**USO DO TENSÍÔMETRO NO CONTROLE DA
IRRIGAÇÃO POR PIVÔ CENTRAL EM CULTURA DO FEIJOEIRO**
(Phaseolus vulgaris L.)

ANTONIO MELHEM SAAD

Geólogo

Orientador: PROF. Dr. PAULO LEONEL LIBARDI

Dissertação apresentada à Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Mestre em Agronomia. Área de Concentração: Irrigação e Drenagem.

P I R A C I C A B A
Estado de São Paulo - Brasil
Setembro - 1991

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Livros da
Divisão de Biblioteca e Documentação - PCAP/USP

Saad, Antonio Melhem

S111u Uso de tensiômetro no controle da irrigação por pivô
central em cultura do feijoeiro (Phaseolus vulgaris L.).
Piracicaba, 1991.
144p. ilus.

Diss. (Mestre) - ESALQ
Bibliografia.

1. Feijão - Balanço hídrico 2. Irrigação por pivô
central - Controle 3. Tensiômetro I. Escola Superior
de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba

CDD 631.7

USO DO TENSÍÔMETRO NO CONTROLE DA
IRRIGAÇÃO POR PIVÔ CENTRAL EM CULTURA DO FEIJOEIRO
(*Phaseolus vulgaris* L.)

ANTONIO MELHEM SAAD

Aprovado em: 31/10/1991

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Paulo Leonel Libardi ESALQ/USP

Prof. Dr. José Antonio Frizzone ESALQ/USP

Prof. Dr. Walter Rodrigues da Silva ESALQ/USP

PROF. Dr. PAULO LEONEL LIBARDI

Orientador

A MÁRCIA REGINA, minha esposa e a

MARIA LIGIA e MARIA CECÍLIA, minhas filhas.

DEDICO

*Ao Dr. ALVARO RODRIGUES DOS SANTOS,
pelo incentivo dado à pesquisa em tecnologia
de Irrigação no IPT.*

*Ao JOSÉ APARECIDO SILVÉRIO DOS SANTOS,
técnico Agrícola do Instituto de Pesquisas Tecnológicas
do Estado de São Paulo - IPT*

*Ao ANTONIO DE OLIVEIRA LIMA,
proprietário da Fazenda Recanto da Barcelona,
município de Guaira - SP*

AGRADECIMENTOS

Ao Departamento de Engenharia Rural da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", pela oportunidade de realização do curso de pós graduação.

Ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT e a Secretaria de Ciência, Tecnologia e Desenvolvimento Econômico - SCTDE, pelo financiamento deste trabalho de pesquisa.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa de estudo concedida.

Ao Prof. Dr. Paulo Leonel Libardi pela segura orientação neste trabalho, por sua amizade e pelos ensinamentos recebidos.

Ao Dr. Flavio B. Arruda, pesquisador do Instituto Agrônomo, por suas sugestões na fase experimental do trabalho e pelo gentil fornecimento dos dados agroclimáticos.

Ao corpo técnico da Seção de Irrigação e Drenagem do Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT: José Aparecido Silvério dos Santos, Márcio Lúcio Gonzaga, Sebastião Fernandes da Silva Jr. e Mário Lúcio Conti, por sua dedicação nos trabalhos de campo e laboratório.

Ao Dr. Andrés Enrique Lai Reyes, analista de sistemas do Centro de Informática na Agricultura - CIAGRI, por sua colaboração na realização da análise estatística através do programa computacional SAS.

As bibliotecárias Kátia M. de Andrade Ferraz, Eliana M. Garcia Sabino e Márcia Regina Migliorato Saad, pela orientação prestada na pesquisa bibliográfica e por sua revisão.

A Profa. Débora Fiuza Orsi, pela revisão do texto.

Aos colegas do curso de pós graduação, Cláudio Tomazela, Francisco Reinaldo Consigliero e Roberto Adolfo Boza Arce.

Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Rural que de alguma forma contribuíram para que este trabalho fosse realizado.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABELAS	xiii
RESUMO	xvi
SUMMARY	xviii
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1. Características Principais da Cultura do Fei- joeiro (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.)	6
2.1.1. Relações fisiológicas e hídricas	10
2.1.2. A evapotranspiração	16
2.2. O Controle da Irrigação	19
2.2.1. Tensiometria	22
2.3. Balanço Hídrico no Campo Com Uso de Tensiôme- tro	25
3. MATERIAL E MÉTODOS	28
3.1. Caracterização da Área Experimental	28
3.1.1. O clima	30
3.1.2. O solo	30
3.1.3. A planta	35
3.2. Arranjo Experimental	35
3.3. O Tensiômetro	41
3.4. O Sistema de Irrigação	43

	Página
3.5. Metodologia	44
3.5.1. Determinação do valor médio do potencial mátrico	46
3.5.2. Determinação da lâmina de água requerida	47
3.5.3. Determinação da lâmina bruta de água ..	48
3.5.4. Determinação da lâmina de água aplicada	49
3.5.5. Estimativa da uniformidade de distribuição de água e eficiência de irrigação	50
3.5.6. Estimativa da evapotranspiração do feijoeiro - método da FAO - (DOOREMBOS & KASSAN, 1979)	56
3.5.7. Cálculo do balanço hídrico com tensiômetro	59
3.5.8. Observações fenológicas	67
3.5.9. Determinação do rendimento da cultura .	67
3.5.10 Eficiência do uso da água (EUAD)	68
3.5.11 Estimativa do número mínimo e localização dos tensiômetros sob pivô central, através da análise de regressão linear múltipla.	68

	Página
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	70
4.1. Duração dos Estádios Fenológicos da Cultura ..	70
4.2. Parâmetros Hídricos do Solo	72
4.3. O Controle da Irrigação	73
4.3.1. Processo de umedecimento do solo	74
4.3.2. Processo de secagem do solo	83
4.4. Uniformidade de Distribuição de Água e Efi- ciência de Irrigação	86
4.5. Evapotranspiração da Cultura do Feijão	95
4.5.1. "Déficit" de água no solo e a evapo- transpiração (ETa)	102
4.6. Balanço Hídrico com o Uso do Tensiômetro	107
4.6.1. Os componentes do balanço hídrico	108
4.7. Rendimento da Cultura e Eficiência do Uso da Água	117
4.8. Variação da Distribuição de Água, Umidade, Po- tencial Mátrico e o Rendimento Relativo da Cultura ao Longo do Raio do Pivô Central	124
4.9. Estimativa do Número Mínimo e Localização dos Tensiômetros	127
5. CONCLUSÕES	129
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	132

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
1 Localização da área experimental na Fazenda Recanto da Barcelona, município de Guaíra - SP, Brasil.	29
2 Curva de retenção para o Latossolo Roxo textura muito argilosa. (Camada de 0 a 22,5 cm)	34
3 Curva de retenção para o Latossolo Roxo textura muito argilosa. (Camada de 22,5 a 30,0 cm)	34
4 Vista geral da área experimental, Fazenda Barcelona, Guaíra - SP.	37
5 Espaçamento entre duas baterias de tensiômetros e os respectivos coletores de água de irrigação.	37
6 Vista geral da disposição das baterias de tensiômetro e dos coletores de irrigação.	38
7 Esquema da parcela experimental.	40
8 Esquema do delineamento experimental.	40
9 Tensiômetro com manômetro de mercúrio.	41
10 Detalhe do manômetro de mercúrio do tensiômetro.	42
11 Diagrama esquemático da distribuição normal acumulada.	53
12 Fenologia da cultura.	72

Figura	Página
13 Valor médio do potencial mátrico ao longo do ciclo da cultura.	74
14 Armazenagem de água no solo: inicial, final e na capacidade de campo.	78
15 Potenciais mátricos (15 a. 30 cm) antes de cada irrigação.	82
16 Perfil da distribuição de água acumulada em 16 irrigações.	89
17 Distribuição normal acumulada das 16 irrigações segundo modelo WALKER (1979).	90
18 Eficiências das irrigações, segundo modelo de WALKER (1979).	94
19 Eficiências em função da lâmina adimensional. ...	95
20 Evaporação (ECA) e Evapotranspiração atual (ETa) diárias ao longo do ciclo da cultura.	101
21 Evapotranspiração referência (ETo) e evapotranspiração máxima (ETm) ao longo do ciclo da cultura.	101
22 Água disponível no solo para profundidade efetiva do sistema radicular de 30 cm ao longo do ciclo da cultura.	105

Figura	Página
23 Armazenagem de água no solo (da superfície até a profundidade efetiva do sistema radicular) ao longo do ciclo da cultura.	105
24 Fração da água disponível e o fator (1-p) de disponibilidade hídrica de DOOREMBOS & KASSAN (1979) ao longo do ciclo da cultura.	106
25 Componentes do balanço hídrico.	108
26 Evapotranspiração pelos métodos do balanço hídrico e tanque "classe A".	112
27 Evapotranspiração acumulada estimada pelo tanque "classe A" e pelo balanço hídrico a campo.	112
28 Evapotranspiração real estimada pelo balanço hídrico a campo.	113
29 Coeficiente de cultura e relação ET_a/ET_o	113
30 Variação da condutividade hidráulica e do gradiente de potencial total ao longo do ciclo da cultura.	116
31 Rendimento do feijoeiro ao longo do raio do pivô central.	121
32 Função de produção.	124
33 Variação da umidade, do potencial mátrico e da lâmina coletada, ao longo do pivô central.	125

