.2	Método clássico do forno elétrico.....	34
2.13.3	Método do forno micro-ondas.....	35
2.13.4	Medidor de umidade speedy.....	36

2.13.5	Método da queima do álcool.....	37
2.14	Métodos indiretos para a determinação da umidade do solo.....	39
2.14.1	Técnica do TDR (Time Domain Reflectometry).....	40
2.14.2	Tensiometria.....	44
2.14.3	Sensores de umidade do solo Watermark.....	46
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	48
3.1	Local	48
3.2	Setores da área experimental.....	49
3.3	Obtenção dos dados básicos do solo.....	50
3.3.1	Características físicas do solo.....	50
3.4	Coleta de dados de umidade do solo.....	52
3.4.1	TDR (Time Domain Reflectometry).....	52
3.4.2	Sensores de umidade watermark.....	55
3.4.3	Método do forno elétrico.....	58
3.5	Coleta de dados de umidade via demanda evaporativa.....	58
3.5.1	Método do tanque classe A.....	58
3.5.2	Irrigâmetro.....	59
3.5.3	Método de Hargreaves & Samani.....	61
3.5.4	Método de Thornthwaite.....	61
3.5.5	Método Camargo – 71.....	61
3.5.6	Método de Penman – Montheith.....	61
3.6	Manejo de irrigação.....	63
3.7	Coleta de dados do clima.....	64
3.8	Cultivar munasqa.....	64
3.9	Semeadura.....	65

3.10	Controle fitossanitário.....	65
3.11	Georreferenciamento da área experimental.....	66
3.12	Análise estatística.....	66
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	67
4.1	Precipitação pluvial.....	67
4.2	Irrigação e ou/precipitações vs umidade volumétrica do solo.....	67
4.3	Umidade do solo para diferentes Profundidades (perfis).....	69
4.3.1	Comportamento da variabilidade espacial da umidade volumétrica para a profundidade de 20 cm.....	74
4.3.2	Comprimento raiz principal Vs Umidade volumétrica na profundidade de 20 cm.....	75
4.4	Comparativo dos resultados de lâmina bruta acumulada por diferentes métodos.....	77
5	CONCLUSÕES.....	82
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	83
	APÊNDICES.....	100

1 INTRODUÇÃO

A água é o fator limitante para o desenvolvimento agrícola, sendo que sua falta ou excesso afetam fundamentalmente o desenvolvimento, a sanidade e a produção das plantas. Conforme relatado por Caruso (1998) a água doce própria para consumo humano e produção de alimentos não passa de 1% do total de água líquida encontrada no globo terrestre (97% é água salgada e 2% gelo). Atualmente a atividade agrícola utiliza mais de 70% do volume de água doce consumida no mundo, dessa forma, observa-se a grande necessidade do uso racional da água para produção de alimentos diante de uma população mundial crescente.

O adequado manejo das irrigações tem por objetivo maximizar a produção agrícola racionalizando o uso de mão-de-obra, energia e água, evitando a ocorrência de problemas fitossanitários relacionados à aplicações excessivas ou deficientes de água e o desperdício de fertilizantes.

No entanto, a grande maioria dos usuários da agricultura irrigada não utiliza, ainda, qualquer tipo de manejo racional da água na irrigação. Neste contexto, a adoção da prática de irrigação deve ser estudada no sentido de maximizar a produtividade, evitando déficits e excesso de água que, por consequência, poderiam trazer um menor retorno econômico ao produtor e danos à sustentabilidade desses sistemas agrícolas.

Lima et al (2003), afirmam que a eficácia da irrigação se identifica pela relação custo-benefício e cuja maximização é função de uma série de fatores que vão desde as condições de mercado para os produtos agrícolas até as características de desempenho dos emissores de água. Dentre esses fatores está o uso quantitativo da água de forma racional. Nesse contexto, o conhecimento da quantidade de água disponível no solo às culturas mostra-se essencial, vindo a exigir métodos e instrumentos de determinação de umidade cada vez mais eficientes.

A umidade do solo é um índice básico para quantificar a água de amostras de solo (LIBARDI, 2005), e sua determinação, através de métodos diretos ou indiretos, é de grande importância para o manejo da irrigação. Geralmente utilizam-se métodos indiretos, em que a umidade é estimada a partir da medição de alguma propriedade do solo a ela relacionada (MIRANDA, 2007), sendo que, os principais,

baseiam-se em medidas como a tensão da água no solo, moderação de nêutrons, a resistência do solo à passagem de corrente elétrica, e a constante dielétrica do solo.

O manejo da irrigação está inserido no contexto de maximização da produção agrícola como agente regulador no momento de se realizar uma irrigação, sendo um processo utilizado para decidir quando irrigar as culturas e quanto aplicar de água. Várias metodologias podem ser utilizadas no manejo da irrigação, sendo que o poder aquisitivo e o nível tecnológico dos produtores determinarão as estratégias a serem utilizadas.

Na adoção de um programa de manejo da irrigação em uma propriedade agrícola, é importante determinar o consumo de água da cultura. Existem vários métodos que consideram medidas efetuadas no solo, na planta e na atmosfera. Contudo, a determinação da evapotranspiração da cultura tem sido mais usada para quantificar a lâmina de água a ser aplicada na irrigação.

A evapotranspiração da cultura pode ser determinada por diversos métodos, como o de Penman – Montheith, Hargreaves & Samani, Thornthwaite, Camargo-71 e mais recentemente o irrigâmetro.

Devido ao uso intensivo de tecnologia, energia e os altos custos intrínsecos da atividade irrigada, o eficiente manejo da irrigação com o máximo de precisão, vem ao encontro da racionalização e eficiência do uso da água evitando desperdícios. No Estado do Rio Grande do Sul, onde ocorre uma variabilidade de microclimas e solos nas diversas regiões, o estudo e o conhecimento das dinâmicas que envolvem o uso da água são relevantes para se maximizar o recurso e as produtividades, principalmente da soja.

Portanto avaliar e determinar o quando e quanto irrigar é parte fundamental para o sucesso da atividade irrigada e a garantia de melhores colheitas, sendo a hipótese do presente trabalho, que a utilização de sensores de umidade do solo instalados em diferentes profundidades do solo em uma lavoura é eficaz para manejo de irrigação quando comparados com outras metodologias.

O presente trabalho tem como objetivo geral, comparar métodos de manejo de irrigação via solo e via demanda evaporativa (clima), e validar o método de manejo para irrigação via sensores de umidade do solo Watermark.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Suprimento Hídrico

A água é um componente vital de todas as formas de vida animal e vegetal. Pode-se dizer que a distribuição de todas as formas de vida sobre a Terra é dependente do volume e distribuição dos recursos hídricos.

Um dos principais fatores de produção na agricultura é a água, e cada espécie de planta necessita de um adequado nível de água no solo para que suas necessidades fisiológicas sejam atendidas (LETEY et al. 1984).

Para Dourado Neto e Fancelli (2000), a água afeta a absorção e assimilação de dióxido de carbono, pois está relacionada com o mecanismo de abertura e fechamento dos estômatos (direta e indiretamente: a água regula a capacidade do solo de atender a demanda máxima transpiratória, em função da área foliar e da condição climática, principalmente), a atividade de enzimas (água tem alto calor específico funcionando como regulador de temperatura) e é fundamental para a síntese de carboidratos (pelo processo da fotossíntese) e produção de energia química (ATP) metabólica (pelo processo de respiração).

A água é o fator limitante para o desenvolvimento agrícola, sendo que sua falta ou excesso afetam fundamentalmente o desenvolvimento, a sanidade e a produção das plantas.

Na agricultura não-irrigada, os impactos de déficit hídrico podem ser parcialmente eliminados através de um planejamento da atividade agrícola.

Para suprir déficits hídricos na agricultura tem-se a necessidade de irrigação das mesmas, mesmo com baixa disponibilidade de água, sendo que as pesquisas têm focado na irrigação racional (FRIZZONE et al. 2007), que visa atender a demanda de água da cultura sem desperdícios.

Dentre esses fatores está o uso quantitativo da água de forma racional. Nesse contexto, o conhecimento da quantidade de água disponível no solo às culturas mostra-se essencial, vindo a exigir métodos e instrumentos de determinação de umidade cada vez mais eficientes (GARZELLA, 2004).

Para maximizar a produtividade das culturas no RS, principalmente a produção de grãos, tem-se aumentado o nível tecnológico de cultivo das lavouras, e entre estes se destaca a irrigação.

2.2 A irrigação no Estado do Rio Grande do Sul

De acordo com Freitas (2010) um dos aspectos mais importantes da irrigação é a reposição da água ao solo em quantidade adequada e na ocasião oportuna. O excesso de irrigação geralmente reduz a produtividade e a qualidade da produção, pode provocar o crescimento excessivo da planta, o retardamento da maturação dos frutos, a lixiviação de nutrientes solúveis (principalmente nitrogênio), queda de flores, maior ocorrência de doenças de solo e distúrbios fisiológicos, maiores gastos com energia e o desgaste do sistema de irrigação.

Conforme Michelon (2005), nos últimos anos têm se observado um significativo aumento da área irrigada por aspersão no Estado, estimando-se que esta área, irrigada através de pivô central, esteja próxima dos 35 a 40 mil hectares.

Segundo Kuss (2006), é neste contexto de aumento das áreas irrigadas, que a soja surgiu como uma cultura alternativamente viável para englobar o sistema de rotação de culturas em áreas irrigadas no RS, por apresentar um elevado potencial de produtividade possibilitando o aumento da lucratividade do produtor, principalmente, como cultura utilizada na safrinha e em sucessão ao cultivo de milho para semente (RODRIGUES, 2001).

2.3 Pivô central

Segundo Schons (2010), o pivô central é um sistema de irrigação por aspersão que opera em círculos, constituído de uma linha lateral com emissores, ancorada em uma das extremidades e suportada por torres dotadas de rodas equipadas com unidades propulsoras. Segundo os autores, a velocidade de rotação das torres em torno do ponto central é regulada por meio de um relé percentual

situado no painel do equipamento, que comanda a velocidade de deslocamento da última torre.

O sistema de irrigação tipo pivô central pertence ao grupo de sistemas mecanizados de aspersão que foi idealizado pelo norte americano Frank Zybach na década de 40. Foi introduzido no Brasil no final dos anos 70, impulsionado sobretudo por programas governamentais como o PROINE, PROFIR e PRONI (VILELA 1999).

De fácil operação, alta eficiência na aplicação da água (70 a 90%) e, graças à grande versatilidade desse equipamento e baixo custo operacional, os pivôs rapidamente conquistaram a preferência do agricultor irrigante. Está atualmente entre os equipamentos de irrigação mais comercializados e é o que mais tem contribuído para o incremento da área irrigada no País.

No início eram máquinas simples acionadas por turbinas hidráulicas. A uniformidade de aplicação de água sobre a superfície do solo dependia do relevo e da extensão do pivô. Atualmente, o desenvolvimento e a incorporação de diversos acessórios e dispositivos permitem a utilização desses equipamentos nas mais diversas situações (SCHONS, 2010).

No entanto, a grande maioria dos usuários da agricultura irrigada não utiliza, ainda, qualquer tipo de estratégia de uso e manejo racional da água na irrigação. Neste contexto, a adoção da prática de irrigação deve ser estudada no sentido de maximizar a produtividade, evitando déficits e excesso de água que, por consequência, poderiam trazer um menor retorno econômico ao produtor e danos à sustentabilidade desses sistemas agrícolas (LOPES, 2006).

Segundo MANTOVANI et al. (2006), mesmo considerando a melhoria dos sistemas modernos de irrigação, com maior eficiência de distribuição da água nas mais diversas situações, a falta de um programa de manejo pode levar tudo a perder, seja pela aplicação de água em excesso (mais comum) ou pela sua falta, antes ou depois do momento adequado em cada fase da cultura, nas situações vigentes.

A utilização de irrigação por pivô central é a que mais cresce, tendo este sistema sido o grande responsável pela expansão da área irrigada no Brasil. Sua evolução técnica permitiu que ele se adaptasse aos mais distintos sistemas de produção, tanto de culturas anuais quanto perenes (MANTOVANI et al. 2006).

Garcia (2000) ainda relata que, considerando-se os custos de um sistema de irrigação, tanto no que diz respeito ao projeto, à mão-de-obra qualificada, aos

equipamentos, quanto à energia despendida e à água consumida, há necessidade de uma otimização da irrigação, através da aplicação adequada da água fornecida à cultura, uma vez que, segundo RODRIGUES et al. (1997), até recentemente não existia grande preocupação em racionalizar o seu uso em projetos de irrigação. Todavia, o aumento da demanda, aliado à pequena disponibilidade de água em algumas regiões, vem acentuando a necessidade de manejá-la eficientemente.

2.4 Manejo da irrigação

O manejo da irrigação está inserido no contexto de maximização da produção agrícola como agente regulador no momento de se realizar uma irrigação, sendo um processo utilizado para decidir quando irrigar as culturas e quanto aplicar de água (CONTIN, 2008).

O manejo de irrigação é o processo para decidir quando irrigar as culturas e quanto aplicar de água. Esse é o único meio para otimizar a produção agrícola e conservar a água, além de ser a chave para melhorar o desempenho e a sustentabilidade de sistemas de irrigação.

Uma forma muito utilizada para se determinar quanto e quando irrigar é estimar a necessidade de água a partir do balanço hídrico dos solos (REICHARDT, 1990). O balanço de água no solo é um método de estimativa da disponibilidade hídrica no solo para as plantas pela contabilização das entradas e saídas de água no sistema solo-água-planta. Ele está fundamentado no princípio da conservação de massa, em que a transferência da massa de água, em determinado volume de controle, com capacidade finita de armazenamento e em determinado intervalo de tempo, pode ser determinada pelas variações nos fluxos de água no solo (BERGAMASCHI, 1992).

Quando a disponibilidade de água em determinada época do ano, ou região é limitada, como no caso de muitas regiões brasileiras, um manejo eficiente dos sistemas de irrigação tem implicações importantes, tanto pela necessidade de atender o setor agrícola, como pela competitividade naturalmente estabelecida com outros setores da sociedade (MANTOVANI, 2004).

Os métodos de controle de rega podem ser classificados em três categorias básicas, de acordo com o indicador de déficit hídrico utilizado (GARDNER, 1988): (i) indicador solo, (ii) indicador planta, e, (iii) indicador clima. A seleção do método de controle das irrigações, ou seja, a estratégia de irrigação é um fator preponderante para o sucesso da atividade. De acordo com Clyma (1996), a chave para o melhoramento do manejo da água da irrigação está na seleção da estratégia.

Dentre os indicadores de déficit hídrico que utilizam elementos climáticos, destaca-se o do Tanque Classe A, devido à sua facilidade de operação, custo relativamente baixo e, principalmente, a possibilidade de instalação próximo à cultura a ser irrigada, além dos resultados satisfatórios para a estimativa da demanda hídrica das culturas. Apesar de fornecer uma medida superestimada da demanda hídrica da cultura, essa medida associa os efeitos integrados dos diferentes fatores que influem na evapotranspiração da cultura (VOLPE e CHURATA-MASCA, 1988).

2.5 Evapotranspiração da cultura

As perdas de água por evaporação e transpiração que ocorrem em uma cultura a campo constituem a evapotranspiração, essencial para estimar a quantidade de água requerida para irrigação (PEREIRA et al. 1997).

De acordo com Morgadinho (2010), a evapotranspiração de uma cultura (ET_c) traduz a passagem de água para a atmosfera na forma de vapor em resultado da evaporação direta da água da superfície do solo, da evaporação da água interceptada pelo copado e da transpiração das folhas. Uma vez conhecida a ET_c é possível determinar as necessidades de água da cultura e que correspondem à quantidade de água necessária para compensar as perdas por evapotranspiração. No entanto, os conceitos de evapotranspiração cultural e das necessidades hídricas da cultura são distintos, apesar de terem valores idênticos.

Segundo Silva e Amaral (2008), a Evapotranspiração (ET_c), é extremamente importante no computo do Balanço Hídrico para fins de irrigação, é um processo simultâneo de transferência de água para a atmosfera através da evaporação da água do solo e da transpiração das plantas.

As necessidades hídricas da cultura referem-se à quantidade de água de que esta necessita em termos de precipitação e de rega enquanto a evapotranspiração cultural refere-se à água perdida por evapotranspiração (ALLEN et al. 1998).

2.5.1 Evapotranspiração de referência (ET_o)

O termo evapotranspiração de referência (ET_o) foi definido por Doorenbos e Pruitt (1977) como aquela que ocorre em uma extensa superfície coberta com grama de 0,08 a 0,15 m, em crescimento ativo, cobrindo totalmente o solo e sem deficiência de água. Em 1991, pesquisadores de vários países, especialistas em agrometeorologia, concluíram que o conceito de ET_o empregado apresentava problemas, sobretudo relacionados à variabilidade das culturas de referência atualmente em uso, levando a erros de sub ou superestimações e à existência de dificuldades experimentais para contrastá-los. Essas condições dificultavam a determinação padronizada da ET_o em grande escala (MENDONÇA et al. 2003). Esta cultura de referência é hipotética, semelhante à grama, cujo modelo físico-matemático que a expressa é o de Penman-Monteith, com parâmetros estabelecidos pela FAO (ALLEN et al. 1998).

A ET_o pode ser definida como a evapotranspiração que ocorre de uma cultura hipotética, com altura fixa de 0,12 m, albedo igual a 0,23, e resistência da cobertura ao transporte de vapor d'água igual a 69 s.m^{-1} , que representaria a evapotranspiração de um gramado verde, de altura uniforme, em crescimento ativo, cobrindo totalmente a superfície do solo e sem falta de água (PEREIRA et al. 1997).

A evapotranspiração de referência (ET_o), foi criada para facilitar a obtenção dos valores de ET_c, pois para sua determinação direta faz-se necessário um grande número de parâmetros do solo, da planta, do clima ou mesmo de equipamentos sofisticados, o que limita a sua aplicabilidade (MENDONÇA et al. 2006).

A evapotranspiração de referência pode ser determinada ou estimada de diferentes maneiras. De acordo com Miranda et al. (2001), ela pode ser mensurada utilizando métodos diretos ou estimada por meio de informações climáticas. No primeiro grupo, entre outros, estão incluídos os diferentes tipos de lisímetros e o

balanço de água no solo; enquanto no segundo, estão enquadrados os métodos teóricos e empíricos, como os de Penman (1948), Thornthwaite (1948), Blaney e Criddle (1950), Jensen e Haise (1963), Priestley e Taylor (1972), Hargreaves (1977) e evaporímetros como o tanque “Classe A” dentre outros (SENTELHAS, 2003).

2.6 Tanque classe A

Conforme Santos et al. (2001) o tanque de evaporação Classe “A” é circular, tendo um diâmetro de 121 cm e uma profundidade de 25,5 cm. É de material galvanizado (calibre 22), sendo montado em uma plataforma de madeira aberta e o fundo está a 15 cm sobre o nível da terra. Enche-se com água até 5 cm da borda e o nível da água não deve baixar mais que 7,5 cm além desta borda. A água deve ser renovada regularmente para eliminar as impurezas (DOORENBOS e PRUITT, 1984). A evaporação é medida com um micrômetro de gancho, assentado sobre um poço tranquilizador (BERNARDO, 1989).

O manejo através do tanque Classe “A” possibilita fácil obtenção de dados no local do cultivo e custo relativamente baixo, contribuindo, portanto, para a economia de água utilizada durante o ciclo da cultura (SANTOS et al. 2001).

O tanque classe A foi um dos métodos mais utilizados para estimativa da evapotranspiração de referência no manejo da água de irrigação. O maior uso desse equipamento é devido à sua praticidade e aos baixos custos de instalação e manutenção (CONTIN, 2008).

A leitura do nível de água é realizada diariamente e a diferença entre leituras caracteriza a evaporação no período. Porém, os processos de evaporação da água livre no tanque (EV) e a evapotranspiração da cultura (ETc) são semelhantes apenas nos seus aspectos físicos. Para a conversão da evaporação em evapotranspiração potencial, coeficientes específicos dependentes do clima e da bordadura circundante são utilizados (DOORENBOS e PRUITT, 1977), de acordo com a expressão:

$$ET_o = K_p \cdot E_v \quad (1)$$

em que

E_{To} = evapotranspiração potencial, mm d^{-1} ;

K_p = coeficiente do tanque, adimensional;

E_v = evaporação medida no evaporímetro, mm d^{-1} .

O valor de K_p varia com as condições da área circundante do tanque, ou seja, tamanho e natureza da área de bordadura, condições de umidade relativa do ar e velocidade do vento (ALLEN e PRUITT, 1991).

Deve-se levar em consideração que a evapotranspiração potencial determinada com o uso do tanque Classe A, apresenta uma adequada precisão no manejo da irrigação por períodos de no mínimo cinco dias. Outro ponto importante é seguir corretamente as recomendações de construção do tanque, principalmente no que se refere ao tipo de metal utilizado. A utilização de metal não recomendado pode proporcionar um erro de até 30% na estimativa da evapotranspiração potencial (BERNARDO et al. 2006).