Figura	Página
34 Variação do rendimento e das lâminas coletadas ao longo do pivô central.	127

LISTA DE TABELAS

Tabela	Página
1 Número de Referências bibliográficas selecionadas pelo sistema INFOAGRI - ESALQ/USP.	6
2 Atributos físicos do Latossolo Roxo distrófico, A moderado, textura muito argilosa.	31
3 Atributos químicos do Latossolo Roxo distrófico, A moderado, textura muito argilosa.	31
4 Umidade volumétrica, potencial mátrico e parâmetros da equação de van GENUCHTEN (1980).	33
5 Localização dos tensiômetros e coletores de água de chuva e irrigação.	39
6 Capacidade de aplicação de água do Pivô Central.	43
7 Lâminas de água aplicada e tempo de rotação do sistema.	44
8 Cálculo da condutividade hidráulica.	64
9 Fenologia da cultura.	71
10 Variação temporal do potencial mátrico, da umidade e da armazenagem, na fase de umedecimento do perfil do solo, na camada 0 a 22,5 cm.	76
11 Variação temporal do potencial mátrico, da umidade e da armazenagem, na fase de umedecimento do perfil do solo, na camada 22,5 a 30,0 cm. ...	77

Tabela	Página
12 Análise das eficiências de armazenagem calculada com base na variação de armazenagem da solução do solo.	79
13 Variação temporal do potencial mátrico, da umidade e da armazenagem na fase de secagem do perfil do solo, na camada de 0 a 22,5 cm.	84
14 Variação temporal do potencial mátrico, da umidade e da armazenagem na fase de secagem do perfil do solo, na camada de 22,5 a 30,0 cm.	85
15 Parâmetros relativos a uniformidade de distribuição de água.	87
16 Parâmetros de eficiência de armazenagem e aplicação de água, segundo WALKER (1979).	92
17 Estimativa da evapotranspiração de referência (ET _o), evapotranspiração máxima (ET _m) e da evapotranspiração atual (ET _a) segundo DOOREMBOS & KASSAN (1979).	97
18 Cálculo do fator K _s , do valor da capacidade, de água disponível do solo (W _m), da depleção de água no solo (D _p) e do valor D _p /W _m	103
19 Valores em mm de água dos componentes do Balanço hídrico.	109
20 Rendimento (kg/ha) e lâmina de água aplicada (mm)	118

Tabela	Página
21 Eficiência do Uso da água (EUA).	120
22 Valores adimensionais de lâmina de água, potencial mátrico e rendimento relativo ao longo do raio do pivô central, para a cultura do feijão..	122

USO DO TENSÍÔMETRO NO CONTROLE DA
IRRIGAÇÃO POR PIVÔ CENTRAL EM CULTURA DO FEIJOEIRO

(*Phaseolus vulgaris* L.)

Autor: ANTONIO MELHEM SAAD

Orientador: PROF. Dr. PAULO LEONEL LIBARDI

RESUMO

O principal objetivo deste trabalho foi avaliar, a viabilidade técnica do tensiômetro como equipamento e método de controle de irrigação em pivô central. Para tanto, procurou-se avaliar o ajuste da curva de retenção pela equação de GENUCHTEN (1980), comparar o comportamento da evapotranspiração pelos métodos do balanço hídrico usando tensiômetros e do tanque "Classe A", quantificar perdas por drenagem profunda e analisar os efeitos da distribuição da água no potencial mátrico, finalmente, estimar a quantidade mínima de baterias de tensiômetro e sua localização sob o pivô central. O experimento foi conduzido no município de Guaíra (SP) em área de Latossolo Roxo (Typic Haporthox) com cultura de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.). Foram instaladas 20 estações tensiométricas e 60 coletores de água de chuva e irrigação ao longo de uma transeção de 300 metros na direção radial do pivô. O controle da irrigação foi realizado com

base na média ponderada dos 20 valores diários de potencial mátrico a 15 cm de profundidade, tendo como fator de ponderação a fração de área representativa de cada tensiômetro. O nível crítico de potencial mátrico foi considerado constante em todo ciclo da cultura e seu valor definido em $-0,06$ MPa. Foram feitas 16 irrigações sob este controle. Os resultados obtidos permitiram verificar que (i) o modelo de GENUCHTEN (1980) se ajustou adequadamente aos dados de análise de retenção de água o que facilitou a estimativa da depleção da água no solo; (ii) a uniformidade de distribuição de água pelo pivô, mostrou que houve um decréscimo de aplicação de água, do centro à extremidade, que pôde ser aferido através das leituras dos tensiômetros; (iii) a drenagem profunda correspondeu a, aproximadamente, 10% do valor da lâmina média aplicada ao longo do ciclo da cultura; (iv) a evapotranspiração real da cultura, calculada pelo balanço hídrico, foi 30% superior à estimada pelo método do tanque "classe A"; (v) quatro foi o número estimado de baterias de tensiômetro, localizadas a 7,5 m, 52,5 m, 82,5 m e 277,5 m do ponto do pivô central. Sendo assim, concluiu-se que o tensiômetro é tecnicamente viável como instrumento e método de controle da irrigação por pivô central.

USE OF THE TENSIOMETER TO SCHEDULE
THE CENTER PIVOT IRRIGATION IN CROP BEANS

(*Phaseolus vulgaris* L.)

Author: ANTONIO MELHEM SAAD

Adviser: PROF. Dr. PAULO LEONEL LIBARDI

SUMMARY

The main objective of this work was to evaluate the technical viability of the tensiometer as an instrument and as a method of irrigation control. For this, the following was done: fitting of the retention curve with GENUCHTEN (1980) equation; comparison of the evapotranspiration behaviour by the water balance using tensiometers and Class A pan methods; quantification of deep drainage losses; analysis of the effects of water distribution on matric potential; and finally to estimate the minimum number of tensiometers and its localization under the pivot. The experiment was carried out in the county of Guaira, state of São Paulo, Brazil (495 m of altitude, 20° 27' 30" S and 48° 19' 30" W) in an area of a Red Latosol (Typic Haporthox) with bean (*Phaseolus vulgaris* L.) crop. Twenty tensiometric stations and 60 rain and irrigation collectors were installed along a transect of

300 m in the radial direction of the pivot. The irrigation control was done with basis on the pondered mean of the 20 values of daily matric potential at 15 cm of soil depth; the representative area of each tensiometer was used as the weight for the pondered mean. The matric potential critical level was considered constant for the whole cycle of the crop being its value fixed in $-0,06$ MPa. Sixteen irrigations were carried out under this control. The results obtained permitted to verify that (i) the GENUCHTEN (1980) model fitted adequately to data of water retention analysis, making easier the estimative of the soil water depletion; (ii) the uniformity of distribution of the water by the pivot showed that there was a decrease of water application from the centre to the border which could be checked through the readings of tensiometers; (iii) the deep drainage was about 10% of the mean water head value applied along the crop cycle; (iv) the actual evapotranspiration calculated by the water balance method was 30% higher than the estimated one by the Class A pan method; (v) the number of tensiometers to be used under the center pivot was estimated to be four (7,5 m, 52,5 m, 82,5 m and 277,5 m from the center of the pivot). These conclusions prove that the tensiometer is technically viable as an instrument and a method of irrigation scheduling with center pivot.

1. INTRODUÇÃO

A irrigação constitui alternativa tecnológica viável para a melhoria do rendimento da cultura do feijão no Brasil. O acréscimo de produtividade do feijão irrigado quando comparado ao não irrigado é da ordem de 260% (AZEVEDO & CAIXETA, 1986).

O Estado de São Paulo possui, segundo CAMARGO *et alii* (1990), uma área irrigada de 171.300 ha. A cultura do feijão ocupa 33% desse total. O município de Guaíra possui a maior área irrigada de feijão, com 9.000 ha.

O método predominante de irrigação em Guaíra, é a aspersão (171 equipamentos pivô central e 34 outros aparelhos do tipo autopropelido, aspersão convencional e linear móvel). O equipamento pivô central é responsável pela irrigação de 83,4% da área irrigada do município, representando 5,64% de todos os equipamentos instalados no Brasil.

A expansão da irrigação no município de Guaíra deu-se durante o final da década de 70 e início da década de 80, sendo responsável pelo aumento da produção de grãos, sem a necessidade de utilização de novas áreas de cultivo, implicando no uso mais intensivo dos recursos solo e água. Como consequência deste fato, houve um incremento no índice

de produtividade das culturas, valorização e fixação do homem no campo, ampliação e manutenção da oferta de mão-de-obra no município.

A prática da tecnologia de irrigação trouxe um equilíbrio nos fatores de desenvolvimento econômico e nas relações entre o capital e o trabalho, proporcionando melhorias econômicas e de infra-estrutura para a sua população.

Este cenário desenvolvimentista e equilibrado, proporcionado pela introdução desta nova tecnologia, não foi devidamente acompanhado pela assistência técnica qualificada e pela pesquisa. Como consequência de tal fato, no final da década de 80, os índices de produtividade das culturas começaram a sofrer declínio motivado, principalmente, pelo aparecimento de doenças e pragas surgidas pelos efeitos da degradação física, química e biológica do solo. Esta situação necessitará, a curto prazo, de informações técnicas referentes ao meio físico e ao desempenho dos equipamentos de irrigação, para possibilitar o uso racional da água e da energia no sistema agrícola.

Neste sentido, o controle de irrigação adequado, proporcionará, a médio prazo, a permanência do equilíbrio nas relações entre a ação humana e a natureza, de forma a minimizar os efeitos de tal intervenção.

O objetivo geral deste trabalho é o de avaliar, sob condições de campo, a viabilidade técnica do tensiômetro com manômetro de mercúrio como equipamento e método de controle de irrigação em pivô central, num Latossolo Roxo

(Typic Haporthox) com cultura de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), no município de Guaíra.

São considerados objetivos específicos deste trabalho:

- a) avaliar o comportamento da curva de retenção da água no solo, como método de determinação da lâmina de água de irrigação;
- b) determinar o valor da drenagem profunda da cultura do feijão e suas causas;
- c) estimar a evapotranspiração da cultura do feijão pelo método do balanço hídrico com tensiômetro e pelo método proposto por DOOREMBOS & KASSAN (1979);
- d) avaliar a uniformidade de distribuição de água e a eficiência de irrigação do pivô central associadas com o potencial mátrico, a umidade no perfil do solo e o rendimento da cultura.
- e) avaliar o número e localização de tensiômetros sob o pivô central.

2. REVISÃO DE LITERATURA

Para a revisão da literatura pertinente, foram usadas diferentes formas e fontes de recuperação da informação bibliográfica.

Inicialmente, foi estabelecido o âmbito da pesquisa no que diz respeito ao assunto a ser levantado e ao período abrangido. Foram selecionados 4 assuntos:

- a) feijoeiro/necessidades hídricas;
- b) controle da irrigação/tensiômetro;
- c) balanço hídrico; e
- d) sistema de irrigação mecanizado/pivô central.

Para estes assuntos, determinou-se um período de aproximadamente 20 anos (1970/1990).

A primeira parte da busca foi feita manualmente através de fontes secundárias, como os catálogos da Divisão de Biblioteca e Documentação (DIBD) da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (ESALQ). Outras fontes, como os Resumos Analíticos do Centro Interamericano de Agricultura Tropical (CIAT), também foram objeto de consulta.

Como resultado desta primeira etapa da pesquisa foi possível ter acesso a vinte teses e dissertações, relacionadas direta e indiretamente com os assuntos, e a 22

títulos de periódicos, cujos artigos foram relevantes ao objeto do trabalho.

A segunda etapa do trabalho constou da utilização do serviço INFOAGRI da DIBD - ESALQ/USP.

Este serviço acessa, aproximadamente, 200 bancos de dados que cobrem a literatura mundial. Um destes bancos de dados é o "DIALOG Information Retrieval Service". Das 350 bases de dados associadas ao "DIALOG", foram escolhidas duas. A primeira, dentro da área da agricultura e nutrição, denominada "CAB ABSTRACTS"; e a segunda, dentro da área da energia e meio ambiente, denominada "WATER RESOURCES ABSTRACTS".

Para recuperação das referências bibliográficas de interesse, foi desenvolvida uma estratégia de busca, definidas palavras-chave na língua inglesa caracterizando o assunto objeto da revisão de literatura.

As palavras-chave especificadas neste trabalho foram pivô central, tensiômetro e controle de irrigação, as quais, devidamente combinadas, possibilitaram restringir adequadamente os aspectos específicos do assunto desejado na revisão de literatura.

Inicialmente, o trabalho foi desenvolvido através da busca das referências bibliográficas que apresentassem as palavras-chave nos seus títulos e descritores, combinadas da seguinte forma: pivô central E tensiômetros E controle de irrigação. Após a constatação de que essa seleção não indicou nenhuma referência, adotou-se uma nova orde-

nação. A segunda seleção combinou pivô central OU tensiômetro E controle de irrigação. A Tabela 1 apresenta o resultado desse processo de seleção.

Tabela 1 - Número de Referências bibliográficas selecionadas pelo sistema INFOAGRI - ESALQ/USP.

PALAVRAS-CHAVE	NÚMERO DE REFERÊNCIAS	
	CAB ABSTRACTS (1972-1990)	WATER RESOURCES ABSTRACTS (1968-1990)
Pivô Central (PC)	139	87
Tensiômetro (T)	157	232
Controle de Irrigação (CI)	1697	125
PC (E) T (E) CI	0	0
PC (OU) T (E) CI	25	6

2.1. Características Principais da Cultura do Feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L)

A cultura do feijoeiro, é originária da América Central, onde a média de precipitação pluvial é de 500 a 1800 mm (COSTA, 1986). KAPLAN (1965)¹, citado por VIEIRA (1988), informa que pesquisas arqueológicas conduzidas no México indicaram que o feijão foi domesticado nesse país há cerca de 7000 anos.

¹ KAPLAN, L. Archeology and domestication in American *Phaseolus* (Beans). Economy Botany, New York, 19(4): 358-368. 1965.

FANCELLI (1990) salienta que a espécie *Phaseolus vulgaris* L. apresenta baixa tolerância às condições dos trópicos úmidos e constitui o tipo de feijão mais difundido e de uso mais generalizado no mundo, principalmente no Brasil. Conforme este mesmo autor, esta espécie apresenta acentuada variação de hábitos de crescimento, formas de sementes, cores de tegumento e textura de vagens devido à intensa pressão de seleção e à expansão de cultivo a distintas faixas de temperatura ocorridas na América Central e América do Sul, desde a sua domesticação.

No Brasil, apesar do risco de ocorrência de baixas temperaturas no inverno, o plantio nesta época com irrigação proporciona garantia de produção com elevados rendimentos. Além disto, este período do ano nas regiões Sudeste e Centro Oeste possibilita, devido à própria condição climática (temperaturas amenas e umidade relativa baixa), condições excepcionais para a produção de sementes certificadas ou fiscalizadas, que alcançam melhores preços que os grãos destinados ao consumo, CAIXETA *et alii* (1981)¹ citado por MOREIRA *et alii* (1988).

As melhores temperaturas para o desenvolvimento adequado da cultura oscilam, segundo DOOREMBOS & KASSAN (1979), entre 15°C e 20°C (temperatura média diurna). A mínima temperatura média para seu crescimento é de 10°C e a

¹ CAIXETA, T.J.; VIEIRA, G.; BARTHOLO, G.F. A terceira época de plantio do feijão. Viçosa. Universidade Federal de Viçosa, 1981. 4p. (Informe Técnico, 15).

máxima de 27°C. Temperaturas elevadas aumentam o conteúdo de fibras das vagens. A germinação, segundo estes autores, necessita de uma temperatura no solo de 15°C ou maior e, com isto, a emergência da cultura se dá em 12 dias. À temperatura de 25°C, a emergência do feijoeiro se dá em 7 dias no máximo.

A temperatura média ideal para a cultura do feijão corresponde a 21°C, sendo consideradas regiões aptas para seu cultivo aquelas que apresentam temperaturas médias entre 17°C e 29°C (FANCELLI, 1990).

Em termos de desenvolvimento radicular, STONE *et alii* (1988) e FANCELLI (1990) afirmam que o desenvolvimento do sistema radicular do feijoeiro é de natureza pivotante e de distribuição superficial das raízes, onde 80 a 90% encontram-se localizados nos primeiros 20 cm do solo.

As fases de desenvolvimento na cultura do feijão não apresentam, de acordo com FANCELLI (1990), nítida separação, principalmente quando consideradas plantas de hábito de crescimento indeterminado. O que se leva em conta, segundo este mesmo autor, é a existência, basicamente, de duas fases distintas e sucessivas, denominadas Fase Vegetativa e Fase Reprodutiva, diferenciadas entre si pela manifestação de diferentes eventos bioquímicos, morfológicos e fisiológicos. Apesar desta diferença de separação das fases, GEPTS & FERNANDEZ (1982)¹ também citados por FANCELLI

¹ GEPTS, P. & FERNANDEZ, F. Etapas de desarrollo de la planta de frijol comun. Cali, Colombia, CIAT, 1982. 10p. (mimeografado).

(1990), identificaram dez etapas relativas ao desenvolvimento do feijoeiro, a saber:

V0 = germinação.

V1 = cotilédones de 50% das plantas aparecem ao nível do solo.

V2 = folhas primárias de 50% das plantas estão desdobradas.

V3 = a primeira folha trifoliada de 50% das plantas está desdobrada.

V4 = a terceira folha trifoliada de 50% das plantas está desdobrada.