2.7 Método de Hargreaves & Samani

É um método baseado na temperatura e na radiação solar. A equação de Hargreaves, modificada por Samani, onde o termo de correção, devido a umidade relativa do ar, foi excluído da equação original, teve como princípio o ajustamento dos índices da equação para as condições locais. O ajuste das constantes da equação foi realizado incorporando o termo de amplitude térmica média do mês, em C. Segundo Henrique (2006), na ausência dos dados de radiação solar, umidade relativa e velocidade do vento, a evapotranspiração, em mm.d^{-1} , pode ser estimada através da seguinte equação (HARGREAVES, 1974):

$$E_{To} = 0,0023 \cdot (T_{med} + 17,8) \cdot (T_x - T_i)^{0,5} \cdot R_a \quad (2)$$

em que T_{med} , T_x e T_i , em °C, representam, respectivamente, as temperaturas média, máxima e mínima e R_a é a radiação solar no topo da atmosfera ($mm.d^{-1}$).

2.8 Método de Thornthwaite

O Método de Thornthwaite foi desenvolvido com base em dados de evapotranspiração medidos e dados de temperatura média mensal, para dias com 12 horas de brilho solar e mês com 30 dias (MIRANDA et al. 2001).

Segundo Fernandes et al (2005), o método de Thornthwaite é muito utilizado em todas as regiões do sul do Brasil, já que se baseia somente na temperatura, que é um dado normalmente coletado em estações meteorológicas.

O método de Thornthwaite é calculado da seguinte forma:

$$ET_p = F_c \cdot 16 \cdot \left(10 \frac{T}{I}\right)^a \quad (3)$$

Onde:

ETP = Evapotranspiração potencial (mm/mês)

F_c = Fator de correção em função da latitude e mês do ano;

$a = 6,75 \cdot 10^{-7} \cdot I^3 - 7,71 \cdot 10^{-5} \cdot I^2 + 0,01791 \cdot I + 0,492$ (mm/mês)

I = índice anual de calor, correspondente a soma de doze índices mensais;

T = Temperatura média mensal (°C).

2.9 Método Camargo-71

Camargo (1961; 1962) substituiu no nomograma de Thornthwaite o complexo índice "I" por um índice "T", que corresponde simplesmente à temperatura média anual da região. O novo índice funcionou eficazmente para regiões de clima tropical

e equatorial úmidos. Por sua vez, em regiões de clima temperado ou frio, apresentando meses com temperatura média próxima ou abaixo de 0 °C, o autor verificou que o índice "T" aplica-se com êxito, porém calculado a partir da temperatura média anual apenas dos meses vegetativos, com temperaturas médias positivas. Dessa forma, o índice "T" poderá ser universal e servir para qualquer condição climática. Posteriormente, Camargo (1978) preparou uma tabela simples para obter o valor de ET_p diário, não corrigido pela latitude, com base no índice "T", o qual facilitou grandemente a estimativa da ET_p, segundo Thornthwaite.

Conforme Borges Junior (2012), o método Camargo-71 tem apresentado resultados similares aos obtidos com a equação original de Thornthwaite (CAMARGO E CAMARGO, 2000). Trata-se de uma equação simples, como descrito abaixo:

$$ET_o = R_a \cdot T_{med} \cdot K \cdot D \quad (4)$$

Em que:

K = fator de ajuste igual a 0,01, para T (temperatura média anual do local) até 23,5 °C; 0,0105 para T de 23,6 a 24,5 °C; 0,011 para T de 24,6 a 25,5 °C; 0,0115 para T de 25,6 a 26,5 °C; 0,012 para T de 26,6 °C a 27,5; 0,013 para T superior a 27,5 °C;
D = duração do período (neste trabalho considerado igual a um, por ser ET_o diária).

2.10 Método de Penman – Montheith

Penman publicou seus primeiros trabalhos com evaporação natural na década de 40 (PENMAN, 1948). Adotou a expressão evaporação potencial, a qual considerava mais apropriada que evapotranspiração potencial, no início da década de 50 (PENMAN, 1950, 1952). Utilizou o déficit de saturação do ar (ea-ed), no termo aerodinâmico da equação geral, para estimar a evaporação potencial em superfície natural de água. Para obter a transpiração potencial em superfície gramada propôs um fator de redução, variável de 0,6 a 0,8 no curso do ano e de região para região.

Penman (1952) propõe também uma adaptação da equação para obter diretamente a transpiração potencial em gramado.

Sem auxílio de computador a equação era de difícil solução. Utilizando-se, porém, nomogramas e tabelas especiais, como as preparadas por VILLANOVA (1967), FRÈRE (1972) e DOORENBOS e PRUITT (1975), a resolução da equação foi facilitada.

O método Penman é de natureza puramente física, embora tenha aspectos empíricos por utilizar a temperatura do ar em lugar da temperatura da superfície evaporante, como é empregada na clássica equação de Dalton.

Para o cálculo da evapotranspiração de referência, ALLEN et al. (1998) propuseram a seguinte equação:

$$E_{To} = \frac{0,48 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma (900/T + 273) \cdot U_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34 U_2)} \quad (5)$$

Em que:

E_{To} = evapotranspiração de referência mm d^{-1} ;

R_n = saldo de radiação líquida, $\text{MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$;

G = fluxo de calor no solo, $\text{MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$;

T = temperatura do ar a 2 m de altura, $^{\circ}\text{C}$;

U_2 = velocidade do vento a 2 m de altura, m s^{-1} ;

e_s = pressão de saturação de vapor, kPa;

e_a = pressão de vapor atual do ar, kPa;

$(e_s - e_a)$ = déficit de pressão de vapor, kPa;

Δ = declividade da curva de pressão de vapor de saturação, $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$;

γ = constante psicrométrica, $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$.

2.11 Irrigâmetro

Em razão do grande número de métodos existentes para estimativa da evapotranspiração potencial das culturas, a escolha do método mais adequado depende da disponibilidade de dados meteorológicos, do nível de precisão exigido, e do custo de aquisição de equipamentos. Esses fatores têm levado pesquisadores a desenvolver métodos alternativos para determinação da evapotranspiração para fins práticos de manejo da água de irrigação, objetivando baixo custo, fácil manuseio e boa precisão (OLIVEIRA et al. 2008).

O Irrigâmetro foi desenvolvido na Universidade Federal de Viçosa (UFV) no ano de 2004, objetivando ser uma ferramenta prática no manejo da água de irrigação. O Irrigâmetro combina o método de estimativa da evapotranspiração com a disponibilidade de água no solo para a cultura, sendo um aparelho evapopluiométrico que fornece diretamente o momento de irrigar e o tempo de funcionamento ou a velocidade de deslocamento do sistema de irrigação, de maneira simplificada, precisa e com custo reduzido, permitindo efetuar o cômputo da efetividade da chuva no manejo da irrigação. Estando o Irrigâmetro ajustado para as condições de solo, cultura e equipamento de irrigação, o manejo da água é conduzido sem a necessidade de cálculos, sendo utilizado um equipamento para cada cultura em exploração (OLIVEIRA e RAMOS, 2008).

Conforme Oliveira et al. (2008), o irrigâmetro é calibrado na fabricação, e para se elaborar esta calibração é necessário os dados do tipo de sistema de irrigação que será implantado, da capacidade de campo, ponto de murcha permanente e densidade do solo do local de implantação do sistema.

De acordo com Contin (2008) o Irrigâmetro possui três escalas: (a) escala laminar graduada no próprio tubo de alimentação do aparelho, que possui a função de medir a lâmina de água evaporada ou evapotranspirada; (b) escala da régua de manejo sem graduação, possui quatro faces e em cada uma delas, quatro faixas verticais de cores: azul, verde, amarela e vermelha. A sua função é indicar a necessidade de irrigação; e (c) escala da régua temporal ou percentual graduada em horas e minutos ou em percentagem, esta régua indica o tempo de funcionamento, no caso de aspersão convencional ou localizada, ou a velocidade de deslocamento do sistema de irrigação, no caso de pivô central ou sistema linear.

Na régua de manejo, as quatro faixas coloridas são indicadoras do momento de irrigar a cultura. Quando o nível da água no interior do tubo de alimentação se encontra na direção da faixa azul ou da faixa verde, é indicativo de alta e boa disponibilidade de água no solo, respectivamente, não havendo necessidade de irrigar a cultura; na direção da faixa amarela, é recomendável irrigar e caso o nível de água abaixe a ponto de atingir a faixa vermelha, o irrigômetro estará indicando ao produtor que o momento da irrigação já passou, podendo ocorrer redução na produtividade da cultura que está sendo irrigada (CONTIN, 2008).

Ainda de acordo com Contin (2008) a determinação do consumo de água das culturas pelo irrigômetro (Figura 2.1) em seus diferentes estádios de desenvolvimento se baseia na variação do nível da água no evaporatório do equipamento. Na fase inicial de desenvolvimento (fase I), o nível da água no evaporatório é o mais baixo, em razão do menor consumo de água da cultura nesse período. A fase de florescimento e enchimento de grãos (fase III) se caracteriza pelo maior consumo de água pela cultura durante o ciclo, sendo o nível de água no evaporatório o mais alto.

Oliveira et al. (2008), comparou o irrigômetro com outros métodos de estimativa de evapotranspiração (Penman-Monteith – FAO 56 e Hargreaves-Samani), e obteve valores satisfatórios, assim ficando indicado para o manejo de irrigação, fato associado ao baixo custo, praticidade e ausência de cálculos.



Figura 2.1 – Irrigômetro

2.12 Conteúdo de água no solo

De acordo com Santos et al. (2010), o conteúdo de água no solo expressa a quantidade de água em massa ou volume contida no solo em um dado momento. O conhecimento desse valor no perfil do solo é indispensável para estudos hidrológicos e manejo da irrigação em áreas cultivadas.

Segundo Klar et al. (1966), o conteúdo de água no solo é variável e por isso deverá ser determinado periodicamente, através de amostragens, em números proporcionais a área a irrigar.

O conteúdo de água no solo é uma variável utilizada em estudos que envolvem agricultura, hidrologia, meteorologia, entre outros (GOMES et al. 2013).

A dinâmica da água no solo é influenciada por características como textura, porosidade, teor de argila e matéria orgânica, que determinam a retenção no perfil por adsorção e capilaridade, definindo o estado energético da água e, também, por fatores externos, como precipitação pluvial, radiação solar, temperatura, evapotranspiração da cultura, índice de área foliar, densidade de plantas e sistema de manejo do solo. Esses fatores podem atuar de forma diferenciada em período de secagem do solo e fornecer indicadores capazes de auxiliar o planejamento e a condução de cultivos agrícolas.

Outro fator relevante quanto aos estoques de água no solo, é o sistema de manejo adotado, o qual pode atuar de forma decisiva na distribuição hídrica, no perfil e nas interações solo-planta-atmosfera, ao longo do tempo. Estudos apontam que isto se deve às alterações físicas que ocorrem em função do sistema de manejo adotado; por exemplo, o preparo convencional promove a inversão das camadas aráveis do solo por aração e gradagens, ocasionando aumento da macro porosidade do solo em relação à micro porosidade. As modificações das condições físico-hídricas do solo, como consequência do sistema de manejo, ocorrem da superfície para o interior do perfil (MARTORANO et al. 2008).

Na década de 70, com a expansão da mecanização agrícola, a adoção do sistema de preparo convencional e abertura de novas áreas para cultivo da soja, a taxa de perda de solo alcançou valores muitas vezes superiores aos limites toleráveis, ameaçando severamente a sustentabilidade da atividade e comprometendo a qualidade ambiental. O sistema plantio direto (SPD) é uma forma

de manejo da produção agrícola que reverte essa situação, combatendo eficazmente a erosão e contribuindo significativamente para o aumento dos estoques de carbono e nitrogênio no perfil do solo, principalmente quando associado à rotação de culturas anuais (SILVA et al. 2009)

Abreu et al. (2004) observaram que o solo sob plantio direto apresentou maior volume de macro poros entre 0,02 e 0,05 m, o que favoreceu a condutividade hidráulica saturada, conforme observado também por Sidiras et al. (1984) e Azooz e Arshad (1996); no entanto, efeitos positivos do sistema de manejo na estrutura do solo foram notados por Klein e Libardi (2002) até a profundidade de 0,4 m. A atividade das raízes no sistema plantio direto influenciam a manutenção da estrutura do solo e a condutividade hidráulica ao longo do tempo (CAROF et al. 2007).

De acordo com Cervi (2003), o Brasil ocupa a posição de segundo lugar em área agrícola cultivadas sob sistema plantio direto, sendo apontado, naquele ano, cerca de 20 milhões de hectares sob esse sistema de manejo do solo. O autor infere que no restante das áreas cultivadas no País, o sistema adotado seja o preparo convencional.

De acordo com Silva et al. (2012) há um grande avanço nas áreas de culturas anuais irrigadas basicamente cereais, na qual o plantio direto é adotado como forma de uso sustentável do solo e da água.

2.12.1 Monitoramento da umidade do solo

Neste item serão descritos alguns métodos e sensores usados para a determinação da quantidade de umidade do solo.

Existem diversos métodos para a determinação do conteúdo de umidade do solo, todos com algumas limitações: ou são de precisão, ou são dispendiosos, ou morosos, ou, ainda, trabalhosos.

Vielmo (2008), cita os métodos como diretos e indiretos, onde os diretos são os métodos gravimétricos como, o método padrão de estufa, método das pesagens e método dupea; e os indiretos são os métodos tensiométricos, método da resistência elétrica, método blocos de gesso, método de colman, método químico, sonda de nêutrons, método de capacitância elétrica e o método do TDR.

2.13 Métodos diretos para a determinação da umidade do solo

Segundo Gardner (1986), os métodos diretos ou gravimétricos baseiam-se na pesagem de amostras de solo e depois da secagem, realizada em estufa a 105 °C. A diferença entre as duas medidas representa a amostra de água presente naquela amostra. Com a quantificação destas massas determina-se a umidade gravimétrica (U) do solo e caso a massa específica ou o volume da amostra também for conhecido pode-se obter a umidade volumétrica (θ).

2.13.1 Método padrão da estufa

É o método clássico e o mais utilizado na determinação do conteúdo de água do solo. As amostras são retiradas em vários locais e profundidades, no campo, podendo constituir-se de amostras simples ou compostas. Essas amostras podem ser deformadas, utilizando-se trados comuns, ou não deformadas, de volume conhecido, utilizando-se trados especiais, como por exemplo, o trado de Uhland (TAVEIRA et al. 2011).

É um método direto, bastante preciso e consiste em se pesarem amostras de solo úmidas e secas. A secagem da amostra é efetuada em estufa a 105 - 110 °C até peso constante. No qual a amostra de solo deste método deve ficar por 24 horas, na temperatura de 105 a 110 °C. (BERNARDO, 1986; KLAR, 1988; KLAR, 1991). Seu principal inconveniente é a demora no tempo de resposta (24 horas), além da necessidade de utilizar estufa e balança de precisão. Para a obtenção de resultados de umidade deve-se seguir a equação abaixo:

$$U_a = (M_1 - M_2)/(M_2 - M_3) \cdot 100 \quad (6)$$

em que

U_a = umidade atual do solo, %;

M_1 = massa do recipiente com solo úmido, g;

M_2 = massa do recipiente com solo seco, g, e;

M_3 = massa do recipiente, g.

O método padrão da estufa proporcionou o surgimento de uma série de outros métodos alternativos, que variam entre si em função da fonte de calor utilizada para a eliminação do conteúdo de água da amostra de solo. Dentre eles destacam-se: o método do forno elétrico, o método do microondas, o método do Speed, método do ácool.

2.13.2 Método clássico do forno elétrico

De acordo com Fonseca et al. (2009) é um método simples que utiliza o forno elétrico comercial para a secagem das amostras de solo. Apresenta como vantagem principal a redução no tempo de secagem da amostra, o qual varia em função do número de amostras colocadas para secar, do tamanho da amostra, da umidade, do tipo de solo e da potência do forno utilizado. Para fins de manejo de irrigação em uma determinada área, é aconselhável que seja feita um estudo prévio, com os diferentes tipos de solo existentes na propriedade, visando a sua calibração com o método padrão da estufa.

Neste contexto, Andrade Júnior et al. (1996) estabeleceram tempos máximos de secagem em torno de 25 minutos para amostras com peso de 200 g e 30% de umidade em solo Areia Quartzosa, Latossolo Amarelo e Aluvial.

O método do forno elétrico foi desenvolvido com o objetivo de reduzir o consumo de energia e o tempo de secagem do solo. É um método com grande potencial de utilização pelos produtores e técnicos para se medir a umidade do solo,

visto que é simples, rápido, e de baixo custo de aquisição e execução (FONSECA et al. 2009).

2.13.3 Método do forno microondas

Estudos vêm sendo feitos nos últimos tempos, para avaliar o uso do forno de microondas na determinação da umidade dos solos (HANKLIN e SAWHNEY, 1978; GEE e DODSON, 1981; e CARTER e BENTLEY, 1986;) citados por (ODERKO e SHAKOOR 2006 e MENDES, et al. 2007).

Segundo Souza (2002), essa tecnologia é um método alternativo ao método convencional de secagem de solo e de planta. O método convencional utiliza a estufa de secagem como equipamento e demanda de 12 até 72 horas para completar o teste. Já o método alternativo utiliza o forno de microondas doméstico como equipamento e demanda 10 ou 14 minutos para secar solo, respectivamente.

A energia gerada por microondas propicia a obtenção de resultados em menor tempo quando comparado ao método de estufa (MENDES et al. 2007).

Conforme Miranda (2008) há necessidade de investigar os efeitos do tipo de solo, do tamanho da amostra, da quantidade de água (teor de umidade), e da potência do microondas no tempo de secagem requerido para uma determinação da umidade pelo método do microondas. Esta tecnologia tem como benefício direto à redução do tempo de análise, redução de gasto de energia, durante a análise, e rapidez nos dados necessários para determinação do manejo de irrigação.

O fornecimento de dados relacionados ao teor de umidade do solo deve ser rápido e confiável, pois a partir dessas informações algumas ações são tomadas. Como exemplo, verificar se há ou não necessidade de se dar continuidade a adição de água de irrigação em determinada cultura (SALES et al. 2012).

2.13.4 Medidor de umidade speedy

Garzella (2011) afirma que o princípio de funcionamento do medidor de umidade Speedy conforme Figura 2.2, baseia-se no método químico do carbureto de cálcio, onde a reação deste com a água causa a formação do gás acetileno proporcionalmente à quantidade de água disponível. A quantificação do acetileno permite determinar esse teor de água e, em consequência, a umidade do material que constitui a amostra em análise. Sendo um gás a temperatura ambiente, o acetileno promove uma elevação na pressão do interior do Speedy, que é quantificada pelo manômetro tipo *bourdoun* localizado na tampa de seu cilindro.



Figura 2.2 – Equipamento Speedy

Fonte: Nunes (2013).

Utilizando-se dos conceitos de umidade do solo e admitindo a massa específica da água como 1,0, pode-se expressar o volume de água contido numa determinada massa de solo, por:

$$100\text{g de solo seco} + \text{Umidade (\%)} \rightarrow 100\text{g de solo seco} \\ \text{ xg de solo úmido (Mu)} \rightarrow \text{yg de solo seco (Ms)}$$

$$M_s = \frac{M_u \cdot 100}{100 + U} \quad (7)$$

em que:

M_s = massa de solo seco; g;

M_u = massa de solo úmido; g;

U = umidade da amostra; %.

A massa de água (M_a) é dada pela seguinte equação.

$$M_a = M_u - M_s \quad (8)$$

2.13.5 Método da queima do álcool

De acordo com Calheiros e Arndt (1991) através de subseqüentes queimas de porções de álcool em contato direto com a amostra do solo de interesse e conseqüente evaporação da água dessa amostra e da dissolvida no álcool, BOUYOUCOS (1928) idealizou o método do álcool para determinação da umidade de amostras de solo.

Este procedimento pode ser usado no campo. Restrições são devidas à falta de controle da temperatura, que causa queima de matéria orgânica e pode provocar “cracking” em partículas de argila por perda de água de constituição. Como a queima de álcool comum deixa água como resíduo, só deve ser usado álcool etílico não hidratado (RIBEIRO JR, 2012). A Figura 2.3 mostra o procedimento de queima do álcool.



Figura 2.3 – Procedimento pelo método da queima do álcool
Fonte: Ribeiro Jr (2012).

A seguir são apresentados os aparelhos, procedimentos e cálculos necessários para a execução do ensaio:

- a) Balança com capacidade 200 g e sensibilidade 0,01g;
- b) cápsulas metálicas com tampa, marcadas de forma permanente;
- c) espátula de aço de ponta arredondada (~8 cm de comprimento);
- d) pinça com tamanho suficiente para manipular a cápsula utilizada;
- e) Pesar cada cápsula (seca e limpa) com tampa (M3);
- f) Colocar cada amostra (~1/3 da cápsula) na cápsula, sem tampa. Pesar e anotar (M1);
- g) Adicionar álcool etílico à amostra, revolvendo-a com a espátula;
- h) Atear fogo à amostra, estando a cápsula presa com as pinças e revolvendo continuamente a amostra para evitar grumos de solo, até que toda a água se evapore.
- i) Repetir os procedimentos (g) e (h) até observar constância de massa.

Geralmente isto ocorre a partir da terceira pesagem. Depois de cada queima, a cápsula é imediatamente tampada, e a pesagem é feita com a cápsula à temperatura ambiente.

j) Pesar a cápsula com o solo seco e anotar o peso (M2).