R5 = aparecem os primeiros botões florais em 50% das plantas.

R6 = primeira flor aberta em 50% das plantas.

R7 = aparecimento das primeiras vagens em 50% das plantas ao murchar a corola.

R8 = primeira vagem cheia de sementes em 50% das plantas.

R9 = modificação da cor das vagens em 50% das plantas.

Por outro lado, DOOREMBOS & KASSAN (1979) estabelecem cinco fases para o ciclo da cultura:

0 = estabelecimento (10 a 15 dias).

1 = vegetação (20 a 25 dias).

2 = floração (15 a 25 dias).

3 = formação das vagens (25 a 30 dias).

4 = maturação (20 a 25 dias).

O total de dias do ciclo, segundo esses autores, varia de 90 a 120 dias. Os valores dos coeficientes de cultura (Kc) para as diversas fases são: 0,3 a 0,4; 0,7 a 0,8; 1,05 a 1,20; 0,65 a 0,75, respectivamente. A eficiência de utilização de água (EUA) da cultura é da ordem de 0,3 a 0,8 kg/m³ em relação a grãos com 10% de umidade.

2.1.1. Relações fisiológicas e hídricas

A maioria dos estudos realizados com leguminosas indica que esta classe de plantas é muito sensível ao "déficit" hídrico durante os períodos de florescimento e enchimento de grãos, observando-se significativa redução nos componentes da produção.

Os trabalhos de ROBINS & DOMINGO (1956); MIRANDA & BELMAR (1977); MAGALHÃES & MILLAR (1978); STANSELL & SMITTLE (1980) e GARRIDO & TEIXEIRA (1979)¹ (este último citado por PURCINO, 1982) confirmam a redução da produção da cultura do feijão, em função da intensidade do estresse hídrico, do tempo de ocorrência e da fase de desenvolvimento da cultura na qual o estresse é imposto. Nesses trabalhos foi possível observar que, dependendo do tipo de experimento e da forma de ocorrência do estresse hídrico, os valores percentuais de redução chegam a variar de 52% a 20%, para

¹ GARRIDO, M.A.T. & TEIXEIRA, H.A. Efeito de diferentes níveis de umidade do solo sobre o rendimento do feijoeiro comum na região sul de Minas Gerais. EPAMIG, B. Horizonte, M.G. 1978.

valores de potencial mátrico da solução do solo entre -1,2 e -0,045 MPa, respectivamente.

A ocorrência de valores de potencial mátrico maiores do que -0,06 MPa, dependendo do estágio fenológico da cultura e da demanda evaporativa da atmosfera, não afeta significativamente o rendimento do feijoeiro. Esta afirmação é comprovada pelos resultados obtidos por GARRIDO *et alii*¹, citado por PURCINO (1982). Nesse trabalho, onde o rendimento médio foi superior a 2800 kg/ha, não se observaram diferenças significativas quando o potencial mátrico nos primeiros 30 cm de profundidade foi mantido a -0,06 MPa, -0,045 MPa e -0,02 MPa. Os autores verificaram ainda que 90% das raízes encontravam-se nos primeiros 60 cm de profundidade.

O efeito da forma e local de plantio da cultura do feijão irrigado por sulcos, sobre o comportamento da produção, foi estudado por BASCUR & FRITSCH (1975). Esses autores, através de delineamento experimental com tratamentos executados com sulcos normais, sulcos alternados, sulcos com a cultura cultivada no talude e sulcos em cada duas fileiras de plantas associados a dois níveis de irrigação (-0,075 e -0,04 MPa), concluíram que os componentes da produção não foram afetados de forma significativa pelos tratamentos e suas combinações. Observou-se também que a massa de grãos aumentou quando irrigado a -0,04 MPa.

¹ GARRIDO, M.A.T.; MARINATO, R.; PURCINO, J.R.; LIMA, C.A.S. Efeito de diferentes regimes de irrigação no rendimento do feijoeiro comum na região norte de Minas Gerais (no prelo).

O nível do estresse hídrico afeta também de forma significativa a evapotranspiração. STANSEL & SMITILE (1980) concluíram que a eficiência do uso da água pela cultura (kg/m^3) foi proporcional aos níveis de potencial mátrico a que o solo sob estas culturas foi submetido, nas suas diferentes fases de desenvolvimento, durante o controle da irrigação. O valor da eficiência do uso da água decresceu com a diminuição do valor do potencial mátrico, ou seja, 0,62; 0,45 e 0,40 kg/m^3 , para -0,025, -0,050 e -0,075 MPa, respectivamente. Segundo MILLAR & GARDNER (1972), citados pelos autores, a transpiração do feijoeiro é altamente afetada pela tensão da solução do solo. No potencial mátrico de -0,040 MPa a transpiração da cultura foi somente 40% da transpiração, verificada em potencial mátrico de -0,025 MPa. A produção de matéria seca decresceu 50%, aproximadamente, em função da diminuição do valor do potencial mátrico.

Altas frequências de irrigação, para solos de mesma textura, não aumentam a produção do feijoeiro, quando comparadas às frequências consideradas normais, segundo RESENDE *et alii* (1981). Esses autores concluíram que o aumento da taxa de evaporação da água na superfície do solo faz com que o valor da taxa de evapotranspiração da cultura seja maior. Os valores da evaporação direta da superfície do solo chegam a ser da ordem de 7 a 21% da taxa de evapotranspiração da cultura, fazendo com que a eficiência de irrigação diminua, tendo, por consequência, um aumento nos gastos com energia do sistema.

A textura do solo condiciona a frequência de irrigação, em função dos seus principais atributos físico-hídricos, como por exemplo a condutividade hidráulica e a capacidade de armazenagem da solução do solo. Solos com textura arenosa tendem a ser irrigados com altas frequências de irrigação. Essa afirmação é comprovada através do trabalho de MILLER & BURKE (1983). Esses autores conduziram estudo para avaliar a resposta do feijoeiro à quantidade de água aplicada diariamente por aspersão (alta frequência de irrigação). Observaram que nos solos de textura arenosa houve aumento de rendimento da cultura quando a aplicação diária de água equivaleu a 100% do valor da evapotranspiração estimada. Nos solos de textura mais argilosa o rendimento da cultura não foi reduzido quando a aplicação diária de água por aspersão foi menor do que a estimativa da evapotranspiração. Nos solos arenosos com limitada capacidade de armazenagem da solução, este procedimento não pode ser realizado sem que haja redução no rendimento.

Quanto à importância do momento de se realizar a irrigação, HOSTALÁCIO & VÁLIO (1984a) avaliaram o desenvolvimento dos frutos de feijão em condições de laboratório, sob diferentes regimes de irrigação. Constataram, para o cultivar "Goiano Precoce", que as plantas com frequência de irrigação de duas vezes por semana apresentaram melhor desenvolvimento do volume e ganho de massa dos frutos. HOSTALÁCIO & VÁLIO (1984b) também observaram que a frequência de irrigação afeta o comportamento das plantas e que, sob con-

dição de estresse, os valores dos componentes da produção são reduzidos. As plantas que tiveram frequência de irrigação duas vezes por semana apresentaram melhor desenvolvimento, maior taxa de crescimento relativo e menor decréscimo do rendimento.

Com o objetivo de comparar o efeito do estresse hídrico em cultivares distintos de feijão, MACK & VARSEVELD (1982) e BONANNO & MACK (1983) chegaram a conclusões distintas, embora em anos diferentes, a respeito dos cultivares "Oregon 1604" e "Galamor". Os primeiros autores concluíram que para a condição de estresse hídrico (cultura irrigada quando o potencial mátrico se encontrava a $-0,25$ MPa), o cultivar "Galamor" foi mais produtivo. Conclusão oposta foi obtida por BONANNO & MACK (1983), que para estresse hídrico estabelecido em potenciais mátricos variando de $-0,36$ a $-0,11$ MPa, encontraram maior rendimento no cultivar "Oregon 1604".

Um dos fatores importantes para aumentar a produtividade das culturas irrigadas é proporcionar ao sistema radicular da cultura condições ótimas de desenvolvimento, de maneira que a exploração da solução do solo pelas raízes ocorra da forma mais eficiente possível. Pesquisas neste sentido são raras no Brasil, ou praticamente inexistentes. Com o objetivo de correlacionar o efeito de valores prefixados de lâmina e frequência de irrigação com o rendimento e densidade de raízes do feijoeiro comum, SILVEIRA *et alii* (1984) realizaram experimento na safra de inverno de

1982 com a linhagem CNF-0010. Os tratamentos consistiram em irrigações com lâminas de 2, 4 e 6 mm/dia e frequência de irrigação de 1, 4, 7 e 10 dias. Os resultados obtidos indicaram que a produção de grãos foi mais afetada pela lâmina de água do que pela frequência de irrigação, sendo que as maiores produções foram obtidas com lâminas de água mais altas. A produção decresceu linearmente com o aumento da frequência de irrigação, nas lâminas de 4 e 6 mm/dia, e a maior densidade média de raízes ocorreu na lâmina de 4 mm/dia e foi decrescente com o aumento do intervalo de irrigação, em todas as lâminas de água aplicadas.

Diferenças fundamentais existem no valor da profundidade efetiva de extração de solução pelas raízes das culturas em função de solos de clima temperado e de clima tropical. Enquanto nos solos tropicais a profundidade efetiva não ultrapassa 0,30 m, em solos de clima temperado estes valores chegam ser superiores a 1,5 m. Para confirmar esta assertiva, TOSSO (1988) conclui que para os solos de Davis, Califórnia, EUA, o feijoeiro extraiu água até a profundidade de 225 cm. Do total da água extraída, entre 20% e 50% foram provenientes de camadas abaixo de 105 cm.

STONE et alii (1988), estudando o efeito da tensão da água no solo sobre a produtividade e crescimento do feijoeiro, sob seis tratamentos (-0,075; -0,0625; -0,050; -0,0375; -0,0250 e -0,0125 MPa) e duas profundidades de medição do potencial mátrico (15 e 30 cm), concluíram que solos com perfil homogêneo quanto à textura e retenção de água

não apresentaram diferenciação em relação à produtividade, quando se controlava o potencial mátrico a 15 ou a 30 cm de profundidade. Os componentes da produção, número de vagens por planta e de grãos por vagem, decresceram à medida em que as irrigações foram feitas a potenciais mátricos mais negativos. A produção de grãos também decresceu com o incremento da tensão da água no solo, sendo este decréscimo dependente da demanda evaporativa do ambiente.

2.1.2. A evapotranspiração

A evapotranspiração da cultura pode ser estimada por diferentes metodologias. A utilização de lisímetros, o balanço de água no solo e o balanço de energia combinado com a fórmula aerodinâmica, proposto por Penman, podem ser considerados como métodos diretos. O método do tanque "classe A", conforme DOOREMBOS & KASSAN (1979) e as equações empíricas de Blaney-Criddle, Hargreaves e Thornthwaite são considerados indiretos.

Após comparar 9 metodologias para estimar a evapotranspiração, STANHILL (1961) recomendou o tanque "classe A" para estimativas do consumo de água em Israel, por se apresentar como um método preciso, prático, econômico e capaz de fornecer valores que refletem os processos meteorológicos envolvidos na evapotranspiração. ENCARNAÇÃO (1980), utilizando-se de evapotranspirômetro com lençol freático fixo, verificou que a evapotranspiração obtida para

o feijão através desta metodologia difere estatisticamente ao nível de 5% dos métodos do tanque "classe A" e de Penman.

A evapotranspiração do feijoeiro tem sido determinada por diversos pesquisadores em diferentes localidades, utilizando os mais variados métodos. CAIXETA (1978) afirma que em Monte Alegre do Sul e Ribeirão Preto foi observado um consumo de água de 2,5 e 3,5 mm diários, respectivamente. Em Minas Gerais, segundo este autor, o cultivar Jalo EEP 558, plantado em maio na região Norte do Estado, apresentou melhores rendimentos quando se aplicou lâmina de água total de 400 mm, resultando em média, 5 mm/dia. No sul do Estado o autor afirma que o requerimento de água tem sido menor, e maiores rendimentos foram obtidos com 300 mm de água por ciclo. Isto equivale a uma média de 3,2 mm/dia. Assinala, também, que maiores quantidades de água tenderam a diminuir a produção.

REICHARDT *et alii* (1974), estudando o movimento de água em solo cultivado com feijoeiro, tendo como objetivo o estabelecimento de um balanço hídrico completo, registraram, para as condições de Piracicaba - SP, uma evapotranspiração real média, durante 48 dias do ciclo, de 3,45 mm/dia. LUCHIARI JR. (1978) estimou uma evapotranspiração real média para Piracicaba desde o plantio até a fase de maturação dos frutos de 3,06 mm/dia.

SILVEIRA & STONE (1979), calculando o balanço hídrico do feijoeiro em Latossolo Vermelho-Amarelo de cerrado, a 60 cm de profundidade encontraram valores de evapo-

transpiração para o período estudado (75 dias) de 220,47 mm. Nos diversos estádios da cultura, da germinação ao início da floração, da floração e do desenvolvimento de vagens à maturação, os valores foram respectivamente, 3,2; 3,2 e 1,7 mm/dia. FRIZZONE *et alii* (1982), utilizando o método do balanço de água no solo, encontraram uma evapotranspiração real média de 5,2 mm/dia, nos últimos 60 dias do ciclo do feijoeiro, nas condições climáticas de Ilha Solteira - SP. CALVACHE & GARCIA (1987) em solos francos arenosos cultivados com feijão no Equador, determinaram os componentes do balanço hídrico deste cultivo. A evapotranspiração da cultura foi estimada pelo balanço de massas, com base em determinações periódicas (5 dias) da umidade volumétrica do solo mediante a sonda de nêutrons e do potencial mátrico através de tensiômetros. A evapotranspiração máxima para o ciclo da cultura foi de 4,9 mm/dia durante a formação da vagem, e seu valor acumulado para o ciclo da cultura foi de 263,09 mm. LOUREIRO *et alii* (1990), em experimento realizado em solo classificado como Podzólico Vermelho-Amarelo Câmbico fase terraço, em Viçosa, MG, obtiveram 2,3 mm/dia de consumo máximo para a cultura na fase de início da floração até o amadurecimento, irrigando com 100% da evapotranspiração do tanque "classe A".

2.2. O Controle da Irrigação

A definição, fatores e os objetivos do controle de irrigação foram abordados por JENSEN (1981). O autor define controle de irrigação como atividade de planejamento e tomada de decisão que o agricultor irrigante deve assumir durante o desenvolvimento da cultura. Inclui como fatores que influenciam a tomada de decisão: i) valor atual e a previsão da disponibilidade de água do solo para um período de tempo de 5 a 10 dias após a última irrigação; ii) estimativa de um possível atraso na data da irrigação e meios de se evitar o efeito adverso do estresse de água na planta; iii) quantificação do volume de água aplicado de forma a se obterem elevadas eficiências de irrigação; iv) as consequências sobre os efeitos de se irrigar fora do momento exato ou de se aplicarem volumes que provoquem excesso ou "déficit" de água na cultura. Dentre os objetivos do controle da irrigação, enfatiza "racionalizar o uso da energia, otimizar a umidade do solo para a colheita da cultura, estabelecer a umidade adequada para o plantio da safra agrícola, otimizar a capacidade de armazenagem de água do solo entre duas precipitações pluviais".

STEGMAN et alii (1983) associam o conceito de controle de irrigação a um objetivo econômico apropriado. Relacionaram a maximização do rendimento da cultura por unidade de água aplicada ao controle da irrigação em locais onde há limitação de disponibilidade do recurso hídrico. A

maximização do lucro líquido e a minimização dos gastos de energia são outros objetivos propostos.

A classificação das técnicas de controle de irrigação podem ser sistematizadas: i) com base nos atributos físico-hídricos do solo; ii) com base na fisiologia das plantas; iii) no cômputo do balanço de água na zona radicular; e iv) em modelos climatológicos.

O momento da irrigação pode ser definido, segundo BERNARDO (1986), tanto pelo sintoma como pela medição da deficiência de água na planta. Também pode ser determinado pela disponibilidade de água no solo, pela evapotranspiração real, pelo turno de rega e pelo balanço de água no solo. x

MARQUELLI *et alii* (1986) trazem informações dirigidas às culturas de hortaliças, no Brasil Central; AZEVEDO *et alii* (1986), para a região do cerrado, e ARRUDA (1987), em São Paulo, para cereais em geral. Esses autores indicam os métodos do tanque "classe A" e do tensiômetro. SILVA (1988) sumarizou as principais técnicas hidroedáficas em uso no Brasil e propõe orientações dirigidas às principais grandes culturas da região do cerrado. SCALOPPI (1985) apresenta critérios para racionalizar a irrigação com base no índice de estresse hídrico, definido por HILLER (1974).

FOLEGATTI (1987) monitorou a cultura do feijoeiro com um microprocessador portátil denominado "Scheduler", através de sensores de medidas instantâneas da temperatura da copa das plantas, radiação solar, temperatura am-

biente e umidade relativa do ar. Este equipamento possui um algoritmo embutido que calcula o índice de estresse das culturas indicando, ao atingir determinado valor, o momento de irrigar.

BRONER (1990) sugere que o manejo de irrigação pode ser executado por um equipamento denominado atmômetro modificado. Segundo o autor, o atmômetro mede a quantidade de água evaporada, à atmosfera, através da superfície de uma cápsula de cerâmica porosa. O atmômetro modificado consiste numa cápsula de cerâmica porosa coberta com lona verde rugosa, que simula as perdas de água através da parede superficial das folhas de alfafa, quando se encontra em pleno crescimento. Quando o autor comparou diferentes medidas de evapotranspiração, obtidas pelo atmômetro, com o método de Penman, os resultados mostraram que a variabilidade entre os atmômetros é pequena quando seu espaçamento é reduzido, e a evapotranspiração estimada pelo atmômetro modificado é muito similar às obtidas pelo método de Penman.