1. Peso da água $M_w = M_1 - M_2$
2. Peso do solo seco $M_s = M_2 - M_3$

$$W (\%) = \frac{M_w}{M_s} \cdot 100 \quad (9)$$

2.14 Métodos indiretos para a determinação de umidade do solo

Segundo Freitas et al. (2011) diversos são os métodos indiretos de determinação da umidade do solo. Atualmente, os métodos eletrométricos vêm ganhando espaço em função de sua maior versatilidade. Segundo Conklin (2005) medidas que envolvem eletricidade (voltagem, corrente, frequência, resistência, capacitância, propriedades dielétricas) podem ser utilizadas individualmente ou em combinação para obter informações sobre o meio no qual os elétrons estão se movendo. Pesquisas vêm sendo realizadas acerca dos parâmetros supracitados com objetivo de desenvolver sensores capazes de monitorar as variáveis do ambiente agrícola.

Celinski e Zimback (2010) desenvolveram um sensor de capacitância elétrica e avaliaram seu desempenho em campo. Segundo os autores, alguns atributos do solo (pH, CTC, soma de base, cálcio, magnésio) se correlacionaram significativamente com a capacitância, demonstrando a possibilidade de ser utilizado no controle da fertilidade do solo. O conhecimento da constante dielétrica dos materiais é um dos princípios básicos no desenvolvimento de sensores capacitivos. Esses sensores têm sido empregados para determinar a umidade do solo, devido ao

valor da constante dielétrica da água.

De acordo com alguns autores, Rusiniak (2002), Chang et al. (2007), Kumhála et al. (2008), Frangi et al., (2009), Benedetto (2010) e Monsen-Nia et al. (2010), este valor é de 78-80 ϵ , em contraste com o solo, cujo valor pode chegar a até 14 ϵ . Assim, a constante dielétrica é altamente relacionada com o teor de água no solo (KIZITO et al. 2008).

Medir o teor de água do solo pela determinação da capacitância não é uma idéia nova, tendo como exemplos os trabalhos desenvolvidos por Anderson e Edlefsen (1942), Anderson (1943) e Plater (1955). A partir dos anos 60 pesquisas sobre o comportamento dielétrico dos líquidos polares e sólidos tiveram maior notoriedade (WILLIAMS, 2011). Entretanto, somente a partir das últimas décadas esta técnica vem sendo explorada de maneira expressiva em virtude principalmente do desenvolvimento de instrumentos eletrônicos mais sofisticados e com aplicações na agricultura irrigada como, por exemplo, os trabalhos conduzidos por Freitas et al. (2009) e Cruz et al. (2010).

A criação e o desenvolvimento de novos métodos para estimativa de parâmetros utilizados no manejo da irrigação, poderão contribuir para obtenção de maiores eficiências dos processos e menores custos.

2.14.1 Técnica do TDR (Time Domain Reflectometry)

Os métodos avançados de determinação do conteúdo de água do solo, por serem precisos oportunos e de fácil execução, contribuem decisivamente nos avanços em busca da otimização do manejo da água, seja em áreas secas ou irrigadas (COELHO et al. 2001); dentre estas técnicas, tem ganhado enorme interesse a Reflectometria no Domínio do Tempo (*Time Domain Reflectometry* - TDR).

Segundo Calderón (2010) a técnica do TDR é um método moderno utilizado para a determinação do teor de umidade do solo. Essa técnica foi empregada inicialmente pelas companhias telefônicas e de energia elétrica para testar possíveis falhas em suas linhas de transmissão (RAMO et al. 1994).

Na década de 70, foram então iniciadas pesquisas com intuito de se adaptar essa técnica para estudos em solos, buscando a determinação do teor de umidade que se correlaciona com a constante dielétrica do solo. A determinação do teor de umidade através da técnica TDR foi pioneiramente introduzida por Davis e Hudobiak (1975) e implementado e validado por Topp et al. (1980). Desde então, a aplicação da técnica TDR para esse fim tem sido bastante difundida e utilizada, principalmente na agronomia. Tais pesquisadores realizaram comparações entre valores de teor de umidade volumétrico, determinados através da técnica de TDR e da técnica que utiliza uma sonda de nêutrons, ao longo de um perfil de solo.

Benson et al. (1994) empregaram a técnica TDR para controlar a umidade de tapetes impermeabilizantes em aterros sanitários. Dowding e Huang (1994) aplicaram para monitorar as deformações em maciços rochosos e medir do nível do lençol freático (CALDERÓN 2010).

Um dos primeiros estudos utilizando a técnica TDR, especificamente para a medida do teor de umidade do solo no Brasil, foram os estudos de Herrmann Jr. (1993) e os de Tommaselli e Bacchi (1995). Posteriormente, Conciani et al. (1996) utilizaram a técnica para medir a umidade e estimar a sucção do solo durante provas de carga de fundações.

Segundo Bizari (2011) a técnica do TDR de modo geral é mais comumente utilizada em pesquisas, em virtude de sua facilidade de obtenção, aquisição e armazenamento de dados para a estimativa do teor de água no solo e condutividade elétrica.

Souza (2006) descreve que a técnica baseia-se na propagação de ondas eletromagnéticas através de hastes condutoras envoltas pelo solo. Este fenômeno se deve a diferença entre as constantes dielétricas (ϵ), da água, do ar e do solo. Na matriz do solo estas constantes variam entre 1 e 81 ϵ . O ar possui o valor mínimo igual a 1 ϵ , as partículas sólidas variam entre 3 e 5 ϵ , e a água, o valor máximo é de 81 ϵ (NOBORIO, 2001). A constante dielétrica medida no sistema ar-solo-água é denominada de constante dielétrica aparente (ϵ_a), assim, conhecendo-a pode-se determinar a umidade volumétrica do solo por meio de curvas de calibração obtidas a partir de dados de campo ou de laboratório (SOUZA e MATSURA, 2003).

A propagação de ondas eletromagnéticas é convertida para ϵ_a , por meio da equação 10 (HOOK e LIVINGSTON, 1995):

$$\varepsilon = \left(\frac{\Delta x}{V_p} \cdot L \right)^2 \quad (10)$$

Em que:

ε = Distância percorrida pela onda eletromagnética, m

V_p = Velocidade de propagação, 0,99 (99 % de c)

L = Comprimento da haste, m.

Conforme Santos et al. (2010) os baixos valores da constante dielétrica do ar ($K_{aa} = 1$) e da matriz sólida ($K_{as} = 3$), comparados ao da água ($K_{aw} = 80$), tornam o método pouco sensível à textura e estrutura do solo (OR e WRAITH, 1997).

Para o uso do TDR são necessárias calibrações para diferentes tipos de solo, a fim de que se obtenha o valor correto do conteúdo volumétrico de água. De acordo com Pereira et al. (2006), essa é a grande dificuldade para a utilização do método, pois atualmente não há um método de calibração considerado padrão. São diversos os métodos de calibração citados na literatura. Villwock et al. (2004) propõe um método de calibração em campo para um Latossolo Vermelho distroférico, enquanto Coelho et al. (2006) e Vaz et al. (2004) apresentam propostas de métodos e ajustes de equações de calibrações para diferentes tipos de solos em condições de laboratório com uso de amostras deformadas (SANTOS et al. 2010).

Os modelos de calibração da técnica do TDR podem ser de natureza empírica (Topp et al. 1980) ou física, que envolvem modelos dielétricos mistos (Tommaselli, 2001). Nesses, K_a é fragmentada em seus componentes da matriz do solo, da água e do ar. Dos modelos físicos disponíveis, destaca-se o de Roth et al. (1990). Os modelos de Topp et al. (1980) e Ledieu et al. (1986) têm sido muito utilizados, estando inseridos nos equipamentos de TDR dos fabricantes, porém são de caráter empírico e não levam em consideração os efeitos dos componentes da K_a e das propriedades físicas do solo, razão pela qual podem não ser os mais adequados.

Villwock (2004) afirma que a calibração é exigida especialmente quando se

trabalha com Latossolos, devido a algumas particularidades, como, por exemplo, os altos teores de Fe e argila e a expansibilidade do solo. Coelho et al. (2006) ressaltam que os modelos de calibração variam conforme o tipo de solo e que um modelo polinomial de terceiro grau pode ser calibrado com exatidão para cada situação de solo. Entretanto, a fixação dos coeficientes do modelo, como para o caso do modelo de Topp et al. (1980), pode não resultar em estimativas precisas do conteúdo volumétrico de água no solo. Silva e Gervásio (1999) encontraram uma subestimativa dos valores do conteúdo volumétrico de água para um Latossolo roxo textura argilosa com uso do modelo de Topp et al. (1980).

Cecílio et al. (2004) propõe um método que acondiciona amostras deformadas em recipientes, possibilitando a secagem mais acelerada do solo. No entanto, quando são coletadas amostras deformadas, os constituintes minerais do solo são conservados, mas sua estrutura natural é alterada pelo processo de extração.

De acordo com Santos et al. (2010) Com o uso de amostras não deformadas, a estrutura natural do solo é preservada fato interessante para a calibração do equipamento TDR, por se tratar de um método não destrutivo. As principais vantagens da técnica TDR são, permitir leituras contínuas em tempo real, ser de natureza não destrutiva, possuir grande exatidão de resultados, entre 1 e 2% de teor de umidade, fácil calibração, ressaltando que em muitos solos a calibração não é necessária, não oferecer riscos radioativos (OR et al. 2004), diferentemente do método da moderação de nêutrons, resolução espacial e temporal satisfatória, determinar uma média ponderada espacial do teor de umidade, cobrindo todo o comprimento da sonda, medidas de simples obtenção e possibilidade de coletá-las automaticamente.

Uma das grandes vantagens da técnica TDR é a possibilidade de automação do processo de leituras. Torre (1995), apud Conciani et al. (1996) desenvolveu um sistema para aquisição e transferência de dados (por rádio e/ou telefone) aplicados para esta técnica. Este sistema permitiu, por exemplo, monitorar a umidade de um campo agrícola situado a distância de aproximadamente 150 km da base onde os dados foram analisados.

Para reduzir erros atribuídos a variabilidade espacial no manejo da irrigação ou para acompanhar a frente de molhamento no perfil do solo é necessário uma expressiva quantidade de sondas de TDR, o que tem sido inviabilizado pelo elevado

custo de aquisição das mesmas, principalmente por serem acessórios importados (SOUZA et al. 2006). De acordo com a Figura 2.4 o medidor de umidade do solo Field Scout TM TDR modelo 300.



Figura 2.4 – TDR modelo 300
Fonte: Manual do Usuário (2011).

2.14.2 Tensiometria

Braga et al. (2010), cita que dentre os métodos indiretos temos o tensiômetro que é um aparelho que mede a tensão de água ou potencial matricial do solo, que pode ser convertido para teor de água no solo. Sendo assim, podemos, com o auxílio deste aparelho, determinar o teor de água atual no solo, na profundidade de interesse e, conseqüentemente, a quantidade de água armazenada no perfil do solo.

O tensiômetro, aparelho desenvolvido por Gardner em 1922, é empregado para medir a tensão com que a água está retida pelas partículas do solo, também conhecido por potencial matricial (SILVA et al. 1999).

De acordo com Coelho e Teixeira (2004) o princípio de funcionamento do tensiômetro baseia-se na formação do equilíbrio entre a solução do solo e a água contida no interior do aparelho. O equilíbrio ocorre quando a cápsula porosa entra em contato com o solo e a água do tensiômetro entra em contato com a água solução do solo. Caso a água do solo esteja sob tensão, ela exerce uma sucção sobre o instrumento, retirando água deste, fazendo com que a pressão interna

diminua. Como o instrumento é vedado, ocorre a formação do vácuo; a leitura dessa pressão negativa fornece o potencial matricial da água no solo.

Em razão de seu princípio de operação, as leituras dos tensiômetros são a expressão da energia necessária para a água ser liberada das superfícies das partículas do solo, onde se encontra retida. Considerando que o tensiômetro mede energia, o tipo de solo não determina diferenças apreciáveis. Assim, por exemplo, uma leitura de 40 centibares (cbar) em solos argilosos e arenosos significa que as plantas aí cultivadas estarão sujeitas à mesma energia de retenção de água. No entanto, como os solos argilosos retêm, naturalmente, mais água que os arenosos, para o mesmo nível de tensão, o tempo para esgotamento da água armazenada no solo argiloso será maior que no arenoso. E, finalmente, como as leituras do tensiômetro não dependem do tipo de solo, sua utilização é feita sem necessidade de calibração (AZEVEDO e SILVA, 1999).

Conforme Contin (2008) este equipamento só tem capacidade para leituras de tensão até 75 kPa. Se usado para tensões superiores a esta, o ar entra nos poros da cápsula de cerâmica e o tensiômetro pára de funcionar. Assim, ele estima somente uma parte da "água útil" do solo. Em solos arenosos, o tensiômetro estima cerca de 70% da "água útil", e em solos argilosos, cerca de 40%, podendo, conseqüentemente, gerar grandes erros, ocasionando um manejo incorreto da irrigação (BERNARDO et al. 2006).

Embora apresente algumas limitações (Bakker et al. 2007) como qualquer instrumento, o tensiômetro tem sido utilizado de modo satisfatório na determinação da energia com que a água está retida pela matriz do solo.

De acordo com Brito et al. (2009) uma das limitações é que ele funciona até cerca de -0,085 megapascal (MPa). Considerando que o intervalo do potencial mátrico agronomicamente importante varia de 0 a -1,5 MPa, o tensiômetro poderia ser considerado um instrumento por demais limitado. No entanto, para a atividade agrícola comercial, a faixa de interesse é de 0 a -0,1 MPa, na qual a densidade de fluxo da solução no solo é apreciável para a maioria dos solos cultivados.

Segundo os autores Azevedo e Silva (1999) os agricultores que utilizam corretamente os tensiômetros (Figura 2.5), têm obtido resultados satisfatórios. Dependendo da cultura, condições de clima e manejo, consegue-se reduzir de 25 a 40% as lâminas aplicadas comparando com manejos sem critérios.



Figura 2.5 – Tensiômetro
Fonte: Tracom (2013).

2.14.3 Sensores de umidade do solo Watermark

Estes sensores Watermark (Figura 2.6), foram inicialmente patenteados em 1985 e fabricados desde 1989 pela IRROMETER Company Inc. de Riverside, Califórnia (IRROMETER, 2003). Os sensores Watermark detectam a tensão de água no solo com base na resistência elétrica.

De acordo com o fabricante, o sensor Watermark consiste de dois eletrodos concêntricos, inseridos em uma matriz de material especial, a qual é envolta e mantida no lugar por um chapa de aço inoxidável. O material da matriz foi selecionado para refletir ao máximo a mudança da resistência elétrica dentro da faixa correspondente à do crescimento das culturas agrícolas. Quando em operação, esta matriz está, constantemente, absorvendo ou perdendo a umidade para o solo. À medida que o solo seca, a tensão do sensor é reduzida e a resistência elétrica entre os dois eletrodos aumenta.

Conforme Vielmo (2008), o sensor mede em um intervalo entre 0 e 200 centibars e possui vantagens de ser um sensor sólido, que não se deteriora em contato com o solo, não é afetado por baixas temperaturas, possui uma compensação interna para níveis de salinidade do solo e praticamente não

apresenta problemas de manutenção. A comunidade acadêmica de ciências do solo iniciou suas pesquisas neste sensor em meados de 1980, onde os resultados demonstraram ser este um sensor eficiente e prático para medida de tensiometria no meio agrícola e em áreas de paisagismo. A desvantagem deste sensor é o alto custo de aquisição, pois ainda não é fabricado no Brasil.

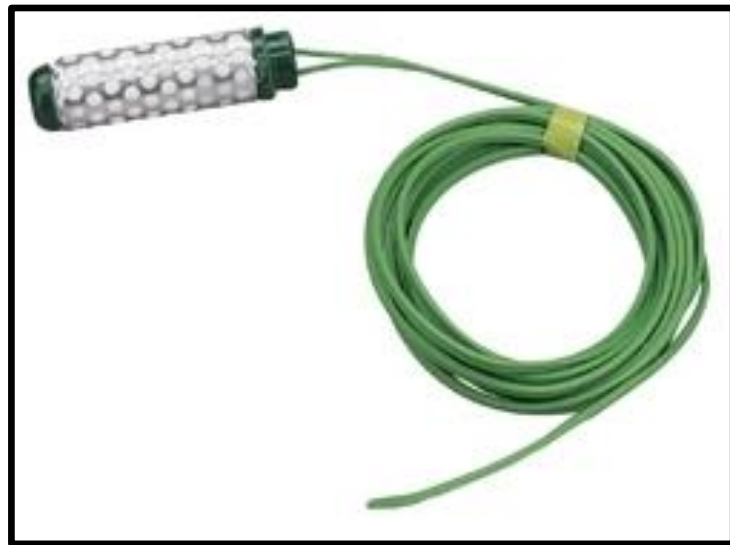


Figura 2.6 – Sensor Watermark
Fonte: Irrrometer (2009).

3 MATERIAL E MÉTODOS

Este capítulo se refere à descrição do experimento de campo, abordando diferentes metodologias para manejo de irrigação e elementos climáticos.

Também neste capítulo foi apresentada uma equação matemática que foi utilizada para se obter o potencial matricial do solo e conseqüentemente em lâmina bruta para manejo de irrigação.

3.1. Local

O trabalho foi desenvolvido na Fazenda Liberdade, 4º distrito Tupantuba, no município de Santiago na região central do Estado do Rio Grande do Sul. Localiza-se a uma latitude 29º05'50" sul e a uma longitude 54º51'32" oeste, estando a uma altitude de 439 metros. A classificação do solo utilizado para a pesquisa LATOSSOLO VERMELHO Distrófico Típico, unidade de mapeamento Cruz Alta com textura argilosa nos horizontes A e B (EMBRAPA 1999).

O trabalho foi conduzido em uma área experimental (Figura 3.1) sob um pivô central fixo, com 531,19 m de raio irrigado e um ângulo de irrigação de 360º, perfazendo uma área de 88,64 ha.

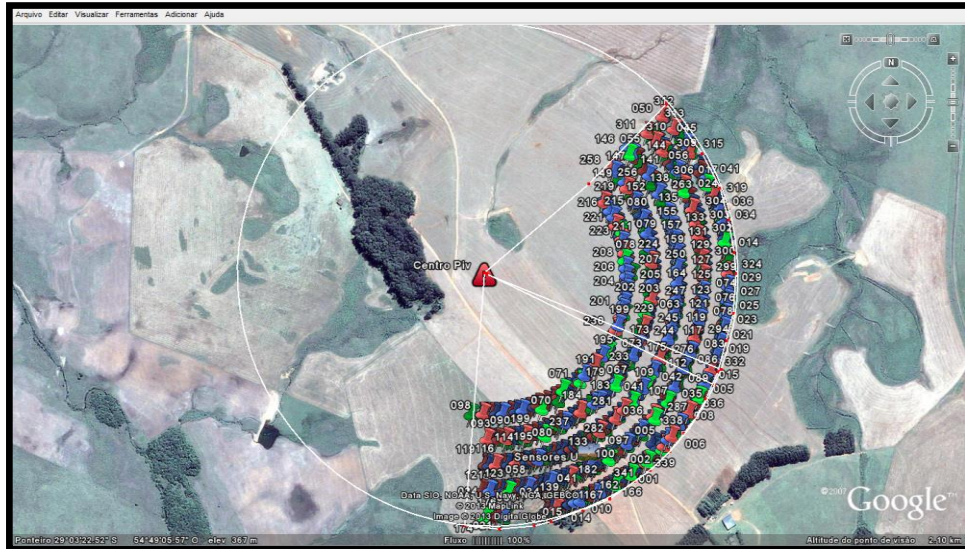


Figura 3.1 – Vista da Área Experimental. Santiago , RS.
Fonte: Google Earth (2013).

O experimento foi realizado no período de janeiro/2013 a maio/2013 correspondente ao período de safra da cultura da soja safrinha.

3.2 Setores da área experimental

A área de coleta de dados de umidade de solo totalizou 22 ha. Esta área foi subdividida em cinco setores (Setores 05, 06, 07, 08, e 09), conforme representado na (Figura 3.2), do centro do pivô para a extremidade externa, sendo que cada setor corresponde aos vãos entre torres, para melhor localização no momento da coleta de dados. O setor 05 corresponde ao 5º vão do pivô, o setor 06 corresponde ao 6º vão do pivô, o setor 07 corresponde ao 7º vão do pivô, o setor 08 corresponde ao 8º vão do pivô e o setor 09 corresponde ao 9º vão do pivô central.