LAMBERT *et alii* (1981), em solos de baixa capacidade de água disponível no sudeste dos Estados Unidos, compararam 3 técnicas de controle de irrigação (balanço de água no solo através de microcomputador, evaporação pelo tanque "classe A" modificado e tensiômetro) para a cultura do milho sob irrigação, em pivô central. O resultado desta pesquisa mostrou que os métodos de controle de irrigação, quando comparados à testemunha, apresentaram incrementos médios de 89,2%; 79,3% e 70,4% para os métodos de controle por

tensiômetro, tanque de evaporação e balanço de água no solo, respectivamente.

2.2.1. Tensiometria

O tensiômetro, como instrumento de controle indireto da irrigação, foi recomendado por diversos autores: FISCHBACH & SCHLEUSENER (1961)¹ citados por STEGMAN *et alii* (1983); TAYLOR (1965); POOLEY (1973); SMAJSTRLA & KOO (1986); CASSEL & KLUTE (1986); AZEVEDO *et alii* (1986); MAROUELLI *et alii* (1986); SAAD *et alii* (1988); DOURADO NETO (1990).

Apesar de ser indicado por diversos autores para ser um equipamento no controle da irrigação, a literatura é escassa em trabalhos técnicos que se utilizam do tensiômetro para o controle da irrigação em sistemas de irrigação por aspersão mecanizados como o pivô central. Este fato pode ser explicado por ser o tensiômetro um equipamento de leitura pontual, envolvendo grandes dificuldades no equacionamento da variabilidade espacial do solo. A maior quantidade de trabalhos com controle de irrigação em pivô central é relativa ao uso do tanque de evaporação tipo "classe A" como indicador do momento e da água aplicada.

¹ FISCHBACH, P. E. & SCHLEUSENER, R. E. Tensiometers a tool to help control irrigation water. Univ. of Nebr. Agr. Expt. Sta. Lincoln, Ext. Cir. 61-716, 8p.

LONG & HUCK (1979), MARTHALER *et alii* (1983), LONG (1984) foram responsáveis pelo avanço tecnológico do tensiômetro, desenvolvendo esse equipamento com transdutor de pressão para leitura direta e automatizada do potencial mátrico. Este desenvolvimento possibilitou a automação do controle da irrigação em sistemas de irrigação localizada de alta frequência. PIZZARRO (1986) cita, como problemas práticos da automatização destes sistemas, a dificuldade da escolha dos pontos representativos e a facilidade com que o ar penetra na cápsula porosa destes equipamentos.

HENDRICKYX & WIERENGA (1990), utilizando-se de 200 destes tensiômetros com o objetivo de caracterizar a variabilidade do potencial mátrico e estimar o número de tensiômetros necessários para determinação do nível de irrigação do pimentão, irrigado por gotejamento, concluíram que os resultados da pesquisa indicavam grande variabilidade e pouca estabilidade temporal das leituras. O desvio padrão do potencial mátrico aumentava de 0,003 a 0,018, quando o potencial variava de -0,005 para -0,045 MPa, respectivamente. Para a determinação do limite do potencial mátrico em que a cultura perdia rendimento foram necessários 7 tensiômetros por parcela.

VILLAGRA *et alii* (1988), estudando a variabilidade espacial das leituras de potencial mátrico em uma transeção com 30 tensiômetros, instalados em Terra Roxa Estruturada, a uma profundidade de 25 cm, com espaçamento de 4 m, na cultura do feijão, concluíram que o coeficiente de

variação podia chegar a mais de 40%, e que a variação instrumental dos tensiômetros era desprezível. ^x

DOURADO NETO (1989), estudando a variabilidade espacial das alturas de chuva e irrigação e de potenciais da solução do solo em uma área de 0,62 ha de Terra Roxa Estruturada, em um experimento conduzido com 250 tensiômetros de mercúrio, concluiu que: (i) quando toda a área experimental se apresentou com alta umidade, os valores medidos do potencial mátrico superiores a $-0,006$ MPa, tenderam a ter distribuição normal, (ii) para valores de potencial mátrico superiores a $-0,006$ MPa, existiu relação de dependência espacial entre os valores medidos, com alcance variando de 13,95 a 69,30 metros. Em suas recomendações, o autor sugere, para o controle da irrigação, pelo menos duas profundidades de tensiômetros e observa que, no período de tempo em que o solo permanece com alta umidade, pode-se utilizar menor coeficiente de uniformidade de irrigação.

PAIVA (1980), estudando o efeito da uniformidade da distribuição de água aplicada na superfície do solo pelo sistema de aspersão, na uniformidade de redistribuição de água no perfil de solo (Latossolo Vermelho Amarelo fase arenosa), concluiu que: (i) houve um acréscimo nos coeficientes de uniformidade, ao longo do tempo, após o fim da irrigação, para todas as profundidades estudadas e para a distribuição média de umidade abaixo da superfície do solo; (ii) as distribuições foram mais uniformes para as maiores profundidades; (iii) altos valores alcançados pelos coefi-

cientes de uniformidade de umidade, quando a distribuição de água na superfície do solo foi muito baixa; (iv) a umidade inicial do solo influenciou a redistribuição da água abaixo da superfície, sendo mais rápida nas profundidades de menor umidade; (v) a distribuição dos valores de potencial mátrico abaixo da superfície depende, em maior intensidade, da uniformidade da distribuição superficial da água aplicada, que a distribuição de umidade; (vi) os critérios de avaliação dos sistemas de irrigação por aspersão subestimam a uniformidade de distribuição.

2.3. Balanço Hídrico no Campo Com Uso de Tensiômetro

O balanço hídrico no campo é o método adequado para se avaliar o ciclo da água na lavoura. Este método estima a grandeza relativa de vários processos que compõem a dinâmica da água no sistema solo-planta-atmosfera.

No meio técnico nacional, os trabalhos de PEREIRA *et alii* (1974); REICHARDT *et alii* (1974); SILVEIRA & STONE (1979); BRUNINI *et alii* (1981); COSTA (1986) e SAKAI (1990) determinaram os valores de evapotranspiração e drenagem profunda para culturas de feijão e arroz utilizando-se desta metodologia.

A maioria destes trabalhos tem apontado como desvantagem da utilização do balanço hídrico a determinação da evapotranspiração em períodos chuvosos, pois se torna difícil medir mudanças na umidade do solo com precisão maior

do que 2 mm de água, impedindo seu uso para medidas diárias da evapotranspiração (COSTA, 1986).

Outro componente do balanço hídrico de importância para o controle da irrigação é a drenagem profunda. A densidade de fluxo da solução no solo ($\vec{q}$) é normalmente calculada pela equação de BUCKINGHAM-DARCY, isto é, pelo produto da condutividade hidráulica K (a qual é função da umidade volumétrica do solo θ) pelo gradiente de potencial total da solução ($\text{grad } \phi_i$):

$$\vec{q} = - K(\theta) \text{ grad } \phi_i \quad [11]$$

O sinal negativo aparece porque o vetor $\vec{q}$ é de mesma direção mas sentido oposto ao do vetor $\text{grad } (\phi_i)$. Deve ficar esclarecido, também, que a equação [11] só é válida para solos isotrópicos com relação a $K(\theta)$, e que a solução se comporta como um fluido newtoniano.

A aplicação desta teoria requer, portanto, o conhecimento da condutividade hidráulica do solo, em função de sua umidade.

LIBARDI (1991) define o significado físico da condutividade hidráulica como: "o volume de um fluido que atravessa por unidade de tempo a unidade de área de uma amostra de 1 cm de comprimento de um meio poroso sob uma diferença de potencial total de 1 erg/cm³".

Segundo GREEN *et alii* (1986), a condutividade hidráulica pode ser determinada por métodos analíticos baseados na curva de retenção, por métodos de laboratório e

por método de campo; destacam, favoravelmente porém, o método de campo, pois as condições físicas do solo permanecem inalteradas.

As metodologias utilizadas no Brasil para o cálculo da condutividade hidráulica em trabalhos de determinação dos componentes do balanço hídrico da cultura que se utilizam do princípio da conservação de massa foram: (i) método de LIBARDI *et alii* (1980), adotado por COSTA (1986); (ii) método de laboratório com coletas de amostras indeformadas e utilizando a infiltração horizontal no solo, conforme REICHARDT & LIBARDI (1973), aplicados por BRUNINI *et alii* (1981) e SAKAI (1990); (iii) método de campo, conforme HILLEL (1972), utilizado por SILVEIRA & STONE (1979).

Vários autores na literatura realizaram trabalhos comparando metodologias de cálculo da condutividade hidráulica. Citam-se VAUCLIN *et alii* (1982); DANE (1980); BACCHI & REICHARDT (1988) e FULLER & MOOLMAN (1989).