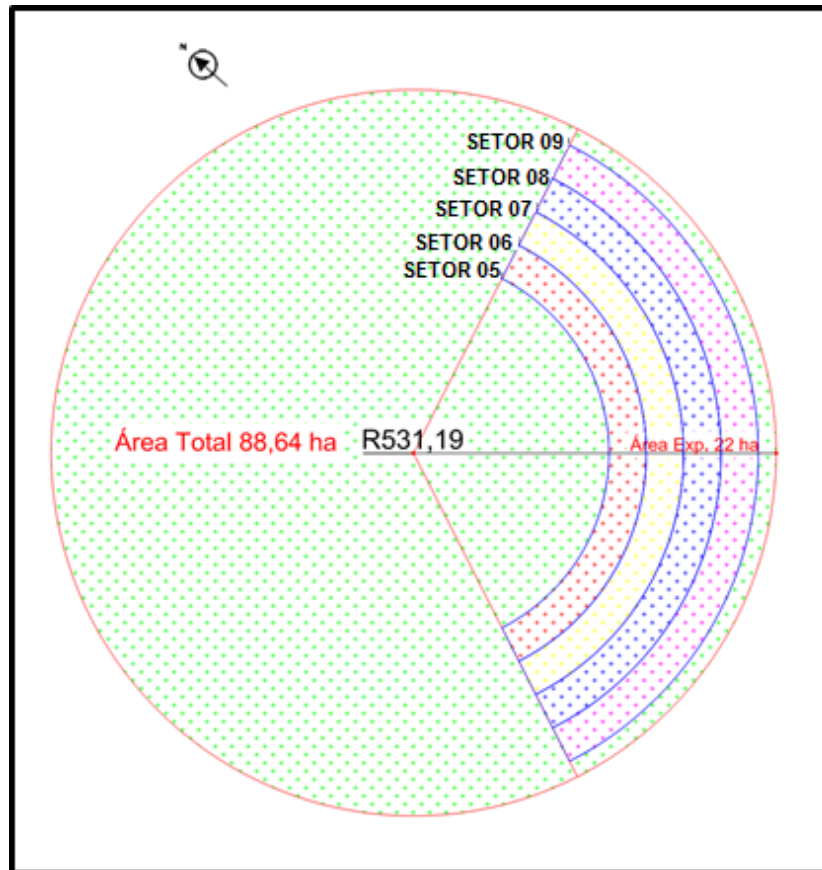


Figura 3.2 – Setores do Experimento

Para uma melhor identificação na (Figura 3.2), os setores foram hachurados com cores diferentes, e a distância média entre setores correspondia a 55 m.

3.3 Obtenção dos dados básicos do solo

3.3.1 Características físicas do solo

De acordo com a descrição de Parizi (2010), o solo da área experimental apresentava as características físicas descritas na (Tabela 01), sendo determinadas a partir da amostragem nas profundidades de 20 a 120 cm com intervalos de 20 cm e um número de três por profundidade, as quais foram encaminhadas ao Laboratório

de Física do Solo do Departamento de Solos da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM).

Tabela 01 - Características físicas do solo Latossolo Vermelho distrófico típico, unidade de mapeamento Cruz Alta – Valores médios para três repetições.

Prof. (cm)	Classe Textural	Densidade (g.cm ³)		Porosidade			
		Solo	Partícula				
0 - 20	Franco Argilo Arenoso	1,55	2,60	40,44			
20- 40	Franco Argiloso	1,39	2,60	46,49			
40 – 60	Franco Argiloso	1,34	2,63	48,96			
60 – 80	Franco Argiloso	1,35	2,62	48,35			
80 -100	Argila	1,33	2,63	49,55			
Média		1,39	2,62	46,76			
DP		0,09	0,02	3,71			
CV (%)		12,51	0,76	7,93			
Umidade Volumétrica (cm ³ . cm ³)							
Prof. (cm)	Sat.	Umidade Volumétrica (cm ³ . cm ³)					1500 (kPa)
		1 (kPa)	6 (kPa)	33 (kPa)	100 (kPa)	500 (kPa)	
0 - 20	0,42	0,39	0,34	0,29	0,28	0,19	0,16
20- 40	0,47	0,40	0,34	0,30	0,28	0,20	0,17
40 – 60	0,50	0,44	0,36	0,30	0,28	0,19	0,17
60 – 80	0,51	0,44	0,37	0,31	0,29	0,22	0,21
80 -100	0,51	0,45	0,39	0,34	0,32	0,23	0,21
Média	0,48	0,42	0,36	0,31	0,29	0,21	0,18
DP	0,04	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
CV (%)	8,33	7,14	5,55	6,45	6,90	9,52	11,11

Fonte: Parizi (2010).

A curva característica de retenção de água no solo da área experimental (Figura 3.3) foi estabelecida por Parizi (2010), e utilizada para estabelecer os parâmetros para estimativa da lâmina bruta de irrigação para os métodos de manejo via solo.

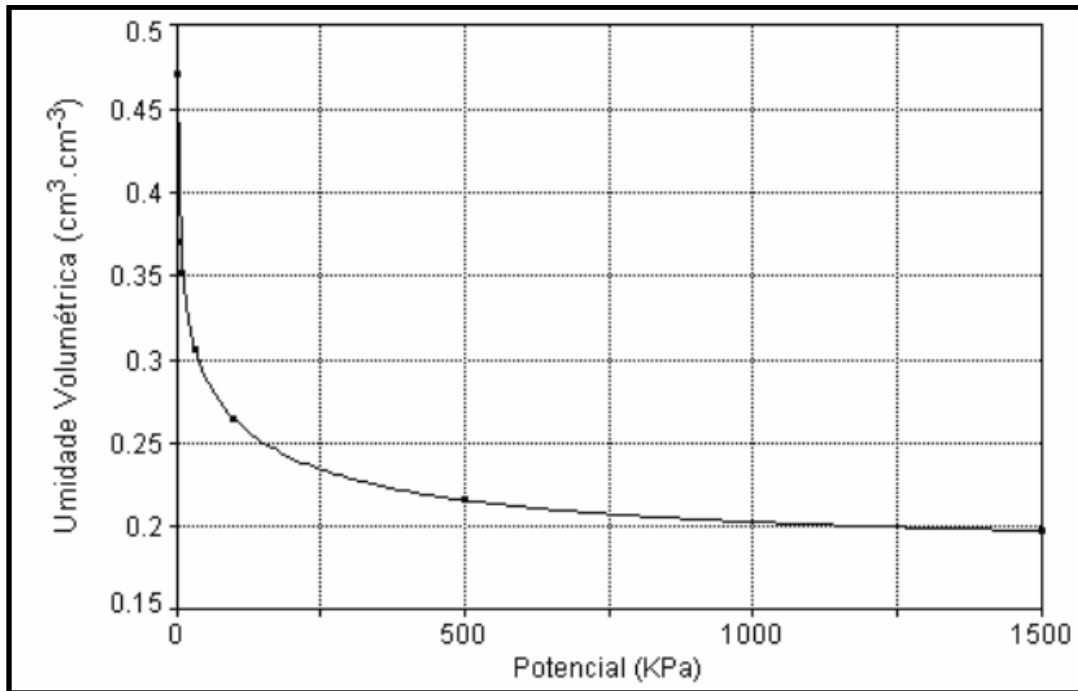


Figura 3.3 – Curva de retenção dos valores médios de umidade do solo para cinco camadas de solo. Adaptado de Parizi (2010).

Com os valores da umidade volumétrica contidos na curva de retenção de água do solo estimou-se o momento de irrigar.

3.4 Coleta de dados de umidade do solo

Neste item serão descritos os métodos utilizados para a coleta de dados de umidade do solo:

3.4.1 TDR “Time Domain Reflectometer”.

Foram coletados dados de umidade do solo pelo medidor de umidade do solo TDR 300 no período de 18 de março a 30 de abril do ano de 2013, com intervalos de aproximadamente 15 dias ou quando houve precipitação na área experimental.

Antes do início da realização das coletas de umidade do solo foi feita uma calibragem no aparelho TDR 300, obedecendo as recomendações de calibragem contidas no manual do aparelho.

À medida que se iniciaram as coletas, observou-se dificuldade de penetração das hastes nas profundidades maiores. Sendo assim, optou-se por espaçamentos diferenciados para os pontos de coleta. Os pontos na cor azul seguiam um espaçamento de 15 m e profundidade de coleta de 7,6 cm, os pontos na cor vermelha seguiam um espaçamento de 30 m e profundidade de coleta de 12 cm, e os pontos na cor verde seguiam um espaçamento de 45 m e profundidade de coleta de 20 cm (Figura 3.4).

Os pontos de coletas foram georreferenciados através de um receptor de sinais GPS da marca Garmin e modelo Etrex HCX Vista, com intuito de gerar mapas através do Google Earth (2013) assim, identificando os locais e perfis de coletas de umidade do solo.

Na Figura 3.4 são apresentados os pontos de coleta de umidade do solo na área experimental.

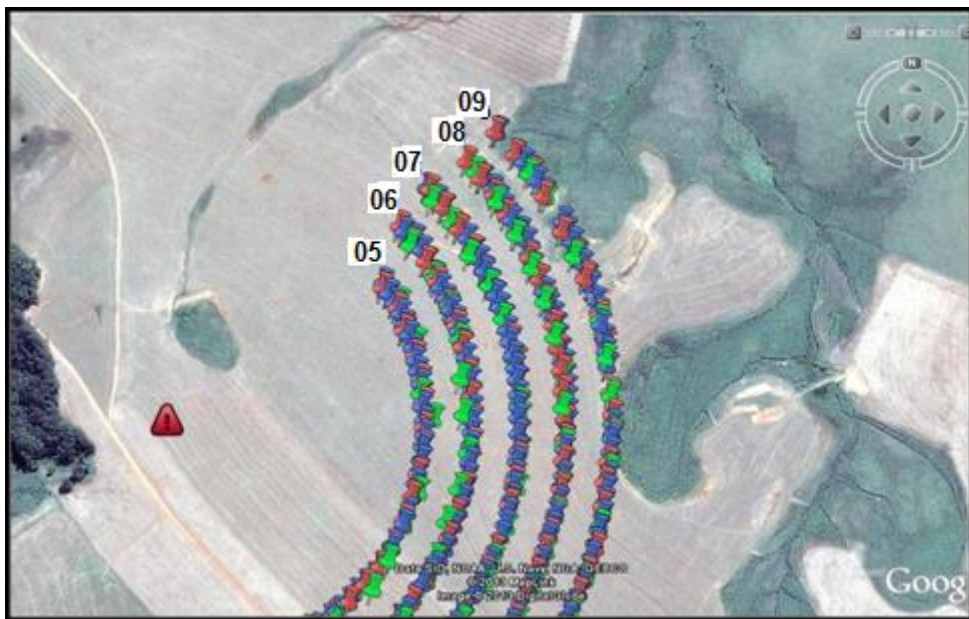


Figura 3.4 – Dados de umidade do solo georreferenciados.
Fonte: Google Earth (2013).

Após a coleta, armazenamento e processamento dos dados, foi obtida uma lâmina bruta média de todo o local do experimento. Como as hastes do TDR são de tamanho relativamente pequeno usava-se para comparativo de dados de umidade com outros métodos de manejo de irrigação que fazem parte do trabalho proposto às hastes maiores no tamanho de 20 cm por estas serem as que mais se aproximavam das medidas da profundidade efetiva da raiz da cultivar do experimento.

Optou-se como parâmetro de comparação este método devido ao seu alto grau de confiabilidade nos resultados já comprovados em estudos por diversos autores, Trintinalha et al. 2001, Garzella 2004, Lacerda 2005, e por ser o método que possuía maior repetição de coleta de dados na área experimental.

Na Figura 3.5 é apresentada à imagem do TDR juntamente com o aparelho receptor GPS.



Figura 3.5 – TDR e GPS.
Fonte: Nunes (2013).

Para a obtenção da lâmina bruta média da área experimental foi preciso obter primeiramente a lâmina líquida. Estas duas lâminas foram obtidas pelas seguintes equações.

$$LL = 10 \times (CC - MI) \times Pc \dots\dots\dots(11)$$

Em que:

LL = Lâmina Líquida;

CC = Capacidade de campo;

MI = momento de irrigar;

Pc = Profundidade de coleta.

$$LB = LL/Ei \dots\dots\dots(12)$$

Em que:

LB = Lâmina bruta;

LL = Lâmina líquida;

Ei = Eficiência do sistema de irrigação.

Os dados de capacidade de campo e o momento de irrigar contidos na equação 11 foram obtidos através dos resultados da figura 3.3. Os dados contendo os testes de uniformidade de aplicação do sistema pivô central, foram fornecidos pelo fabricante do sistema. Estes dados foram obtidos através de testes de uniformidade logo após implantação do sistema de irrigação.

3.4.2 Sensores de umidade do solo Watermark

A segunda técnica utilizada para determinação de umidade foi através de sensores de umidade do solo Watermark. Estes sensores foram instalados próximos do centro do experimento e em diferentes perfis, que correspondiam em 10, 20, 30 e

40 cm. A data de início e término de coleta dos dados coincide com as datas do método do TDR.

Os dados referentes à umidade do solo foram coletados via WiFi, com intervalos de quinze minutos ao decorrer do dia e armazenados em uma estação meteorológica automática marca Davis Vantage Pro 2. Após armazenamento gerou-se um arquivo contendo os dados, assim convertendo os resultados para porcentagem de umidade e, posteriormente, de posse desses valores calculou-se, por este método, a lâmina bruta para irrigação do experimento. A lâmina bruta para irrigação foi calculada pela seguinte equação proposta.

$$\Psi_m = (4 \times \Psi_{10} + 3 \times \Psi_{20} + 2 \times \Psi_{30} + 1 \times \Psi_{40})/10 \quad (13)$$

Onde:

Ψ_{10} – potencial de água no solo (bar) no perfil de 10 cm;

Ψ_{20} – potencial de água no solo (bar) no perfil de 20 cm;

Ψ_{30} – potencial de água no solo (bar) no perfil de 30 cm;

Ψ_{40} – potencial de água no solo (bar) no perfil de 40 cm.

O potencial total da água no solo pode ser obtido através do cálculo da diferença entre o estado da água no solo e um estado padrão em um determinado ponto. O conhecimento das diferenças do potencial da água no solo permite determinar sua tendência de movimento (REICHARDT e TIMM, 2004).

A Equação 11 trabalha com o componente matricial (ψ_m), que é a forma mais comum de se estabelecer a dinâmica da água no solo. Essa dinâmica está relacionada ao conceito de potencial matricial (REICHARDT 1985).

Segundo Reichardt (1985), é o resultado de forças capilares e de adsorção que surgem devido à interação entre a água e as partículas sólidas, isto é, a matriz do solo. Essas forças atraem e fixam a água no solo, diminuindo sua energia

potencial com relação à água livre. São fenômenos capilares que resultam da tensão superficial da água e de seu ângulo de contato com as partículas sólidas.

Para um solo saturado, o potencial matricial é zero e a adsorção também é nula. Com a saída de água, o solo vai se tornando não saturado e o ar ocupa os espaços deixados inicialmente nos poros maiores e em seguida, nos poros menores, assim o potencial matricial torna-se cada vez mais negativo. Portanto, quanto menor o teor de água, mais negativo será o potencial matricial (REICHARDT, 1990).

Na Figura 3.6 é apresentada imagem da antena para envio dos dados via WiFi para a estação meteorológica automática, juntamente com os sensores Watermark de umidade fixados ao solo.



Figura 3.6 – Antena WiFi e sensores watermark.

A fonte de energia para o funcionamento do conjunto (antena e sensores) era solar, assim ficando ausente o uso de baterias para geração de energia.

3.4.3 Método do forno elétrico

Como no local do experimento não se possuía uma estufa para fazer as determinações gravimétricas de umidade do solo, optou-se pelo método do forno elétrico, por ser um método confiável, preciso e muito semelhante ao padrão estufa.

As coletas de dados de umidade do solo desse método correspondem aos mesmos perfis dos sensores watermark e próximo ao local dos referidos, as datas de coletas coincidem com as datas já mencionadas pelos outros métodos.

Para a coleta das amostras utilizou-se um trado, procurou-se retirar as amostras sempre no mesmo horário 15h30min, após a retirada das amostras de solo, as mesmas eram embaladas em recipientes plásticos e identificadas. Seguindo o procedimento padrão para o método as amostras foram destorroadas e colocadas aproximadamente 100g em bandejas identificadas, levadas ao forno a uma temperatura de 105°C a um período de 30 minutos ou até atingir peso constante.

Após atingir o peso constante das amostras calculou-se sua porcentagem de umidade e, posteriormente sua lâmina líquida e bruta para irrigação.

Usou-se para cálculo das lâminas líquidas e brutas as equações 11 e 12.

3.5 Coleta de dados de umidade via demanda evaporativa

Neste item será visto o primeiro método utilizado para a coleta de dados via demanda evaporativa:

3.5.1 Método do tanque classe A

A técnica do tanque classe A foi usada para estimar a evaporação diária do local do experimento. O tanque foi instalado conforme recomendações citadas anteriormente sua localização da área experimental era de aproximadamente 250 m do local.

Foram retiradas duas leituras uma no início da manhã e outra no final da tarde, sempre procurando coincidir os horários das leituras anteriores, durante todo o ciclo vegetativo da cultura. De posse dessas leituras de evaporação diária, velocidade do vento predominante do local, do coeficiente da cultura (K_c) e, do coeficiente do tanque (K_p) estimou-se a evapotranspiração (equação 01) e a evapotranspiração da cultura (ET_c) para manejo de irrigação.

O K_c foi determinado conforme recomendações de Doorenbos e Pruitt, 1977, e a lâmina líquida ou ET_c foram determinadas pela a equação 14.

$$ET_c = ET_o \times K_c \quad (14)$$

Onde:

ET_c – Evapotranspiração da cultura (mm), equivalente a lâmina líquida;

ET_o – Evapotranspiração de referência (mm);

K_c – Coeficiente da cultura.

Para os resultados de lâmina bruta, estes foram obtidos pela equação 12.

3.5.2 Irrigâmetro

Foi utilizado um irrigâmetro adquirido pelo laboratório de Engenharia de Irrigação, pertencente ao Departamento de Ciências Agrárias, Programa de pós-graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Santa Maria.

O aparelho foi configurado para o sistema de irrigação e local do experimento. Esta configuração se deu de acordo com dados fornecidos para o fabricante no ato do pedido do equipamento, como o sistema de irrigação implantado e dados físicos do solo.

O aparelho depois de testado e aferido pelo fabricante este foi utilizado para as leituras diárias de lâmina bruta para manejo de irrigação.

Estas leituras de lâmina bruta observavam-se diretamente no aparelho, assim ficando completamente ausente o uso de cálculos. As leituras da demanda evaporativa fornecidas pelo aparelho foram feitas em régua de manejo. Estas régua fazem parte do aparelho, possuíam as cores azul, verde, amarelo e vermelho. Onde o azul indicava a não necessidade da irrigação e, a partir da cor amarelo o início do manejo de irrigação. Outros componentes importantes que o aparelho possui são o tubo de alimentação indicando a lâmina bruta a ser aplicada e a régua percentual indicando a velocidade do pivô, ou seja, como o aparelho já está calibrado de acordo com o sistema de irrigação e local do experimento, este já fornece a evapotranspiração da cultura através da régua de manejo que contem quatro cores, do tubo de alimentação e também a velocidade de deslocamento do sistema pela régua percentual.

Na Figura 3.7 o irrigômetro indicando o momento de irrigar (nível da água no tubo de alimentação na direção da faixa amarela da régua de manejo), a lâmina evapotranspirada (13,4 mm) e a velocidade de deslocamento (56%) do pivô central.

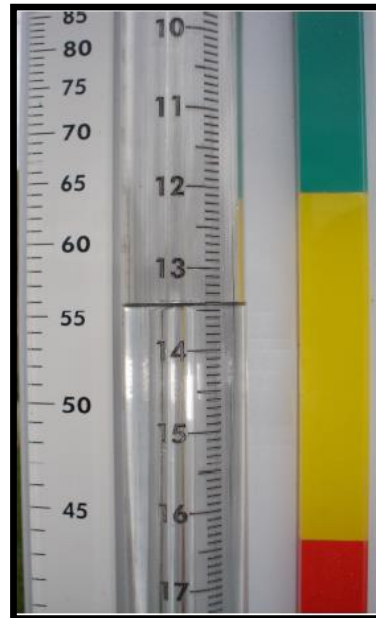


Figura 3.7 – Funcionamento do Irrigômetro.
Fonte: Nunes (2011).

O aparelho foi instalado aproximadamente 250 m da área experimental, o início e término das leituras da lâmina evapotranspirada coincidem com os métodos anteriores.

3.5.3 Método de Hargreaves & Samani

De posse dos dados meteorológicos fornecidos pela estação meteorológica automática como temperatura máxima, temperatura mínima, dias percorridos do mês e irradiação solar, foi possível determinar a evapotranspiração da cultura pela equação 2, e posteriormente sua lâmina bruta pela equação 12.

3.5.4 Método de Thornthwaite

Conforme dados fornecidos pela estação meteorológica automática instalada como temperatura média e dados de temperatura média anual, fotoperíodo estimou-se a evapotranspiração da cultura pela equação 3, e sua lâmina bruta pela equação 12.

3.5.5 Método Camargo – 71

De posse dos dados de temperatura média e irradiação solar foi possível estimar a evapotranspiração da cultura pela equação 4 e posteriormente sua lâmina bruta pela equação 12.

3.5.6 Método de Penman – Montheith

Com os dados fornecidos pela estação meteorológica automática como radiação solar, temperatura e velocidade do vento, foi possível estimar a evapotranspiração da cultura pela equação 5 e sua lâmina bruta pela equação 12.

3.6 Manejo de irrigação

O manejo de irrigação foi baseado nas leituras dos sensores de solo Watermak. E de posse da equação 13 se obteve a lâmina bruta, a porcentagem de funcionamento do sistema, o tempo de funcionamento e ainda o número de voltas do sistema de irrigação, conforme ilustra a Figura 3.8.

		FAZENDA LIBERDADE – MANEJO DA IRRIGAÇÃO													
		$\Psi_m = (4 \times \psi_{10} + 3 \times \psi_{20} + 2 \times \psi_{30} + 1 \times \psi_{40}) / 10$													
		Ψ_m Vs LB													
		1 Volta		2 Volta		3 Volta		4 Volta		5 Volta		6 Volta		7 Volta	
P (%)	T (h)	Ψ_m	LB	Ψ_m	LB	Ψ_m	LB	Ψ_m	LB	Ψ_m	LB	Ψ_m	LB	Ψ_m	LB
100.0	12.83	16.7	5.13	21.1	10.26	26.7	15.39	34.2	20.52	44.0	25.65	57.2	30.78	75.0	35.91
97.5	13.16	16.8	5.26	21.3	10.52	27.2	15.78	35.1	21.05	45.5	26.31	59.6	31.57	78.8	36.83
95.0	13.51	16.9	5.40	21.6	10.80	27.8	16.20	36.0	21.60	47.1	27.00	62.2	32.40	83.1	37.80
92.5	13.87	17.0	5.55	21.9	11.09	28.4	16.64	37.1	22.18	48.9	27.73	65.2	33.28	87.9	38.82
90.0	14.26	17.1	5.70	22.2	11.40	29.0	17.10	38.2	22.80	50.8	28.50	68.4	34.20	93.3	39.90
87.5	14.67	17.3	5.86	22.5	11.73	29.7	17.59	39.4	23.45	53.0	29.31	72.1	35.18	99.5	41.04
85.0	15.10	17.4	6.04	22.9	12.07	30.4	18.11	40.8	24.14	55.4	30.18	76.2	36.21	106.5	42.25
82.5	15.56	17.6	6.22	23.3	12.44	31.2	18.65	42.3	24.87	58.1	31.09	80.9	37.31	114.5	43.53
80.0	16.04	17.7	6.41	23.7	12.83	32.1	19.24	44.0	25.65	61.1	32.06	86.3	38.48	123.9	44.89
77.5	16.56	17.9	6.62	24.2	13.24	33.1	19.86	45.9	26.48	64.5	33.10	92.4	39.72	134.8	46.34
75.0	17.11	18.0	6.84	24.7	13.68	34.2	20.52	48.0	27.36	68.4	34.20	99.5	41.04	147.7	47.88
72.5	17.70	18.2	7.08	25.2	14.15	35.4	21.23	50.3	28.30	72.9	35.38	107.7	42.46	163.0	49.53
70.0	18.33	18.4	7.33	25.8	14.66	36.7	21.99	53.0	29.31	78.0	36.64	117.5	43.97	181.5	51.30
67.5	19.01	18.7	7.60	26.5	15.20	38.2	22.80	56.1	30.40	84.0	38.00	129.1	45.60	204.1	53.20
65.0	19.74	18.9	7.89	27.2	15.78	39.9	23.68	59.6	31.57	91.1	39.46	143.1	47.35	232.1	55.25
62.5	20.53	19.2	8.21	28.1	16.42	41.8	24.62	63.7	32.83	99.5	41.04	160.2	49.25	267.5	57.46
60.0	21.39	19.5	8.55	29.0	17.10	44.0	25.65	68.4	34.20	109.6	42.75	181.5	51.30	313.0	59.85

Figura 3.8 – Manejo da Irrigação.

Quanto ao método de manejo de irrigação proposto, este foi concebido da seguinte forma: de posse dos dados diários do potencial matricial de água no solo, fornecidos pelos sensores Watermark, do tempo de deslocamento do sistema de irrigação para dar uma volta completa à 100% da relé percentual e sua respectiva lâmina bruta com este deslocamento, dados estes contidos no projeto do sistema de irrigação, foi possível calcular a lâmina bruta para manejo.

Os valores da equação 13 resultaram em um potencial matricial envolvendo quatro perfis do solo, este resultado obtido equivale a uma lâmina bruta para manejo de irrigação, ainda visando facilitar o manejo havia a possibilidade de dar uma ou mais voltas no sistema de irrigação do tipo pivô central dados estes contidos na Figura 3.8.

3.7 Coleta de dados do clima

Os dados relativos às condições climáticas foram obtidos através de uma estação climatológica automática marca Davis Vantage Pro 2, localizada 250 m da área experimental aproximadamente. Os elementos agrometeorológicos determinados diariamente durante o período experimental foram à precipitação pluvial (mm), temperatura ($^{\circ}\text{C}$), umidade relativa do ar (%), radiação solar (w.m^{-2}), velocidade do vento (m.s^{-1}) e umidade do solo (Bar).

3.8 Cultivar de Soja Munasqa

Utilizou-se a cultivar, Munasqa, sendo que possui boa adaptação para os estados do Rio Grande do Sul, Paraná e Santa Catarina. Suas características são de grãos amarelados, ciclo tardio, de porte médio/alto, bom empalhamento, população de plantas/ha de 250.000 a 270.000 e seu principal uso é para grãos.

Tabela 02 - Descrição de alguns componentes seguidos das características da cultivar Munasqa.

Descrição	Característica
Hábito de crescimento	Determinado
Dias floração	51
Dias maturação	141
Cor da pubescência	Branca
Cor da flor	Branca
Potencial de rendimento	Muito Alto
Altura de planta (cm)	87
Tipo de planta	Média Alta
Peso de mil sementes (g)	180
Plantas. m ²	28
Acamamento	Resistente

Fonte: Igra Sementes (2010)

3.9 Semeadura

A semeadura foi realizada no dia 14 de janeiro de 2013 em sistema de plantio direto, sobre palhada de milho, tendo sua emergência no dia 19 de janeiro de 2013. Foi semeado em torno de 18 sementes por metro linear com espaçamento entre linhas de 0,33 m entre linhas.

Junto com a semeadura de toda a área de lavoura, que totaliza 88,64 ha, foi realizada a adubação química em linha na formulação N – P - K de 2 – 23 - 23, na proporção de 270 Kg/ha de adubo juntamente com 180 Kg/ha de cloreto de potássio. A adubação foi feita uniformemente em toda a área de lavoura.

3.10 Controle fitossanitário

Ao longo do período vegetativo da cultura, verificou-se a presença de varias pragas como a lagarta da soja (*Anticarsia gemmatilis*), lagarta falsa medideira (*Pseudoplusia includens*), lagarta da vagem ou lagarta da maçã (*Heliothis virescens*), acaro branco (*Polyphagotarsonemus latus*), acaro vermelho (*Tetranychus*

ludeni), acaro rajado (*tetranychus urticae*), percevejo verde (*Nezara viridula*) e percevejo marrom (*Euschistus heros*).

Em termos de doenças principalmente foliares, foi identificada a presença de oídio (*Eryshiphe diffusa*) e, ferrugem asiática (*Phakopsora pachyrhizi*). Quanto às plantas daninhas invasoras foi identificada a presença em pequenas proporções da planta daninha chamada de buva (*Conyza bonarienses* e *Conyza canadensis*).

O controle de plantas daninhas, insetos e fungos foram efetuados sempre que necessário.

3.11 Georreferenciamento da área experimental

Os setores da área experimental foram georreferenciados ao Datum Sirgas 2000 na projeção UTM, e visualizadas com o auxílio de imagens de satélites obtidas no Google Earth e visualizados através do *software* ArcGis 9.3 desenvolvido pela ESRI® ainda este *software* foi utilizado para visualizar os dados de umidade do solo, permitindo a identificação dos setores de maior e menor incidência de umidade. Foi gerado por interpolação pelo método ponderado da distância um mapa de umidade indicando setores de baixo, médio e alto valor de umidade.

Os pontos de coleta foram georreferenciados através do aparelho de posicionamento Garmin Etrex HCX Vista, a fim de que os resultados de cada um dos parâmetros coletados sejam associados à localização dentro de cada setor correspondente em todo o experimento.

3.12 Análise estatística

Após a obtenção dos dados foi realizada a análise estatística. Para a interpretação dos resultados foi utilizado o *software* ASSISTAT versão 7.7 beta, realizou-se a análise da variância (ANOVA) ao nível de 5% de probabilidade de erro para interpretação do nível de significância.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O conhecimento de quando e quanto irrigar na atividade irrigada, atualmente, tornou-se fator decisivo na viabilização e sucesso da irrigação. Um manejo de irrigação adotado tanto via solo quanto via demanda evaporativa visando essas tomadas de decisões é extremamente fundamental para o sucesso do irrigante, assuntos este discutidos neste capítulo.

4.1 Precipitação pluvial

De acordo com os dados pluviométricos coletados ao longo das determinações de lâmina bruta, período este coincidindo com o ciclo de desenvolvimento da cultura implantada no local do experimento, identificou-se irregularidade na ocorrência das precipitações chegando a atingir valores de 178,3 mm na segunda quinzena do mês de março, mês ao qual se teve o maior acúmulo de precipitações. Já para os meses anteriores estes dados pluviométricos se encontram ao oposto chegando a valores máximos de precipitações de 68,2 mm para a segunda quinzena do mês de fevereiro.

Conforme INMET (2013), a região em estudo teve precipitações irregulares durante os meses de janeiro, fevereiro, março, abril e maio.

4.2 Irrigações e/ou precipitações VS umidade volumétrica do solo

Na Figura 4.1 encontram-se as irrigações e/ou precipitações juntamente com a umidade volumétrica (%) durante todo o ciclo da cultura, (105 DAE).

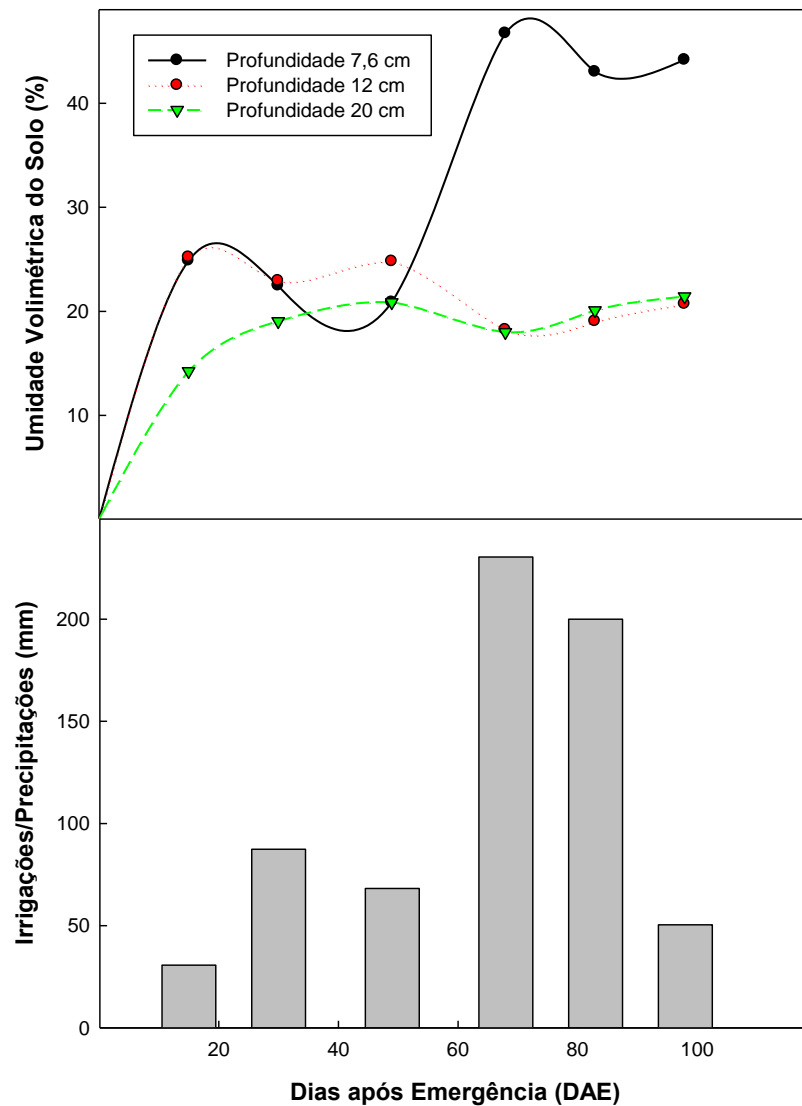


Figura 4.1 – Irrigações e/ou precipitações VS umidade volumétrica do solo.

De acordo com a Figura 4.1 observa-se que a camada superficial (7,6 cm) tende a comportar-se de acordo com as precipitações e/ou irrigações ocorrendo picos nos períodos onde a precipitação foi mais acentuada. Já as camadas mais profundas 12 cm e 20 cm mantiveram certa uniformidade no mesmo período.

Para o período de 70 DAE onde ocorreram os valores máximos de precipitações e ou irrigações, houve em torno de 179 mm de precipitação e em torno de 50 mm de irrigação, totalizando 229 mm neste período. Fato este ocorrido devido a irregularidade das precipitações no período.

As determinações de umidade volumétrica foram determinadas pelo aparelho TDR 300, logo após a ocorrência das precipitações ou irrigações, ou seja, as determinações ocorreram nos mesmos períodos das precipitações ou irrigações.

Dados semelhantes foram encontrados por Rodrigues et al (2011), em que as camadas mais superficiais ficam mais secas que as demais nos períodos secos e no período chuvoso ficam mais úmidas, devido ao deslocamento de água no sentido vertical do perfil do solo.

Conforme dados encontrados por Zanette et al (2007), trabalhando com variabilidade espacial da umidade do solo cultivado com soja, na camada superficial de 15 cm, o sistema plantio direto apresenta maiores amplitudes da umidade em relação a perfis mais profundos, e que, os valores de umidade estão relacionados à profundidade, mas as variabilidades não acompanham esta tendência.

Outro fator importante que deve ser levado em consideração é a qualidade física do solo é diminuída quando ocorre à compactação por causa da pressão exercida por forças externas, principalmente o tráfego de máquinas e equipamentos. Isso resulta no decréscimo do volume total de poros destacadamente os de maior diâmetro, responsáveis pela infiltração e drenagem da água, aeração e, aumento da coesão do solo e da resistência à penetração das raízes das plantas, diminuindo seu desenvolvimento e produtividade (BEUTLER, 2008).

4.3 Umidade do solo para diferentes profundidades

Apresenta-se, na Tabela 12, a umidade volumétrica média do solo obtida pelo método do TDR, a qual teve amplitudes máximas de 38,43 % no setor 05 correspondente a profundidade de 7,6 cm, e mínimas de 18,6 % na profundidade de 12 cm correspondente ao setor 07. Observa-se maior amplitude de umidade ocorreu na profundidade de 7,6 cm em relação aos demais. A análise estatística aplicada na tabela 12 corresponde à análise da variância, em nível de probabilidade de erro a 5% pelo teste de Tukey. Os dados analisados estatisticamente foram diferentes profundidades versus setores. O coeficiente de variação apresentou variabilidade aproximadamente constante em todas as amostragens, inferior a 0,55%.

Tabela 03 – Valores médios de umidade volumétrica (%) em diferentes profundidades do solo e, em diferentes setores.

Setores	Profundidade de medida (cm)		
	7,6	12	20
	Média θ (%)	Média θ (%)	Média θ (%)
05	38,43a	20,49 ns	19,21ns
06	37,68a	19,78	19,92
07	37,02a	18,6	19,29
08	37,27a	19,27	20,12
09	38,32a	19,92	20,65
DP	0,62	0,71	0,58
C.V.	0,38	0,40	0,33

*Médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferenciam pelo teste de Tuckey, em nível de 5% de probabilidade de erro. ns = não significativo.

DP = desvio padrão.

C.V. = coeficiente de variação.

Média θ (%) = % de umidade volumétrica média no perfil.

Verifica-se, a partir da análise de variância que não houve diferença significativa entre os setores, para as diferentes profundidades de solo. Este resultado significa que houve muito pouco ou nenhuma dispersão dos valores observados. Apêndice I.

Verifica-se ainda que, quando se comparam as profundidades, o coeficiente de variação apresenta maiores valores na profundidade de 12 cm.

Guimarães (1993), no estudo da variabilidade espacial da umidade do solo através da sonda de nêutrons em um Latossolo Roxo na região de Campinas, São Paulo, verificou baixos coeficientes de variação para esse atributo nas profundidades de 30 e 60 cm.

Conforme dados encontrados por Júnior et al. (2011), quando pesquisando a umidade volumétrica com o uso do TDR para o perfil de 20 cm encontrou valores de umidade volumétrica em torno de 22 % dados estes se assemelham com os resultados da tabela 3 com valores de umidade volumétrica próximos a 20 %.

Quando analisado a umidade nas diferentes profundidades, os setores não diferiram estatisticamente entre si. Os dados da umidade volumétrica do solo foram superiores na profundidade de 7,6 cm, em todos os setores, a umidade a base de

volume esta sensivelmente mais acentuada devido ao manejo do solo utilizado ser o plantio direto, no qual a palha torna-se uma estratégia eficiente para a manutenção da umidade do solo (COSTA et al. 2003).

Vieira e Muzilli (1984) concluíram que a diferença entre o plantio direto e outros sistemas de preparo reside no fato de que a superfície do solo neste sistema é protegida por camada de cobertura morta não revolvida, apresenta estrutura rígida, mais resistente à deformação que a camada superficial em sistema de preparo com revolvimento; além disso, o solo no plantio direto permanece, após uma chuva, com graus mais elevados de umidade por maior período de tempo.

Sidiras et al. (1984) observaram umidade volumétrica semelhante entre os preparos de solo na profundidade de 30 cm, com leve acentuação para o plantio convencional, além de uma retenção maior de água, na camada superficial para o plantio direto.

Teixeira et al. (2005) trabalhando com desempenho de TDR na determinação da umidade do solo em perfis mais profundos (70 cm), encontrou resultados de $0,47 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Já Garzella (2004), objetivando avaliar a campo o desempenho de um TDR para determinação de umidade volumétrica do solo, encontrou valores de até $0,34 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ nas primeiras avaliações para camadas mais superficiais.

Na Figura 4.2 constam os resultados da Tabela 3 em forma de gráfico identificando o comportamento da variação da porcentagem de umidade volumétrica nas diferentes profundidades.

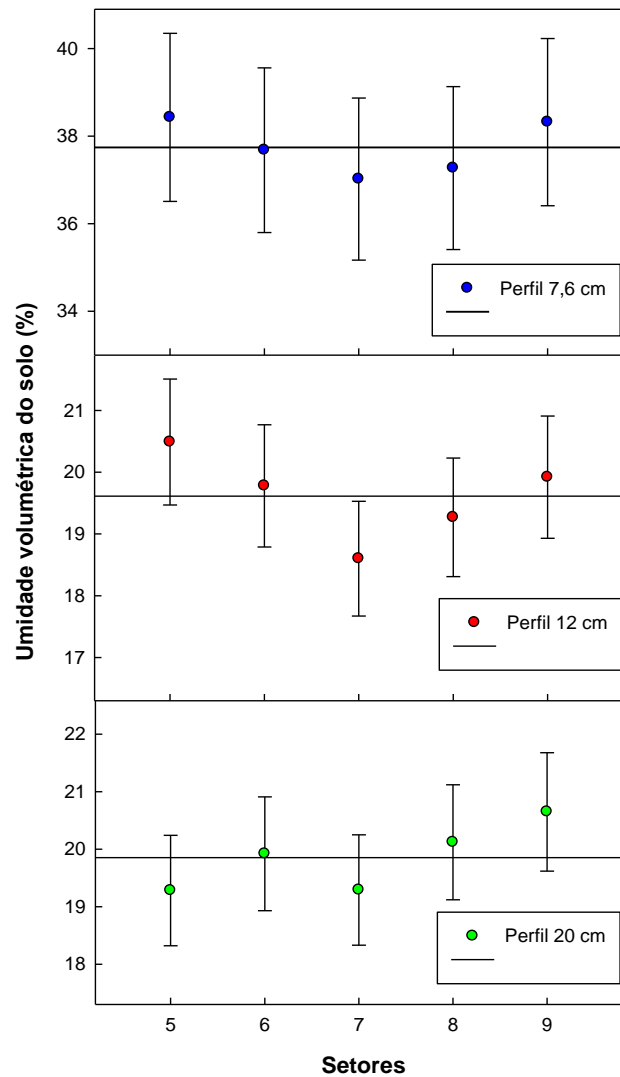


Figura 4.2 – Variação da umidade do solo em diferentes profundidades (perfis do solo).

Fica evidenciado na Figura 4.2 a pouca variação ou nenhuma da umidade volumétrica do solo para diferentes profundidades.

De acordo com a Figura 4.3 os resultados experimentais da variação da umidade volumétrica (%) do solo para a profundidade de 20 cm nos diferentes setores do experimento.

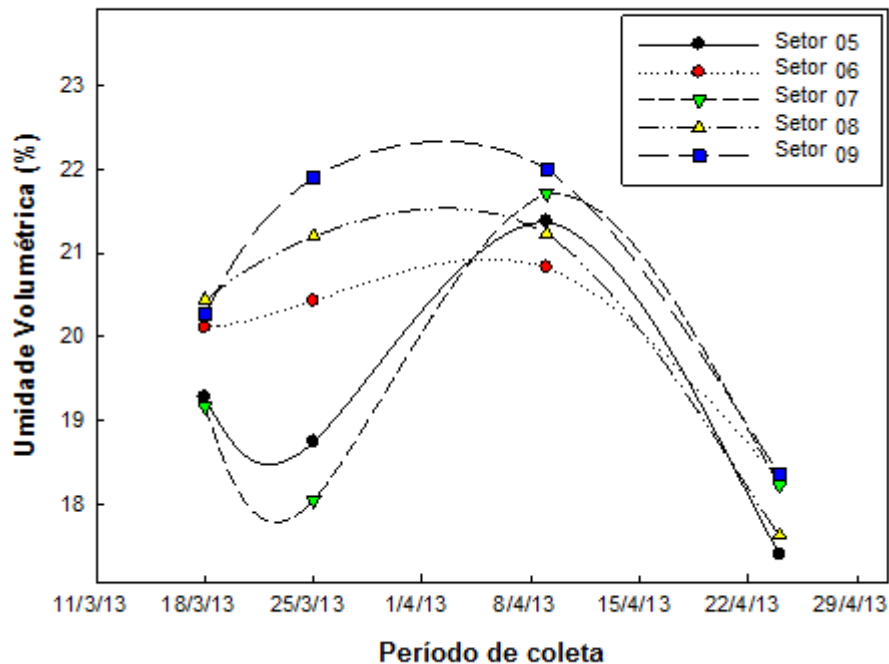


Figura 4.3 – Umidade volumétrica do solo para a profundidade (perfil) de 20 cm.