Resultados de drenagem profunda utilizando-se desta metodologia, para a cultura do feijão, foram obtidos por REICHARDT *et alii* (1974) num perfil de Terra Roxa Estruturada. O valor estimado pelos autores foi de 138,8 mm em 48 dias para uma camada de 60 cm. SILVEIRA & STONE (1979) em Latossolo Vermelho Amarelo obtiveram 40,15 mm, representando 18,21% da evapotranspiração da cultura. SILVEIRA *et alii* (1981) encontraram para um perfil de Latossolo Vermelho Escuro com 5% de declividade um valor de 10,01 mm. Esse valor representou 3% da evapotranspiração real.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Caracterização da Área Experimental

A área estudada está localizada geograficamente a $20^{\circ}27'30''$ de latitude sul e a $48^{\circ}19'30''$ de longitude oeste, com altitude de 495 metros acima do nível do mar, situada na fazenda Recanto da Barcelona, de propriedade do Sr. Antonio de Oliveira Lima, no município de Guaíra, Estado de São Paulo, Brasil.

A propriedade agrícola situa-se na vertente da margem esquerda do córrego Santa Cruz; possui relevo plano a suave ondulado e declividade menor do que 3%.

O experimento foi conduzido em uma área de 7,6 ha, representando 25% da área total do pivô central.

A Figura 1 apresenta a localização da área experimental na Fazenda Recanto da Barcelona.

Figura 1 - Localização da área experimental na Fazenda Recanto da Barcelona, município de Guaíra - SP, Brasil.

3.1.1. O clima

O clima, segundo a classificação de Köeppen, é do tipo Cwa: subtropical com inverno seco, com temperatura média do mês mais frio superior a 18°C e do mês mais quente superior a 22°C . Os parâmetros climáticos obtidos da estação climatológica de Barretos, do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), apresentaram as seguintes médias anuais: (i) precipitação: 1330 mm; (ii) temperatura: 24°C ; (iii) umidade relativa: 64,6%; (iv) velocidade do vento: 2,6 m/s com direção predominante NE.

3.1.2. O solo

O solo da área experimental foi classificado como Latossolo Roxo distrófico, A moderado, textura muito argilosa correspondente ao Typic Haporthox da classificação americana. É derivado do intemperismo de rochas eruptivas básicas da formação Serra Geral (OLIVEIRA, 1988). As Tabelas 2 e 3 apresentam, respectivamente, os atributos físicos e químicos determinados previamente à instalação do experimento.

Tabela 2 - Atributos físicos do Latossolo Roxo distrófico, A moderado, textura muito argilosa, da área experimental.

PROF. DA CAMADA (cm)	GRANULOMETRIA (%)			DENSIDADE (g/cm ³)		POROSIDADE TOTAL (%)
	ARGILA	SILTE	AREIA	GLOBAL	PARTÍCULA	
00-30	70	9	21	1,20	2,80	57
30-60	64	10	26	1,15	2,89	57
60-90	67	9	24	1,00	2,77	64
> 105	70	7	23	1,02	2,93	65

Fonte: Instituto de Pesquisas Tecnológicas (1987).

Tabela 3 - Atributos químicos do Latossolo Roxo distrófico, A moderado, textura muito argilosa, da área experimental.

HORIZONTE	PROFUNDIDADE (cm)	P	M. O.	pH KCl
		(ppm)	(%)	
Ap	00-30	7,00	3,00	4,80
B1	30-60	3,00	2,00	5,20
B1	60-90	3,00	1,60	5,20
B2	90-120	3,00	1,60	5,50

HORIZONTE	K	Ca	Mg	H+Al	S	T	V
	meq/100g						(%)
Ap	0,12	1,10	0,40	3,80	1,62	5,42	29,89
B1	0,05	0,40	0,50	2,60	0,95	3,55	26,76
B1	0,01	0,20	0,20	2,30	0,41	2,71	15,13
B2	0,03	0,20	0,20	2,10	0,43	2,53	17,00

Fonte: Instituto de Pesquisas Tecnológicas (1987).

A determinação da curva de retenção da solução do solo foi feita em laboratório, com amostras coletadas com estrutura não deformada, saturadas previamente, submetidas à secagem em câmaras de pressão de Richards e funis de placa porosa. O processo de determinação foi executado conforme descrito em KLUTE (1986). A relação funcional entre a umidade volumétrica (cm^3/cm^3) e o potencial mátrico (MPa) foi ajustada conforme o modelo de GENUCHTEN (1980):

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1 + (\alpha \cdot h)^n]^m} \quad [2]$$

onde:

θ = umidade volumétrica (cm^3/cm^3) correspondente à tensão da água h em MPa;

θ_s = umidade volumétrica (cm^3/cm^3) de saturação;

θ_r = umidade volumétrica (cm^3/cm^3) residual correspondente a $h = 1,5$ MPa;

α , m , n = parâmetros da equação.

Os valores de umidade volumétrica determinados e calculados, bem como os parâmetros α , m , n da equação [2] para as profundidades de 15 e 30 cm, estão relacionados na Tabela 4.

As Figuras 2 e 3 apresentam as curvas de retenção para as profundidades de 15 e 30 cm, respectivamente.

Tabela 4 - Umidade volumétrica, potencial mátrico e parâmetros da equação de van GENUCHTEN (1980).

MÓDULO DO POTENCIAL (MPa)	UMIDADE (cm^3/cm^3) 15 cm		UMIDADE (cm^3/cm^3) 30 cm	
	DETERMINADA	CALCULADA	DETERMINADA	CALCULADA
0,000	0,575	0,580	0,604	0,604
0,002	0,499	0,497	0,494	0,490
0,004	0,459	0,450	0,443	0,439
0,006	0,424	0,425	0,408	0,412
0,008	0,402	0,408	0,387	0,395
0,01	0,389	0,397	0,379	0,384
0,03	0,353	0,353	0,342	0,340
0,06	0,344	0,335	0,332	0,322
0,1	0,332	0,325	0,317	0,312
0,3	0,322	0,310	0,297	0,297
0,5	0,312	0,306	0,291	0,292
1,5	0,289	0,299	0,276	0,286

PROFUNDIDADE (cm)	α (cm^{-1})	m	n	e_r (cm^3/cm^3)	e_s (cm^3/cm^3)
15	0,073828	0,3299	1,4925	0,290	0,580
30	0,097561	0,3265	1,4848	0,276	0,604

Figura 2 - Curva de retenção para o Latossolo Roxo textura muito argilosa. (Camada de 0 a 22,5 cm).

Figura 3 - Curva de retenção para o Latossolo Roxo textura muito argilosa. (Camada de 22,5 a 30 cm).

3.1.3. A planta

Plantou-se o cultivar carioca, recomendado para o Estado de São Paulo, a 15 de junho de 1988, em toda a área experimental de 7,6 ha, no espaçamento entre linhas de 53 cm e 15 sementes por metro linear. Para garantir o estabelecimento da cultura, efetuou-se, antes e depois do plantio, uma irrigação de 17 mm.

Realizou-se a adubação de semeadura, com 350 kg/ha da fórmula 3-15-18 (NPK). A complementação da adubação foi feita através da aplicação de URAN via pivô central no 41º dia após a semeadura.

A emergência ocorreu no dia 26 de junho de 1988, a instalação dos tensiômetros foi feita no dia 7 de julho de 1988, e a colheita do experimento no dia 26 de setembro de 1988.

Os tratos culturais foram executados de maneira a não se alterar o sistema de cultivo do feijoeiro irrigado da propriedade agrícola.

3.2. Arranjo Experimental

O experimento foi implantado de forma a se obter leituras sistemáticas do potencial mátrico e das lâminas de chuva e irrigação, obedecendo a um arranjo com espaçamento regular de 15 metros para as baterias de tensiômetro e de 5 metros para os coletores de chuva e irrigação ao

longo de uma transeção na direção do raio do pivô central, conforme apresentado nas Figuras 4, 5 e 6.

A equação que define a posição da bateria de tensiômetros e do coletor de chuva e irrigação em função dos espaçamentos é dada por:

$$d_i = (i.e) - 0,5.e \quad (13)$$

onde:

d_i = distância em metros do centro geométrico da área (ponto do pivô central), até o local de instalação do coletor ou tensiômetro i ;

i = número de ordem do coletor ou tensiômetro (1,2,3...);

e = espaçamento em metros das baterias de tensiômetro ou coletores de chuva e/ou irrigação.

Foram implantadas 20 estações de leituras de potencial mátrico e 60 estações de leitura das lâminas de irrigação e de chuva. Os coletores de água de chuva e irrigação, bem como os suportes do manômetro de mercúrio das baterias de tensiômetros foram numerados, em ordem crescente, a partir do ponto do pivô central. A Tabela 5 apresenta a localização das estações tensiométricas e pluviométricas, em relação ao ponto do pivô central.

Figura 4 - Vista geral da área experimental, Fazenda Barcelona, Guaira - SP.

Figura 5 - Espaçamento entre duas baterias de tensiômetros e os respectivos coletores de água de irrigação.

Figura 6 - Vista geral da disposição das baterias de tensiômetro e dos coletores de irrigação.

Tabela 5 - Localização dos tensiômetros e coletores de água de chuva e irrigação.