Conforme os resultados na Figura 4.3 podem observar que os setores 06, 08 e 09 mantiveram o mesmo comportamento em relação aos resultados, durante todo o período de coleta de dados. Já para os setores 05 e 07 nos períodos iniciais de coletas, seus resultados de umidade volumétrica foram inferiores aos demais setores, porém, os resultados no período de 09/04/13 a 24/04/13 se instabilizaram com o comportamento da umidade volumétrica dos demais setores.

Garzella et al. (2004), avaliando em campo resultados de umidade do solo de um TDR encontrou variabilidade nos resultados obtidos pelo TDR, entre 28,3 a 37,7% em uma mesma área. Estes resultados se assemelham com os encontrados na Figura 4.3.

Topp e Davis (1985) obtiveram desvios de até $0,02 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ entre os valores de umidade medidos em um mesmo local, com o uso do TDR e com o método gravimétrico. Ao comparar valores obtidos em diferentes locais, o desvio foi de até $0,06 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$, evidenciando o efeito da variabilidade do solo sobre a qualidade da informação fornecida pelo TDR.

Coelho et al. (2001), trabalhando com amostras deformadas e não

deformadas em dois solos de classe textural franco-arenoso-argiloso e argilo arenoso, concluíram que a constante dielétrica do solo não foi alterada pelas variações tanto do tipo de solo (textura) como de sua estrutura (deformada e não deformada).

4.3.1 Comportamento da variabilidade espacial da umidade volumétrica para a profundidade de 20 cm.

Na Figura 4.4 pode-se identificar o comportamento espacial da umidade volumétrica para a profundidade de coleta de 20 cm.

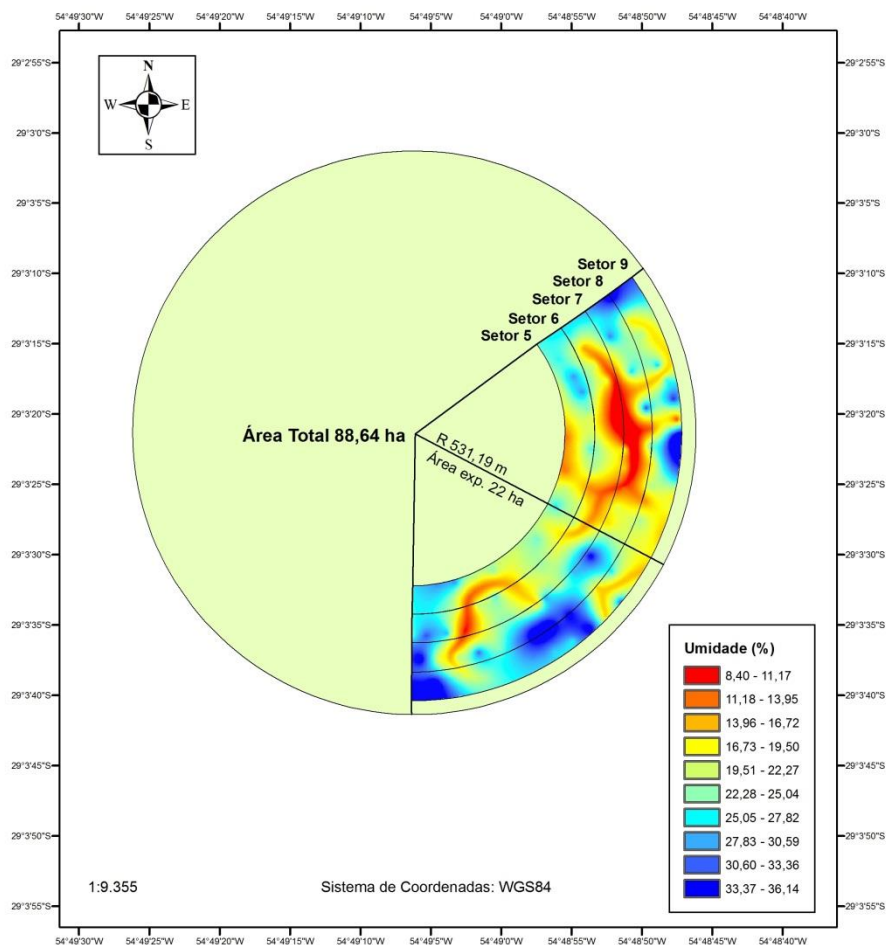


Figura – 4.4 Variabilidade espacial para a profundidade de 20 cm.

De acordo com a Figura 4.4 os resultados detalhados da umidade volumétrica para a profundidade de 20 cm. Estes dados já constam na a Tabela 3, mas na forma de médias gerais da umidade volumétrica na profundidade de 20 cm. Na figura 4.4 fica evidenciado a não significância para seus resultados estatísticos. Estes dados nos mostra pouca ou nenhuma variabilidade espacial nos setores do experimento.

Vieira et al. (1991) observaram baixa variabilidade espacial para a umidade do solo, explicados pelo baixo coeficiente de variação.

Guimarães (1993), no estudo da variabilidade espacial da umidade do solo através da sonda de nêutrons em um Latossolo Roxo, verificou baixos coeficientes de variação para esse atributo nas profundidades de 30 e 60 cm.

Ribeiro Júnior (1995) citou que os valores para a variável umidade do solo estão relacionados com a profundidade, mas as variabilidades não acompanham esta tendência. Souza et al. (2001), estudando variabilidade espacial da umidade do solo encontrou dados de umidade do solo com coeficiente de variação abaixo de 10%, fraca dependência espacial.

Zanette et al (2007) analisando a variabilidade espacial da umidade do solo cultivado com soja constatou que os valores de umidade do solo estão relacionados à profundidade, mas as variabilidades não acompanham esta tendência.

4.3.2 Comprimento raiz principal Vs Umidade volumétrica na profundidade de 20 cm

Allmaras et al. (1973), reconhecem quatro funções principais das raízes: ancoragem da planta, armazenagem de metabólitos vegetais, absorção de água e absorção de nutrientes, sendo estas duas últimas suas funções principais, as quais são fortemente influenciadas pela configuração radicular.

As primeiras coletas de amostras do comprimento da raiz principal da soja tiveram seu início aos 15 DAE, foram coletadas amostras pelo método do trado (FUJIWARA et al. 1994). As amostras foram coletadas, armazenadas em sacos plásticos e identificadas, após este procedimento as raízes eram destorroadas em seguida lavadas.

Após foi feita a medida do comprimento da raiz principal da soja, sendo que a média do comprimento raiz principal entre setores neste período foi de 6,26 cm. Já

para os 105 DAE final de ciclo o comprimento médio da raiz principal foi de 13,04 cm, conforme Figura (4.5).

Azevedo et al. (2007) estudando a distribuição do sistema radicular em um latossolo amarelo com diferentes sistemas de preparo, encontrou resultados parecidos no sistema plantio direto entorno de 12,33 cm. Tormena et al. (2002), constataram redução no desenvolvimento radicular da cultura do milho no sistema plantio direto no segundo ano de execução do experimento.

De acordo com a Figura 4.5 a linha de tendência com seu coeficiente de determinação (R^2) de 0,96.

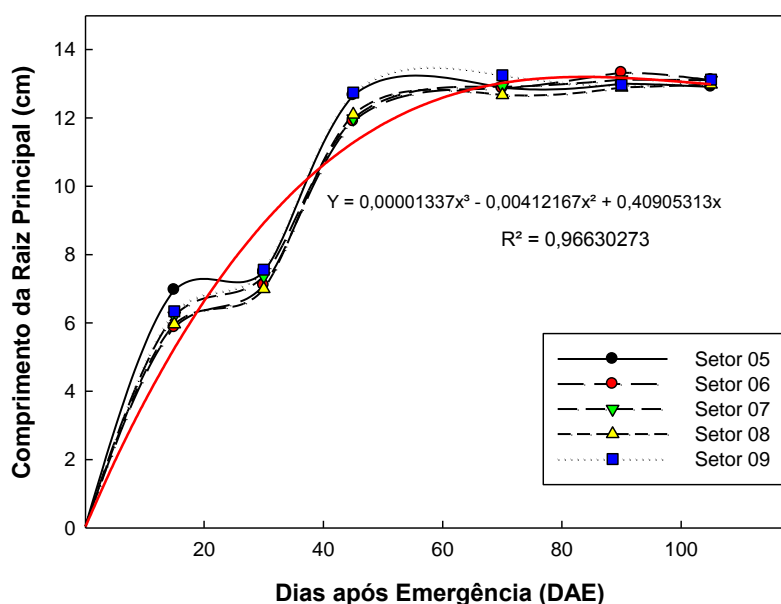


Figura 4.5 – Comprimento da raiz principal da soja.

Analisando a Figura 4.5, observou-se que o sistema radicular da cultura da soja apresentou um crescimento acentuado até aproximadamente os 15 dias após emergência, período este correspondente a estágio V_1 (primeiro nó). Após este período observa-se um acréscimo no tamanho radicular mais lento correspondendo ao estágio V_4 (quarto nó). Após esta fase, ocorreu novamente um aumento no crescimento da raiz em todos os setores, este período correspondia aos 45 DAE e estágio R_1 (início floração). Logo após este período identificado na figura 4.5 o comprimento da raiz principal tende a estabilização.

Dados estes justificam o estudo do comportamento da umidade volumétrica

na profundidade de 20 cm (Figura 4.4).

Parizi (2010) trabalhando com feijão encontrou dados semelhantes, de acordo com a autora o comprimento radicular do feijoeiro teve um crescimento acentuado até os 78 DAE. Após este período o sistema radicular tendeu a se estabilizar.

Conforme Azevedo (2007), em áreas sob plantio direto, na camada superficial (0-20 cm), a temperatura é mais amena e o teor de água adequado, o que favorece o crescimento de raízes e, portanto, a absorção de nutrientes. Por outro lado, em alguns estudos tem sido referenciado o aumento da densidade do solo em áreas sob plantio direto, especialmente para aqueles com pouco tempo de adoção (< 5 anos), o que poderia comprometer o adequado desenvolvimento do sistema radicular.

Cardoso et al (2006), estudando o efeito da compactação do solo no desenvolvimento radicular em sistema de plantio direto, ressalta que o aumento da resistência do solo reduz ou até cessa o desenvolvimento radicular, dependendo da espécie.

4.4 Comparativo dos resultados de lâmina bruta acumulada para os diferentes métodos.

Conforme Figura 4.6 pode-se identificar o comparativo entre os métodos utilizados para determinação de lâmina bruta.

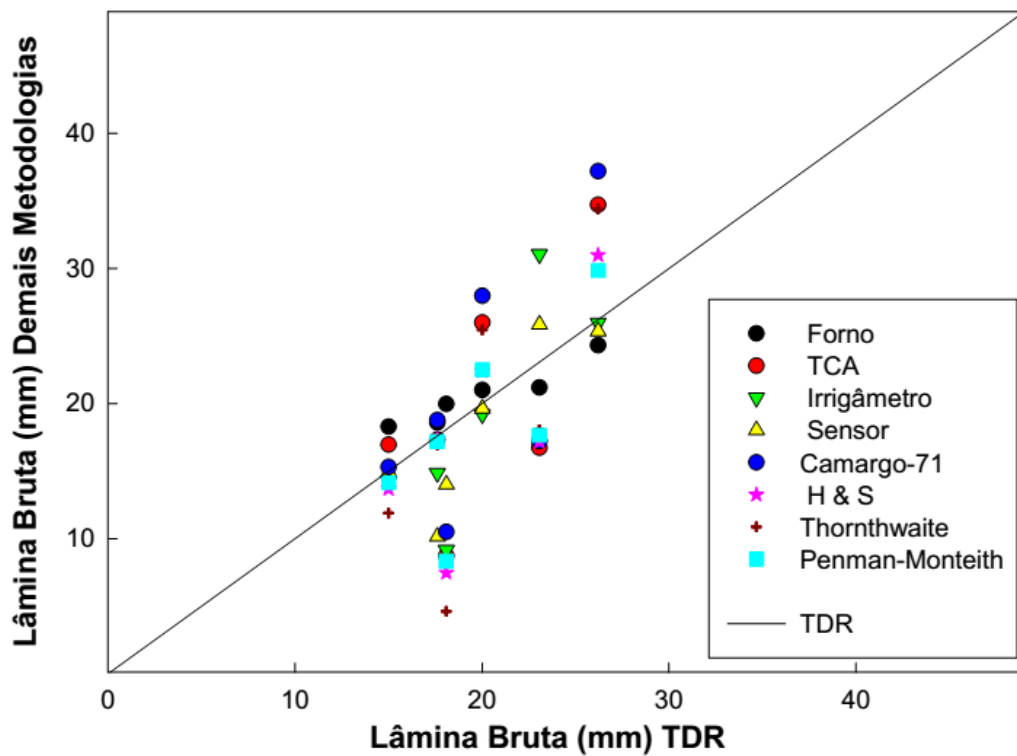


Figura 4.6 – Comparativo lâmina bruta.

Observa-se considerável discrepância entre os resultados obtidos entre os métodos, em destaque com os dados de lâmina medidos pelo tanque classe A (TCA) que em algumas situações os resultados encontrados superestimou os resultados medidos com o TDR. Observa-se também que esta discrepância aumenta à medida que aumenta a lâmina bruta. A maior aproximação entre as leituras de lâmina obtidas pelos equipamentos ocorreu para o método do forno elétrico, seguidos pelos sensores e irrigâmetro.

A média das lâminas bruta pelo método do TDR foi de 19,99 enquanto que a do forno elétrico foi de 20,54, seguido pelas medidas do irrigâmetro 19,06 e dos sensores Watermark de 18,30 de umidade.

De acordo com a Tabela 04 pode-se identificar os resultados médios das lâminas brutas pelas metodologias aplicadas juntamente com seus coeficientes de variação.

Tabela 04 – Valores médios da lâmina bruta para diferentes metodologias.

Período	TDR	For. El.	Sensor W	Irrig	TCA	Cam	H & S	Thorn	Penm	C.V	DP
25/03	17,6a	18,59a	10,13a	14,85a	17,31a	18,77a	17,33a	16,94a	17,16a	7,00	2,65
27/03	20,01a	20,98a	19,61a	19,20a	25,98a	27,96a	22,41a	25,45a	22,48a	9,76	3,12
29/03	26,2a	24,32a	25,33a	25,95a	34,69a	37,19a	30,98a	34,41a	29,82a	22,36	4,73
10/04	18,08a	19,94a	14,00a	9,15a	8,71a	10,48a	7,466a	4,622a	8,31a	26,01	5,10
19/04	15,00a	18,27a	14,92a	14,20a	16,94a	15,29a	13,67a	11,88a	14,12a	3,43	1,85
24/04	23,06a	21,18a	25,84a	31,03a	16,71a	17,19a	17,18a	18,05a	17,63a	24,47	4,95
Média	19,99	20,54	18,30	19,06	20,05	21,14	18,17	18,58	18,25		

* Médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferenciam pelo teste de T, em nível de 5% de probabilidade de erro.

DP = Desvio padrão.

C.V. = Coeficiente de variação.

For. El = Forno elétrico

Sensor W = Sensor Watermark.

Irrig = Irrigâmetro.

Cam = Camargo-71.

H & S = Hargreaves & Samani.

Thorn = Thornthwaite.

Penm = Penman-Monteith.

Verifica-se, a partir do valor do coeficiente de variação, que a lâmina bruta apresentou considerável variabilidade, ou seja, existe significativa dispersão dos valores observados como mostra a Figura 4.6.

Quando analisado as lâminas brutas das diferentes metodologias, não houve diferença estatística pelo teste T ao nível de 5% de probabilidade de erro. Apêndice II.

De acordo com a Tabela 05 pode-se identificar as correlações das determinações de lâmina bruta pelo método do TDR com as demais metodologias.

Tabela 05 – Correlações das determinações de lâmina bruta pelo método do TDR com demais metodologias.

Metodologias	Y = a + bx	R²	P
Forn. El.	Y = 10,20 + 0,52X	0,88	0,0034*
TCA	Y = -10,20 + 1,51X	0,33	0,1364 ^{ns}
Irrg	Y = -13,20 + 1,61X	0,56	0,0531**
Sensor W	Y = -8,77 + 1,35X	0,67	0,0285*
Cam	Y = -13,58 + 1,73X	0,40	0,1035 ^{ns}
H & S	Y = -11,36 + 1,47X	0,45	0,0855**
Thorn	Y = -20,53 + 1,95X	0,47	0,0777**
Penm	Y = -9,02 + 1,36X	0,46	0,0832**

R² = Coeficiente de determinação ajustado;

P = Nível de significância usado pelo teste T;

* = Nível de significância de 5% de probabilidade de erro;

** = Nível de significância de 10% de probabilidade de erro;

ns = Não houve ajuste da equação;

For. El = Forno elétrico;

Irrig = Irrigâmetro;

Cam = Camargo-71;

H & S = Hargreaves & Samani;

Thorn = Thornthwaite;

Penm = Penman-Monteith;

Observa-se na Tabela 5 que a metodologia do forno elétrico foi a que mais se ajustou com os dados do TDR, seguido pela metodologia dos sensores de umidade, comprovando assim os resultados da Figura 4.6.

Já os resultados do coeficiente (R²) encontrados pelas metodologias do tanque classe A e Camargo – 71 foram os menores (0,33 e 0,40), portanto, não houve ajuste na equação devido ao seu nível de significância ser superior a 10% de probabilidade de erro.

Mendonça et al (2003), comparando métodos de estimativa de evapotranspiração encontrou resultados do coeficiente de determinação (R^2) para os métodos de Penman-Monteith e tanque classe A de 0,58 e 0,43.

Dados encontrados por Gonçalves et al. (2009), Cavalcanti Junior et al. (2010), Souza et al. (2010) e Almeida et al. (2010), para o método de Hargreaves-Samani, obtiveram, respectivamente, desempenho “Muito bom”, “Muito bom”, “Bom” e “Péssimo” e valores de R^2 iguais a 0,65, 0,75, 0,87 e 0,20. Os resultados obtidos por estes autores foram em estudos realizados em Sobral-CE, Mossoró-RN, perímetros irrigados de Sergipe e Foratelza-CE, dados estes se assemelham com os encontrados na Tabela 5.

Segundo Moura et al. (2011), o método de Camargo superestimou a ETo entre os meses de fevereiro a agosto, com diferenças relativas entre 2,25% (março) e 19,62% (junho). Nos demais meses houve subestimativa, com valores relativos entre 1,04% (janeiro) e 9,15% (novembro), dados estes que conferem com os dados encontrados na Figura 4.6.

Bragança et al. (2010), comparando métodos de estimativa da ETo para três municípios do Espírito Santo (Venda Nova, Sooretama e Cachoeiro de Itapemirim) para o período úmido, demonstraram que os métodos FAO-Radiação, FAO-Blaney-Criddl e Hargreaves & Samanig superestimaram em média o método padrão (Pmon) em aproximadamente: (11,3%; 0,9%; e 38,2%); (18%; 9,0%; e 3,5%) e (9,0%; 4,8%; e 37,7%), respectivamente.

5 CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos e analisados foi possível concluir que:

- 1) Os métodos comparados de manejo de irrigação, tanto via demanda evaporativa quanto via solo apresentaram valores semelhantes de lâmina para irrigação com exceção dos métodos de Tanque Classe A e Camargo – 71 que superestimaram os resultados.
- 2) O manejo de irrigação proposto no trabalho com base em sensores de umidade do solo Watermark, são adequados e confiáveis para estimar a lâmina bruta para irrigação com relativa precisão e confiabilidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- ABREU, S. L.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Escarificação mecânica e biológica para a redução da compactação em argissolo franco-arenoso sob plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.28, p.519-531, 2004.
- ANDERSON, A. B. C.; EDLEFSEN, N. E. The electrical capacity of the 2-electrode plaster of paris block as an indicator of soil-moisture content. **Soil Science**, v.54, p.35-46, 1942.
- ANDERSON, A. B. C. A method of determining soil-moisture content based on the variation of the electrical capacitance of soil, at a low frequency, with moisture content. **Soil Science**, v.56, p.29-41, 1943.
- ALLEN, R. G. e PRUITT, W. O. 1991. FAO-24 reference evapotranspiration factors. *J. Irrig. and Drain. Engrg.*, ASCE 117(5): 758-773.
- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, 1998. 297p. FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56.
- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; Raes, D. & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and rainage Paper, No. 56, FAO, Rome.
- ALLMARAS, R. R.; BLACK, A. L.; RICKMAN, R. W. Tillage, soil environment, and root growth. In: CONSERVATIONTILLAGE CONFERENCE, 1973, Des Moines. **Proceedings**.Des Moines, 1973. p. 62-86.
- ALMEIDA, B. M. et al. Comparação de métodos de estimativa da ETo na escala mensal em Fortaleza-CE. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza-CE, v.4, n.2, p.93-98, 2010.
- ANDRADE JÚNIOR, A. S.; BASTOS, E. A.; MELO, F. B.; RODRIGUES, B. H. N. Determinação do teor de água em amostras de solo utilizando forno microondas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 25, 1996, Bauru.
- ANDRADE JÚNIOR, A.S. et al. Estratégias ótimas de irrigação para a cultura da melancia. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.36, n. 2, p. 301-305, 2001.
- ARNOLD, J.G.; STOCKLE, C.O. (1991). *Simulation of supplemental irrigation from on-farm ponds*. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* v.117, n.3, p.408-423.
- AZEVEDO, J.A. de; SILVA, E.M. da. **Tensiômetro: dispositivo prático para controle da irrigação**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 1999. 33p. (Embrapa Cerrados. Circular Técnica, 001).

AZEVEDO, D. M. P. et al. Atributos físicos e químicos de um Latossolo Amarelo e distribuição do sistema radicular da soja sob diferentes sistemas de preparo no cerrado maranhense. *Revista Ciência Agronômica*, v. 38, n. 01, p. 32-40, 2007.

AZOOZ, R.H.; ARSHAD, M.A. Soil infiltration and hydraulic conductivity under long-term no-tillage and conventional tillage systems. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 76, p. 143-152, 1996.

BALASTREIRE, L.C. **O estado-da-arte da Agricultura de Precisão no Brasil**. Piracicaba: L. A. Balastreire, 2000.

BATAGLIA, O.C.A. determinação indireta de enxofre em plantas por espectrofotometria de absorção atômica. **Ciência e Cultura** 28:672-675, 1976.

BARNI, N.A.; BERGAMASCHI, H. Alguns princípios técnicos para semeadura. In: MIYASAKA, S.; MEDINA, J.C. **A Soja no Brasil**. ITAL, Campinas, São Paul. 1981, 1062 p., p. 476-480.

BASTOS, E.A. **Determinação dos coeficientes de cultura da alface (*Lactuca sativa* L.)**. Botucatu, 1994. 101p. Dissertação (M.S.) - Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista.

BENEDETTO, A. Water content evaluation in unsaturated soil using GPR signal analysis in the frequency domain. **Journal of Applied Geophysics**, v.71, p.26-35, 2010.

BENSON, C. H. ; BOSSCHER, P. J. ; LANE, D. T. ; PLISKA, R. J. Monitoring system for hydrologic evaluation of landfill covers. *Geotechnical Testing Journal*, V.17, nº 2, p. 138-149, 1994.

BELEZE, J.R.F. et al. Avaliação de cinco híbridos de milho (*Zea mays* L.) em diferentes estádios de maturação. 1. Produtividade, características morfológicas e correlações. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 32, n. 3, p. 529-537, 2003a.

BERLATO, M. A.; MOLION, L. C. B. **Evaporação e Evapotranspiração**. Porto Alegre, IPAGRO: Secretaria de Agricultura, RS. 1981. 95p. (Boletim Técnico, 7).

BERLATO, M.A. **Modelo de relação entre o rendimento de grãos de soja e o déficit hídrico para o Estado do Rio Grande do Sul**. 1987. 93 f. Tese (Doutorado em Meteorologia) – Curso de Pós-graduação em Meteorologia, Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais, São José dos Campos, 1987.

BERNARDO, S. **Manual de irrigação**. 5. ed. Viçosa: UFV, 1989. 596p

BERNARDO, S. **Manual de Irrigação**. 8. ed. Viçosa: UFV, 2006. 625 p.

BERGAMASCHI, H. et al. **Agrometeorologia aplicada à irrigação**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1992.

BEUTLER, A. M. FREDDI, O. S. LEONE, C. L. CENTURION, J. F. Densidade do solo relativa e parâmetro "S" como indicadores da qualidade física para culturas anuais. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**. V 8 - No 2 - 2º Semestre 2008

BOONE, F.R. Weather and other environmental factors influencing crop responses to tillage and traffic. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.11, n.3-4, p.283-324, 1988.

BORGES JUNIOR, João. C. F. et al. Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência diária para a microrregião de Garanhuns, PE. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 6, n.4, p. 380-390, 2012.

BOUYOUCOS, G. J. Determining soil moisture rapidly and accurately by methyl alcohol. **J. Am Soc. Agron.**, v. 20, n. 1, p. 82-3, 1928.

BRAGA, A. P.; COSTA, A. C. L.; GONÇALVES, P. H. L.; SILVA JÚNIOR, J. A.; COSTA, R. F. Sazonalidade do perfil do conteúdo de umidade do solo em comparação com a precipitação do projeto ESECAFLOR. In: Congresso Latino americano e Ibérico de Meteorologia, 11, e Congresso Mexicano de Meteorologia, 16, 2005, Cancun. **Anais...** Cancun: 2005, CD-Rom.

BRANDT, E. A.; SOUZA, L. C. F.; VITORINO, A. C. T.; MARCHETTI, M. E. Desempenho agrônomico de soja em função da sucessão de culturas em sistema plantio direto. **Ciência e Agroecologia**, v. 30, n. 5, p. 869-874, 2006.

BRAGANÇA, R.; REIS, E. F.; GARCIA, G. O.; PEZZOPANE, J. E. M. Estudo comparativo da estimativa da evapotranspiração de referência no período chuvoso para três localidades no Estado do Espírito Santo. **Idesia**, v.28, n.2, p.21-29, 2010.

BROWN, E.A.; CAVINES, C.E.; BROWN, D.A. Responses of selected soybean cultivars to soil moisture deficit. **Agronomy Journal**, v.77, n.2, p.274-278, 1985.

BÜLL, L.T.; CANTARELLA, H., org. (1993). Cultura do milho: fatores que afetam a produtividade. Piracicaba, POTAFOS.

CALDERÓN, V.J.V. **Interpretação dos resultados de ensaios TDR para a determinação do teor de umidade dos solos**. 2010. Ano de Obtenção: 2010. 117p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

CALHEIROS, C. B. M. ARNDT, E., COMPARAÇÃO DE MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DA UMIDADE DO SOLO PARA FINS DE IRRIGAÇÃO. **Ci. Agríc.**, V. 1, n. 1, p. 7 - 14, 1991.

CAMARGO, A. Paes. **Contribuição para a determinação da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo**. Piracicaba, 1961, 49p. Tese (Doutorado)-ESALQ/USP.

CAMARGO, A. Paes. **Contribuição para a determinação da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo**. Bragantia, Campinas, v.21, p.163-203, 1962.

CAMARGO, A. Paes. Balanço hídrico no Estado de São Paulo. 4.ed. Campinas: Instituto Agrônômico, 1978. 28p. (Boletim, 116).

CAMARGO, A. P.; Camargo, M. B. P. **Uma revisão analítica da evapotranspiração potencial**. Bragantia, Campinas, v.59, n.2, p.125-137, 2000.

CARDOSO, E. G. ZOTARELLI, L. PICCININ, J. L. TORRES, E. SARAIVA, O. F. GUIMARÃES, M. F. Sistema radicular da soja em função da compactação do solo no sistema de plantio direto. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v.41, n.3, p.493-501, mar. 2006.

CAROF, M.; TOURDONNET, S. de; COQUET, Y., HALLAIRE, V.; ROGER-ESTRADE, J. Hydraulic conductivity and porosity under conventional and no-tillage and the effect of three species of cover crop in northern France. *Soil Use and Management*, v.23, p.230–237, 2007.

CAVALCANTI JUNIOR, E.G. et al. Estimativa da evapotranspiração de referência para a cidade de Mossoró RN. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza CE, v.4, n.2, p.87-92, 2010.

CECÍLIO, R.A.; SANTOS, D.B. & SOUZA, D.O. Proposta de metodologia para obtenção da curva de calibração de umidade do solo com aparelho de TDR. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 33., São Pedro, 2004. Anais. São Pedro, SBEA, 2004. CD-ROM

CELINSKI, V. G.; ZIMBACK, C. R. Avaliação de um sensor de capacitância elétrica e sua correlação com atributos do solo. *Revista Energia na Agricultura*, v.25, p.157-170, 2010.

CERVI, E.U. A revolução da palha. *Revista Plantio Direto*, Passo Fundo, n.73, p.8-12, 2003.

CHANG, Z. Y.; ILIEV, B. P.; GROOT, J. F.; MEIJER, G. C. M. Extending the limits of a capacitive soil-water-content measurement. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v.56, p.2240-2244, 2007.

CICHOTA, R.; LIER, Q.J.V. Calibração no campo de um equipamento de TDR segmentado. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 14., 2002, Cuiabá. **Anais...Cuiabá**: SBCS/UFMT, 2002. 1CD-ROM.

CLYMA, W. (1996). Irrigation Scheduling Revisited Historical Evaluation and Reformulation of the Concept. In: PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE IN EVAPORATION AND IRRIGATION SCHEDULING, San Antonio, 1996. Resumos. San Antonio, ASAE. p.626-631.

COELHO, E.F. et al. Desempenho de diferentes guias de ondas para uso com o analisador de umidade TRASE. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.5, n.1, p.81-87, 2001.

COELHO, S. L.; TEIXEIRA, A dos S. Avaliação do tensiômetro eletrônico no monitoramento do potencial matricial de água no solo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.24, n.3, p.536-545, 2004.

COELHO, E.F.; VELLAME, L.M.; COELHO FILHO, M.A. & LEDO, C.A.S. Desempenho de modelos de calibração de guias de onda acopladas a TDR e a multiplexadores em três tipos de solos. **R. Bras. Ci. Solo**, 30:23-30, 2006.

CONCIANI, W.; HERRMANN JR. P.S.P; MACHADO S.L.; SOARES, M.M. Uso da técnica de reflectometria no domínio do tempo (TDR) para a determinação da umidade do solo in situ. *Solos e Rochas*, São Paulo, 19 (3), 189 -199, Dezembro 1996.

CONKLIN, R. A. Introduction to soil chemistry: Analysis and instrumentation. Hoboken,: Wiley - Interscience, 2005. 218p.

CONTIN, F. S. **TECNOLOGIA DO IRRIGÂMETRO APLICADA NO MANEJO DA IRRIGAÇÃO DO FEIJOEIRO** (Dissertação de Mestrado) Viçosa – MG, 2008, p64.

COSTA F. S. et al. PROPRIEDADES FÍSICAS DE UM LATOSSOLO BRUNO AFETADAS PELOS SISTEMAS PLANTIO DIRETO E PREPARO CONVENCIONAL **R. Bras. Ci. Solo**, 27:527-535, 2003

CRUZ, T. V., PEIXOTO, C. P., MARTINS, M. C., PEIXOTO, M. F. S. P., Componentes de produção de soja em diferentes épocas de semeadura, no oeste da bahia. **Biosci. J.**, Uberlândia, v. 26, n. 5, p. 709-716, Sept./Oct. 2010.

CUNHA, G.R. et al. Perda de rendimento potencial em soja no Rio Grande do Sul por deficiência hídrica. **Revista de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.6, n.1, p.111-119, 1998.

DOORENBOS, J.; PRUITT, W.O. Guidelines for predicting cropwater requirements. Rome: Estudio FAO, 1975., 1975. 179p. (Irrigation and Drainage, Paper, 24).

DOORENBOS, J.; PRUITT, J. O. **Crop water requeriment**. Rome: FAO, 1977. 144p. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 24).

DOORENBOS, J.; PRUITT, W.O. **Las necesidades de Água de los cultivos**. 4. ed. Roma: FAO, 1984. 194p.(Estudio FAO: Riego y Drenage, nº 24).

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. M. **Efeito da água no rendimento das culturas**. Campina Grande: UFPB, 1994.

DOURADO NETO, D.; FANCELLI, A. L. **Produção de feijão**. Guaíba: Agropecuária, 2000. cap.1, p.23-48: Ecofisiologia e fenologia.

DOWDING, D. G.; HUANG, F. C. Early detection of rock movement with time domain reflectometry. ASCE, **Journal of Geotechnical Engineering**, V. 120, nº 8, p. 1413-1427, 1994.

ELAIUY, M. L. C.; SATO, L. M.; VARALLO, A. C. T.; SOUZA, C. F. Desenvolvimento e avaliação de sonda de TDR para o manejo racional da água em substratos utilizados na produção de mudas florestais. *Amibi-Agua*, Taubaté, v. 4, n. 1, p. 117-131, 2009.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA -EMBRAPA.. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Brasília, 1999. 412p.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro: Embrapa – CNPS, 412p, 1999.

FANCELLI, A. L.; DOURADO NETO, D.. **Produção de Milho**. Guaíba, Porto Alegre: Agropecuária, 2000. 360p.

FARIA, M. A.; VIEIRA, J. **Irrigação por aspersão: sistemas mais usados no Brasil. Informe Agropecuário**, v. 12, n. 139, p. 27-39, junho 1986.

FERNANDES, D. S.; FOSTER, P. R. P. Cálculo da evapotranspiração potencial através do Método de Thornthwaite e comparação com dados de reanálise de Evaporação potencial do ncep para a Cidade de Pelotas-RS 2005, 6p

FLARESSO, J.A.; GROSS, C.D.; ALMEIDA, E.D. Cultivares de milho (*Zea mays L.*) e Sorgo (*Sorghum bicolor (L.) Moench.*) para ensilagem no alto Vale do Itajaí, Santa Catarina. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 29, n. 6, p. 1608-1615, 2000.

FONSECA, S.O.; ARAÚJO, G.L.; FARIA, B.H.G.; LIPARIZI JUNIOR, A.; COSTA, J.; REIS, E.F. avaliação do método do forno elétrico para a determinação de Umidade do solo em relação ao método padrão de estufa. XIII Encontro Latino Americano de Iniciação Científica e IX Encontro Latino Americano de Pós-Graduação – Universidade do Vale do Paraíba, 2009.

FRANGI, J. P.; RICHARD, D. C.; CHAVANNE, X.; BEXI, I.; SAGNARD, F.; GUILBERT, V. New in situ techniques for the estimation of the dielectric properties and moisture content of soils. **Comptes Rendus Geoscience**, v.341, p.831-845, 2009.

FREITAS G. B. Manejo racional da água na Irrigação no Estado de São Paulo, 2010.

FREITAS, W. A CARVALHO, J. A , BRAGA, R. A., ANDRADE, M. J. B., Manejo da irrigação utilizando sensor da umidade do solo alternativo. **Rev. bras. eng. agríc. ambient.** vol.16 no.3 Campina Grande 2012

FRÈRE, M. A method for the practical application of the estimation of potential evapotranspiration and evaporation from a free water surface. Rome: FAO, 1972, 21p.

FRIZZONE, J. A.; REZENDE, R.; GONÇALVES, A. C. A.; HELBEL JÚNIOR, C. Produtividade do feijoeiro sob diferentes uniformidades de distribuição de água na superfície e na subsuperfície do solo. **Revista Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.27, n.2, p.414-425, 2007.

FUJIWARA, M. et al. A técnica de estudo de raízes pelo método do trado. Boletim Técnico do Instituto Agrônômico de Campinas, Campinas, n. 153, 1994. 9 p.

GADIOLI, J.L. **Estimativa de rendimento de grãos e caracterização fitotécnica da cultura de milho (Zea mays L.)**. 1999. 86f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

GARCIA, A. **Utilização da temperatura do dossel, na estimativa de índices de estresse hídrico para o feijoeiro (Phaseolus vulgaris L.)**. 2000. 135f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2000.

GARDNER, W. H. water content. In KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis I, physical and mineralogical methods**. Madison: Soil Science Society of America, 1986. cap. 21. p. 493-594.

GARDNER, W. H. A historical perspective on measurement of soil and plant water status. **Irrigation Science**, v. 4, n.2, p. 255-264, 1988.

GARZELLA, T. C.; MOLIN, J. P. **Calibração em campo de um TDR para determinação de umidade**. 2004. 14p. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queirós”, Universidade de São Paulo, Piracicaba – SP, 2004.

GUIMARÃES, E. C. Variabilidade espacial da umidade e da densidade do solo em um Latossolo Roxo. Campinas: UNICAMP, 1993. 135p. Dissertação Mestrado.

GOMES, A. C.S., **Estudo Experimental e simulado da cultura da soja em função de diferentes níveis de irrigação** 2011. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola)- Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria 2011.

GOMES, E. P, AVALIAÇÃO DO MEDIDOR ELETRÔNICO DE UMIDADE DO SOLO “HIDROFARM” EM LATOSSOLO VERMELHO DISTROFÉRRICO **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada** v.7, nº. 1, p. 85 - 90, 2013

GONÇALVES, J. M. SOUZA, E. R.B. FERNANDES, E P. LEANDRO, W. M. PELOSI, A. P. Produção de matéria seca e produtividade em soja. 2011. Escola de Agronomia e Engenharia de Alimentos – UFG (EA-UFG).

HANKLIN, L.; SAWHNEY, B. L. Soil moisture determination using microwave radiation: **Soil Science**, v. 126, p. 313-315. 1978.

HARGREAVES, G.H. (1974). Potential Evapotranspiration and Irrigation Requirements for Northeast Brazil. Utah State University, Logan, UT.

HENRIQUE, F. A. N. **Estimativa da evapotranspiração de referência em Campina Grande -PB** . 2006. 107p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Campina Grande, PB, 2006.

HERRMANN JÚNIOR, P. S. P. **Construção de um equipamento para medida de umidade do solo através de técnica de microondas**. São Carlos: USP, 1993. 124 p. Dissertação de mestrado.

HOOKE, W.R.; LIVINGSTON, N.J. Propagation velocity errors in time domain reflectometry measurements of soil water. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 59, n. 1, p. 92 – 96, 1995.

<http://pt.shvoong.com/exact-sciences/physics/1078497/evapotranspira%C3%A7%C3%A3o-m%C3%A9todo-tanque-classe/#ixzz1xsPsDR8q>. Acesso em julho 2013

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia, 2013. www.inmet.gov.br

IRRROMETER. **Irrrometer Soil Moisture Sensors**. Disponível em: <<http://www.irrometer.com/sensors.html#wm>>. Acesso em: 01 de setembro 2009.

JENSEN, M.E. (1981). Design and operation of farm irrigation systems. St. Joseph (MI): ASAE.

JUNIOR, F. J. Verneti, et. al. ENSAIO DE VALOR DE CULTIVO E USO DE CULTIVARES DE SOJA PARA ALIMENTAÇÃO HUMANA. PELOTAS, RS, SAFRA 2008/2009. **XXXVII Reunião de Pesquisa de Soja da Região Sul**. Porto Alegre julho de 2009.

KILPP, A.R. Fieldstar. Solução em Agricultura de Precisão. In: BALASTREIRE, L.C. **O estado-da-arte da Agricultura de Precisão no Brasil**. Piracicaba: L. A. Balastreire, 2000. p. 39-61.

KINIRY, J.R.; BONHOMME. Predicting maize phenology. In: HODGES, C. (Ed.). **Predicting crop phenology**. Boca Raton: CRC Press, Ann. Arbor. Boston. p. 115-131, 1991.

KIZITO, F.; CAMPBELL, C. S.; CAMPBELL, G. S.; COBOS, D. R.; TEARE, B. L.; CARTER, B.; HOPMANS, J. W. Frequency, electrical conductivity and temperature analysis of a low-cost capacitance soil moisture sensor. **Journal of Hydrology**, v. 352, p. 367-378, 2008.

KLAR, A.E. **A influência do solo e do clima nas necessidades hídricas da cultura da cebola**. Botucatu, 1974. 171p. Tese (Livre-docência) - Faculdade de Ciências Agrárias Médicas e Biológicas de Botucatu, Universidade Estadual Paulista.

KLAR, A. E. **A água no sistema solo-planta-atmosfera**. 2ª edição. São Paulo: Nobel, p. 57 – 81, 1988.

KLAR, A. E. **Irrigação: frequência e quantidade de aplicação**. São Paulo: Nobel, p. 29 – 61, 1991.

KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L. Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de uso e manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.26, p.857-867, 2002.

KOPPI, A.J.; DOUGLAS, J.T. A rapid inexpensive and quantitative procedure for assessing soil structure with respect to cropping. **Soil Use Management**, v.7, p.52-56, 1991.

KUSS. R. C. R., **POPULAÇÕES DE PLANTAS E ESTRATÉGIAS DE IRRIGAÇÃO NA CULTURA DA SOJA**. DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Santa Maria 2006.

LACERDA. R.D., Avaliação de um TDR para determinação do conteúdo de água do solo. *Revista de Biologia e Ciências da Terra*, Vol 5 nº1, 2005.

LETEY, J.; VAUX, H.J.; FEINERMAN, E. Optimum crop water as affected by uniformity of water infiltration. **Agronomy Journal**, Madison, v. 76, p. 435-441, 1984.

LIBARDI, Paulo Leonel. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo, SP: Editora da Universidade de São Paulo, 2005. Cap. 8, p. 209-215

LIMA, S. C. R. V.; FRIZZONE, J. A.; COSTA, R. N. T.; SOUZA, F.; PEREIRA, A. S.; MACHADO, C. C.; JÚNIOR, M. V. Curvas de desempenho de válvulas reguladoras de pressão novas e com diferentes tempos de utilização. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.7, n.2, p.201-209, 2003.

LOPES, D. de C. et al. Programa computacional para adequação de força motriz considerando o remanejamento dos motores existentes. **Revista Engenharia na Agricultura**, Viçosa, MG, v. 14, n. 1, p. 51-63, 2006.

MAEHLER, A.R. et al. Potencial de rendimento da soja durante a ontogenia em razão da irrigação e arranjo de plantas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.38, n. 2, p. 225-231, 2003.

MANTOVANI, E.C. Utilização de instrumentos e de técnicas da agricultura de precisão para o aumento de eficiência nos processos de produção agrícola. In: BALASTREIRE, L.C. **O estado-da-arte da Agricultura de Precisão no Brasil**. Piracicaba: L. A. Balastreire, 2000.

MANTOVANI, E. C. Otimização do uso da água e energia utilizando o programa IRRIGA-GESAI ® Apostila do curso de manejo de irrigação realizado de 24 a 27 de agosto de 2004. Viçosa, MG. 2004.

MANTOVANI, E.C.; BERNARDO, S.; PALARETTI, L.F. **Irrigação – princípios e métodos**. Viçosa: UFV. 2006. 318p

MARTORANO, L. G., **Padrões de resposta da soja a condições hídricas do sistema solo-planta-atmosfera, observados no campo e simulados no sistema de suporte a decisão DSSAT**. 2007. 170p. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. RS. 2007.

MASCARENHAS, H.A.A. Acúmulo de matéria seca, absorção e distribuição de elementos durante o ciclo vegetativo da soja. Campinas, Instituto Agrônomo, 1973. 48p. (Bol. Téc. N.º 6)

MATZENAUER, R.; HOMERO, B.; MOACIR, A.B. Evapotranspiração da cultura do milho. I- Efeito de épocas de semeadura. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**. Santa Maria. V.6.n.1. p. 9-14. 1998.

MENDES, J.M.L., MIRANDA, E.P., MARTINS, G.S., FIALHO, J.S., MESQUITA, F.P., SÁ SOBRINHO, C. de, MESQUITA, K.C.S. Determinação da umidade do solo através do forno microondas. I WORKSHOP Internacional de Irrigação. 2007.

MENDONÇA, J. C; Elias F. de Sousa; Salassier Bernardo; Gutemberg P. Dias & Sidney Grippa. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) na região Norte Fluminense, RJ. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.7, n.2, p.275-279, 2003.

MENDONÇA, J.C.; SOUSA, E.F.; ANDRE, R.G.B.; BERNARDO, S. Coeficientes do tanque Classe “A” para a estimativa da evapotranspiração de referência, em Campos dos Goytacazes, RJ. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.14, p.123-128, 2006.

MIRANDA, J.H.; GONÇALVES, A.C.A.; CARVALHO, D.F. Água e solo. In: In: MIRANDA, J.H., PIRES, R.C.M. **Irrigação**. Piracicaba: FUNEP, v.1, p.1-62. 2001.

MIRANDA, E. P.; MONTEIRO, F. N. F.; SANTOS, F. R. M.; LEITE, K. N.; RODRIGUES, A. V.; OLIVEIRA, D. P. Determinação da umidade do solo no forno de microondas em diferentes potências. In: II WORKSHOP INTERNACIONAL DE INOVAÇÕES TECNOLÓGICAS NA IRRIGAÇÃO, **Anais.**, Fortaleza: Inovagri. 2008.

MICHELON, C.J. **Qualidade física de solos irrigados do Rio Grande do Sul e do Brasil Central**. 2005. 92f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Santa Maria, 2005.

MONSEN-NIA, M.; AMIRI, H.; JAZI, B. Dielectric constants of water, methanol, ethanol, butanol and acetone: measurement and computational study. **Journal of Solution Chemistry**, v.39, p.701-708, 2010.

MORAES , J. C. C. ; PEIXOTO, C. P.; SANTOS, J. M. B.; BRANDELERO E.; PEIXOTO, M. F. S. P.; SILVA, V. Caracterização de dez cultivares de soja nas condições agroecológicas do Recôncavo Baiano. **Magistra**, Cruz das Almas, v. 16, n. 3, p. 33- 41, 2004.

MORGADINHO, M.C.O.C.T., **Dinâmica de Água no Solo e Consumo Hídrico na Agricultura: Um Estudo de Caso em Vinha na Região Demarcada do Douro**. Dissertação de mestrado em Clima e alterações climáticas, Vila Real 2010.

MOURA, A. R. C., MONTENEGRO, S. G. L., ANTONINO, A. C. D., AZEVEDO, J. R. G., SILVA, B.B., OLIVEIRA, L. M., Evapotranspiração de referência baseada em métodos empíricos em Bacia experimental no estado de Pernambuco – Brasil., **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.28, n.2, 181 - 191, 2013.

NAVARRO JÚNIOR, H. M.; COSTA, A. C. Contribuição relativa dos componentes do crescimento para produção de grãos de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília**, v. 37, n. 2, 2002

NOBORIO, K. Measurement of soil water content and electrical conductivity by time domain reflectometry: A review. **Computers and Electronics in Agriculture**, Baltimor, v. 31, n. 3, p. 213 – 237, 2001.

NUNES, F.C.F. de P. **Relações entre irregularidades pluviométricas, desenvolvimento fenológico e produtividade de milho (*Zea mays* L.) e probabilidade de frustração de safra**. 1993. 147f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade do Ceará, Fortaleza, 1993.

OLIVEIRA, R.A.; RAMOS, M.M. Manual do Irrigâmetro. Viçosa, MG: UFV, 2008. 144p.

OMETTO, J.C. **Bioclimatologia vegetal**. São Paulo: Ceres, 1981.

PARIZI, A. C. **Funções de produção das culturas de milho e feijão através de estudo experimental e simulado**. 2010. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola)- Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria 2010.

PEITER, M.X. (1998) **Estudo do Manejo da Irrigação Via Modelo de Simulação**. São Carlos, 183p. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos.

PENMAN, H.L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proceeding Royal Society, London, v.193, p.120-143. 1948.

PENMAN, H.L. Evaporation over British Isles. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, Bangkok, v.76, p.372-383, 1950.

PENMAN, H.L. Experiments on irrigation of sugar beet. Journal of Agricultural Science, Cambridge, v.42, p.286-292, 1952.

PEREIRA, L. S.; ALLEN, R. G. **Novas aproximações aos coeficientes culturais**. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.16, n.4, p.118-43, 1997.

PIMENTEL, R.G. A soja. São Paulo: Nobel, 1990.

PIONEER. SÚMULA TÉCNICA Santa Cruz do Sul: Pioneer Sementes, 1993. 20p. (informativo, .2)

PITOL, C. BROCH, D. L. Soja: Lavoura mais produtiva e Tolerante à Seca. Tecnologia e Produção: Soja e Milho 2011/2012.

QUEIROZ, D.M. de; DIAS, G.P.; MANTOVANI, E.C. Agricultura de precisão na produção de grãos. In: Borém et al. (ed.). **Agricultura de Precisão**. Viçosa: A. Borém e outros, 2000. p.1-42.

RAMO, S.; WHINNERY, J.R.;VAN DUZER, T. Fields and waves in communication electronics.3rd ed. John Wiley & Sons, New York. 1994.

REICHARDT, Klaus **Processos de Transferência no Sistema Solo-Planta-Atmosfera**, 4ª Ed. Campinas: Fund. Cargill, 466p., 1985.

REICHARDT, K. Capacidade de Campo. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.12, p. 211-6, 1988.

REICHARDT, K. 1978. A água na produção agrícola. McGraw-Hill do Brasil, São Paulo. 119p.

REICHARDT, K. (1990). A água em sistemas agrícolas. São Paulo, Manole.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera**: conceitos, processos e aplicações. Barueri, SP: Manole Ltda, 478p., 2004.

REZENDE, et al. Função de produção da cultura do milho e do feijão para diferentes lâminas e uniformidade de aplicação de água. **Acta Scientiarum. Agronomia**, Maringá, v. 26, n. 4, p. 503-511, 2004.

RIBEIRO Jr., P. J. Métodos geoestatísticos no estudo da variabilidade espacial de parâmetros do solo. Piracicaba: ESALQ, 1995. 99p. Dissertação Mestrado

RIBEIRO Jr, Controle de obras, Mecânica do solos. 2012.

RIGHES, A. A. ; GOMES, Ana Carla dos Santos ; AMARAL, L. G. H. ; COSTA, R. D. ; ROSA, G. M. . **Determinação do conteúdo de água no solo**. In: Afranio Almir Righes. (Org.). Determinação da Água no Solo e na Planta para Irrigação. 1 ed. Santa Maria: Imprensa Universitária - UFSM, 2003, v. 1, 97pg., p. 3-21.

RODRIGUES, L.N.; MANTOVANI, E.C.; RAMOS, M.M.; SEDIYAMA, G.C. O modelo de Ritchie na determinação da evapotranspiração do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.)

irrigado. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 44, n. 252, p.191-204, 1997.

RODRIGUES, N. A. MELO, W. L. C. TARGA, M. S. BATISTA, G. T. Avaliação do comportamento da água no solo sob cobertura vegetal de eucalipto e pastagem dentro de um ciclo. Encontro de Iniciação Científica – UNITAU - Taubaté, SP, Brasil. 2011.

RUSINIAK, L. Spontaneous polarization of water in porous structure of a solid body. **Geophysical Journal International**, v.148, p.313-319, 2002.

SÁ, M.; RAMALHO, M. A. P.; SOUZA SOBRINHO, F. de. Aspectos morfológicos e fisiológicos de cultivares modernas e antigas de milho. **Revista Ciência e Agrociência**, v. 26, n. 5, p. 1082 – 1091, 2002.

SAAD, J.C.C.; SCALOPPI, E.J. Análise dos principais métodos climatológicos para estimativa da evapotranspiração potencial. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 8., Florianópolis, 1988. **Anais**. Florianópolis: Associação Brasileira de Irrigação e Drenagem, 1988. v.2, p.999-1021.

SANTOS, F.J. de S.; OLIVEIRA, J.J.G.; SOUZA, F. de; GARCIA, F.C. de H. Irrigação da melancia (*Citrullus lanatus*, Schrad): manejo através do tanque classe A. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 30., 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: SBEA, 2001. p.21.

SANTOS, M.R., influência do tipo de amostragem na Constante dielétrica do solo e na Calibração de sondas de TDR. *R. Bras. Ci. Solo*, 34:299-307, 2010.

SANTOS, O.S. dos. (Coord.) A cultura da soja: Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná. 2. ed. São Paulo: Globo, 1995. (Coleção do agricultor. Grãos; Publicações Globo Rural).

SARAIVA, L. A. T. **Aumento do rendimento de grãos de soja com o manejo de plantas daninhas e espaçamento entre fileiras**. 2004. 78 f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004

SCHONS, R. L. **Critérios para o aumento do índice de eficiência nos sistemas de irrigação tipo pivô central**. 2010. 139 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola)-Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria 2010.

SEARCY, S.W. Agricultura de Precisão: um desafio para a extensão e educação continuada. In. BALASTREIRE, L.C. **O estado-da-arte da Agricultura de Precisão no Brasil**. Piracicaba: L. A. Balastreire, 2000. p. 17-24.

SEDIYAMA, G. C. Necessidades de água para os cultivos. In: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENSINO SUPERIOR. **Curso de engenharia de irrigação**. Brasília, 1987. 413p. (Curso de Especialização por Tutoria à Distância, módulo 4).

SENTELHAS, P.C. Class A pan coefficients (Kp) to estimate daily reference evapotranspiration (ET_o). **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v.7, n.1, p.111-115, 2003.

SHAW, R.H. Climatic requirements. In: **Corn and corn improvement**. Madison: Wisconsin, American Society of Agronomy, Publisher, 1977. p.591-623 (Serie Agronomy, 18).

SIDIRAS, N; Vieira, S. R; Roth, C. H. Determinação de algumas características físicas de um Latossolo Roxo distrófico sob plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.8, p.265-268, 1984.

SILVA, E. M. da *et al.* **Manejo de irrigação por tensiometria para culturas de grãos na região do Cerrado**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 1999. 60p. (Circular técnica / Embrapa Cerrados, ISSN 1517-0187 ; n.6)

SILVA, E.L. & GERVÁSIO, E.S. Uso do instrumento TDR para determinação do teor de água em diferentes camadas de um Latossolo Roxo distrófico. **R. Bras. Eng. Agríc. Amb.**, 3:417-420, 1999.

SILVA, M.T. & AMARAL, J.A.B. 2008. Estimativa da evapotranspiração e coeficientes de cultivo do amendoim irrigado pelo método do balanço hídrico no solo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, 16(1) 67-76.

SILVA, A.A.; Galon, R.; Galon, L.; Ferreira, F.A.; Tirloni, S.P.; Ferrreira, E.A.; Silva, A.F.; Agnes, E.L. Sistema de plantio direto na palhada e seu impacto na agricultura brasileira. **Revista Ceres**, v.56, p.496-506, 2009.

SILVA, J. B. LAZARINI, E. SILVA, A. M. RECO, P. C. Ensaio comparativo de cultivares de soja em época convencional em selvíria, ms: características agrônômicas e produtividade. **Biosci. J.**, Uberlândia, v. 26, n. 5, p. 747-754, Sept./Oct. 2010.

SILVA, M. A., AZEVEDO, L. P., SAAD, J. C. C, MICHELS, R. N., Propriedades físico-hídricas, desenvolvimento radicular e produtividade da soja em dois tipos de manejos de solo. **Irriga**, Botucatu, v. 17, n. 3, p. 387 - 396, julho - setembro, 2012

SYONEI V. ZANETTE *et al.* **R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental**, v.11, n.3, p.239-247, 2007.

SMITH, M. **Report on the expert consultation on revision of crop water requirements**. Rome: FAO, 1991. 45 p.

SOARES, F.C. **Análise de Viabilidade da Irrigação de Precisão na Cultura do Milho (Zea mays L.)**. 2010. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola)-Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria 2010.

SOUSA, I. F. *et al.* Evapotranspiração de referência nos perímetros irrigados do estado de Sergipe. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande-PB, v.14, n.6, p.633-644, 2010.

SOUZA, M. Z; SILVA, M. Z; GUIMARÃES, G. L; CAMPOS, D. T. S.; CARVALHO, M. P; PEREIRA, T.G. Variabilidade espacial de atributos físicos em um Latossolo Vermelho distrófico sob semeadura direta em Selvíria – MS. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.25, n.3, p.699-707, 2001.

SOUZA, G.B.; NOGUEIRA, A.R.A; RASSINI, J.B. Determinação de matéria seca e umidade em solos e plantas com forno de microondas doméstico. São Carlos: EMBRAPA-CPPSE. Circular Técnica nº 33, Dezembro, 2002.

SOUZA, C.F.; MATSURA, E.E. Avaliação de sondas multi-haste segmentadas para o monitoramento da umidade do solo por meio da técnica de TDR. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, n. 1, p. 63-68, 2002.

SOUZA, C. F., MATSURA, E. E., FOLEGATTI, M. V., COELHO, E. F., OR, D., Sondas de tdr para a estimativa da umidade e da condutividade Elétrica do solo. **Irriga**, Botucatu, v.11, n.1, p. 12-25, janeiro-março, 2006.

SOUZA, L. C. D. SÁ, M. E. CARVALHO, M. A. C. MASUMI, H. SIMIDU. Produtividade de quatro cultivares de soja em função da aplicação de fertilizante mineral foliar a base de cálcio e boro. **Revista De Biologia E Ciências Da Terra**. V 8 - No 2 - 2º Semestre 2008

,

TAGLIAFERRE, C. **Desempenho do Irrigâmetro e de dois minievaporímetros para estimativa da evapotranspiração de referência**. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2006, Tese de Doutorado. 112 páginas.

TAVEIRA, M. R., SANTOS, M., TAVARES, A. C. S., ALVES Jr, J., EVANGELISTA, A. W. P., Determinação do conteúdo de água de solo pelo método da frigideira em um latossolo vermelho escuro. 2011.

TEIXEIRA, C. F. A., MORAES, S. O., SIMONETE, M. A., Desempenho do tensiômetro, tdr e sonda de nêutrons na determinação da umidade e condutividade hidráulica do solo. **R. Bras. Ci. Solo**, 29:161-168, 2005.

TOMMASELLI, J. T. G.; BACCHI, O. O. S. Calibração de um equipamento de refletometria de microondas para dois solos paulistas típicos. In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 25., 1995, Viçosa: UFV, 1995. V. 1, p. 24-26.

TOMMASELLI, J.T.G. Criteria for calibration of probes of TDR. In: MATSURA, E.E.; JAVAREZ JUNIOR, A.; GOMES, E.P. & SOUZA, C.F., eds. Technical applications of TDR in the agriculture. Campinas, FEAGRI/UNICAMPI, 2001. p.85-114.

TOPP, G. C.; DAVIS, J. L.; ANNAN, A. P. Electromagnetic determination of soil water content- measurements in coaxial transmission lines. **Water Resources Research**, v.16, n.3, p.574-582, 1980.

TORMENA, C.A.; BARBOSA, M.C.; COSTA, A.C.S.da; GONÇALVES, A.C.A.; Densidade, porosidade e resistência à penetração em Latossolo cultivado sob

diferentes sistemas de preparo do solo. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.59, n.4., 2002.

TRINTINALHA et al. Efeito da instalação e da variabilidade entre sondas no uso da técnica de TDR em um Nitossolo Vermelho Distroférico. **Acta Scientiarum** Maringá, v. 23, n. 5, p. 1165-1171, 2001.

VALERO, Roger Manuel., Uso da técnica da “TDR” na estimativa da umidade e condutividade elétrica em substratos orgânicos / Roger Manuel Mestas Valero. -- Campinas, SP: [s.n.], 2006.

VAZ, C.M.P.; MATSURA, E.E.; TORRADO, P.V. & BACCHI, O.O.S. Validação de 3 equipamentos de TDR (Reflectometria no Domínio do Tempo) para a medida da umidade de solos. São Carlos, Embrapa, 2004. 4p. (Comunicado Técnico, 61).

VIELMO, A.L, **limite superior da retenção da água no Solo: método de campo e método de Estimativa**. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, RS, 2008.

VIEIRA, M.J. & MUZILLI, O. Características físicas de um Latossolo Vermelho-Escuro sob diferentes sistemas de manejo. *Pesq. Agropec. Bras.*, 19:873-882, 1984.

VIEIRA, S. R; NASCIMENTO, P. C; SARVASI, F. O. C; MOURA, E.G. Umidade e temperatura da camada superficial do solo em função da cobertura morta por resteva de soja em plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.15, n.2, p.219-224, 1991.

VILLA NOVA, N.A. Estimativa da evapotranspiração no Estado de São Paulo. Piracicaba, 1967, 66p. Tese (Doutorado) - ESALQ-USP.

VILLA NOVA, N.A., REICHARDT, K. **Evaporação e evapotranspiração**. In: RAMOS, F. et al. Engenharia Hidrológica. Rio de Janeiro: ABRH/UFRJ, 1989. Cap. 3, p. 145-97.

VILLWOCK, R.; TAVARES, M.H.F. & VILAS BOAS, M.A. Calibração de um equipamento TDR em condições de campo. *Irriga*, 9:82-88, 2004.

VILELA, L. A. A. **Irrigação por autopropelido e pivô central**. Lavras: FAEPE, 1999. 82 p.

VOLPE, C.A.; CHURATA-MASCA, M.G.C. **Manejo da irrigação em hortaliças: método do tanque Classe A**. Jaboticabal: FUNEP, 1988. 19p.

XAVIER, A. A. P. **Comportamento da cultura da soja em função de resíduos culturais, mobilização do solo e irrigação, em semeadura direta** Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre (RS), Brasil Julho de 2005.

ZANETTE Syonei V. et al. Análise espacial da umidade do solo cultivado com soja sob dois sistemas de manejo. **R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental**, v.11, n.3, p.239–247, 2007.

WILLIAMS, G. The dielectrics discussion group (UK) and dielectrics society platforms for dielectrics research. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v.18, p.570-578, 2011.

APÊNDICES

Apêndice I

Tabela de análise da variância da umidade volumétrica para o perfil de 7,6 cm.

Causas de Variação	Grau de Liberdade	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F	P
Tratamentos	4	6.25463	1.56366	0.0121**	<0.010
Erro	15	1941.3828	129.42552		
Total	19	1947.6374			

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$)

* significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$)

ns não significativo ($p \geq .05$)

Tabela de análise da variância da umidade volumétrica para o perfil de 12 cm.

Causas de Variação	Grau de Liberdade	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F	P
Tratamentos	4	7.84967	1.96242	0.8778ns	>0.050
Erro	15	33.53555	2.23570		
Total	19	41.38522			

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$)

* significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$)

ns não significativo ($p \geq .05$)

Tabela de análise da variância da umidade volumétrica para o perfil de 20 cm.

Causas de Variação	Grau de Liberdade	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F	P
Tratamentos	4	5.81072	1.45268	0.5713ns	>0.050
Erro	15	38.14197	2.54280		
Total	19	43.95269			

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$)

* significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$)

ns não significativo ($p \geq .05$)

Apêndice II

Tabela de análise da variância (teste t), para lâmina bruta para diferentes métodos.

Causas de Variação	Grau de Liberdade	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	F	P
Tratamentos	8	59.77719	7.47215	0.1269**	-
Erro	45	2649.47907	58.87731		
Total	53	2709.25626			

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$)

* significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$)

ns não significativo ($p \geq .05$)