POSIÇÃO COLETOR	POSIÇÃO BAT TENSÍÔMETRO	DISTÂNCIA ¹ (m)	POSIÇÃO COLETOR	POSIÇÃO BAT TENSÍÔMETRO	DISTÂNCIA ¹ (m)
1		2.5	31		152.5
2	BAT-1	7.5	32	BAT-11	157.5
3		12.5	33		162.5
4		17.5	34		167.5
5	BAT-2	22.5	35	BAT-12	172.5
6		27.5	36		177.5
7		32.5	37		182.5
8	BAT-3	37.5	38	BAT-13	187.5
9		42.5	39		192.5
10		47.5	40		197.5
11	BAT-4	52.5	41	BAT-14	202.5
12		57.5	42		207.5
13		62.5	43		212.5
14	BAT-5	67.5	44	BAT-15	217.5
15		72.5	45		222.5
16		77.5	46		227.5
17	BAT-6	82.5	47	BAT-16	232.5
18		87.5	48		237.5
19		92.5	49		242.5
20	BAT-7	97.5	50	BAT-17	247.5
21		102.5	51		252.5
22		107.5	52		257.5
23	BAT-8	112.5	53	BAT-18	262.5
24		117.5	54		267.5
25		122.5	55		272.5
26	BAT-9	127.5	56	BAT-19	277.5
27		132.5	57		282.5
28		137.5	58		287.5
29	BAT-10	142.5	59	BAT-20	292.5
30		147.5	60		297.5

(1) distância entre o centro do pivô à posição do coletor e/ou tensiômetro.

Em cada estação tensiométrica foram definidas 3 parcelas experimentais para avaliação da produção com as seguintes dimensões: 2,0 m de comprimento por 2,65 m de largura, totalizando uma área de 5,3 m², conforme o apresentado na Figura 7. O detalhamento da disposição de uma estação tensiométrica em relação aos coletores de chuva, irrigação e a parcela experimental é apresentado na Figura 8.

Figura 7 - Esquema da parcela experimental.

Figura 8 - Esquema do arranjo experimental.

3.3. O Tensiômetro

O tipo de tensiômetro utilizado para o controle do potencial mátrico é o que possui o mercúrio como líquido manométrico, conforme modelo apresentado por LIBARDI (1985). Os tensiômetros foram construídos no Laboratório de Física do solo do Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT, com tubo de plástico PVC, rígido, com diâmetro de 21 mm externo e 15 mm interno e comprimento de 27,5 cm e 42,5 cm, para as profundidades de 15 cm e 30 cm respectivamente; tubo de nylon flexível; cápsula de cerâmica porosa, com 6 cm de comprimento e diâmetro equivalente ao do PVC; rolha de borracha e cuba de vidro com volume de 10 cm³. O esquema do tensiômetro utilizado é apresentado na Figura 9, e um detalhe de seu manômetro na Figura 10.

Figura 9 - Tensiômetro com manômetro de mercúrio.

Figura 10 - Detalhe do manômetro de mercúrio do tensiômetro.

3.4. O Sistema de Irrigação

O sistema de irrigação utilizado foi um pivô central com as seguintes características: (i) número de torres 6; (ii) área irrigada 30,40 ha; (iii) raio irrigado 311,00 m; (iv) potência do conjunto motobomba 100 cv; (v) altura manométrica total 89 m.c.a.; (vi) vazão 201,00 m³/h; (vii) comprimento total do equipamento 281,00 m; (viii) distância até a última torre 267,70 m. O coeficiente de Uniformidade de Christiansen-CUC 88% e Uniformidade de Distribuição de Criddle-UD 78%. A capacidade de aplicação de água diária em função da distribuição de água do equipamento é apresentada na Tabela 6. As lâminas aplicadas conforme a velocidade e sua compatibilidade com o relê porcentual são apresentadas na Tabela 7.

Tabela 6 - Capacidade de aplicação de água do Pivô Central.

FRAÇÃO DE ÁREA IRRIGADA	50%		80%		90%	
	24 h	21 h	24 h	21 h	24 h	21 h
HORAS FUNC.						
LÂMINA (mm)	15,58	13,64	13,71	12,00	12,61	11,03

Fonte: Instituto de Pesquisas Tecnológicas (1989).

Tabela 7 - Lâminas de água aplicada e tempo de rotação do sistema.

REG. RELÊ (%)	VELOCIDADE DA ÚLTIMA TORRE (m/h)	TEMPO GIRO (h)	LÂMINA MÍNIMA EM FUNÇÃO DA FRAÇÃO DE ÁREA IRRIGADA (mm)			ÁREA COBERTA POR HORA (ha/h)
			50%	80%	90%	
100	137,40	12,21	7,93	6,98	6,42	2,48
90	130,08	12,90	8,38	7,37	6,79	2,35
80	97,80	17,16	11,48	9,80	9,02	1,77
70	90,00	18,64	12,11	10,66	9,81	1,63
60	76,44	21,95	14,25	12,54	11,54	1,38
50	62,22	26,97	17,51	15,41	14,18	1,13
40	52,02	32,26	20,94	18,43	16,96	0,94
30	37,80	44,39	28,82	25,36	23,34	0,68

Fonte: Instituto de Pesquisas Tecnológicas (1989).

3.5. Metodologia

A fase experimental deste trabalho foi desenvolvida em condições de campo, onde somente foram controlados a frequência e a quantidade de água de irrigação.

Tendo em vista a peculiaridade da proposta metodológica, assume-se que:

- a) área é considerada homogênea com relação aos atributos físico-hídricos e químicos do solo;
- b) os tratos culturais e os insumos adotados foram adequadamente aplicados na área experimental;
- c) o controle efetivo da irrigação começou a ser realizado após o vigésimo quinto dia após a semeadura;

- d) a profundidade efetiva do sistema radicular foi considerada fixa (30 cm), para efeito do controle da quantidade de irrigação;
- e) os tensiômetros instalados a 15 cm de profundidade quantificaram o valor do potencial mátrico no perfil de solo entre 0 e 22,5 cm, isto é, 75% do valor da profundidade efetiva do sistema radicular. A camada de 22,5 cm a 30,0 cm de profundidade foi considerada domínio dos tensiômetros localizados a 30 cm de profundidade;
- f) os valores do potencial mátrico no solo a 15 e a 30 cm de profundidade foram determinados pela média ponderada dos 20 tensiômetros (ver item 3.5.1, a seguir);
- g) o limite crítico para a definição do momento de irrigação foi estabelecido em $-0,06$ MPa, conforme sugerido por AZEVEDO *et alii* (1986). O potencial mátrico médio dos 20 tensiômetros a 15 cm de profundidade determinou este limite.
- h) os parâmetros agroclimatológicos obtidos da estação experimental do Instituto Agronômico, localizados em Ribeirão Preto - SP, a 100 Km da Fazenda Recanto da Barcelona, sejam válidos para a determinação da evapotranspiração da cultura pelo método do tanque "classe A".

3.5.1. Determinação do valor médio do potencial mátrico

Conforme o arranjo experimental proposto, cada bateria de tensiômetro representa uma fração de área sob o pivô central, cujo valor é expresso de acordo com a seguinte equação:

$$f_i = 2 \pi d_i e \quad [4]$$

onde:

f_i = área representativa da iésima bateria de tensiômetros em m^2 , isto é, a área compreendida pelo círculo de raio $d_i + e/2$ e o círculo de raio $d_i - e/2$;

d_i = distância do centro geométrico da área até o local da iésima bateria de tensiômetro, isto é, até o ponto intermediário da área representativa, em metros, definida pela equação [3] (página 36);

e = espaçamento adotado entre as baterias de tensiômetros em metros;

$\pi = 3,1416$.

Substituindo a equação [3] na equação [4] obtém-se f_i em função de i , isto é:

$$f_i = 2 \pi e^2 (i - 0,5) \quad [5]$$

Por outro lado, tendo em vista que cada leitura de uma dada bateria de tensiômetros representa esta área

irrigada f_i sob o pivô central, adotou-se como o valor médio do potencial mátrico da área a média ponderada dos potenciais considerando como peso as frações de área f_i , isto é:

$$h = \frac{\sum_{i=1}^{20} f_i h_i}{\sum_{i=1}^{20} f_i} = \frac{\sum_{i=1}^{20} (i-0,5) h_i}{\sum_{i=1}^{20} (i-0,5)} = \frac{\sum_{i=1}^{20} r_i h_i}{\sum_{i=1}^{20} r_i} \quad [6]$$

onde h é o módulo do potencial mátrico médio das 20 baterias, h_i o valor do módulo do potencial mátrico na bateria de tensiômetro de número de ordem i e $r_i = i-0,5$.

3.5.2. Determinação da lâmina de água requerida

O cálculo da lâmina de água requerida, em mm (D_r), foi baseada na seguinte equação:

$$D_r = (e_{cc} - e_{ma}) \times 300 \quad [7]$$

onde:

e_{cc} = valor médio da capacidade de campo (cm^3/cm^3) no perfil de solo (0 a 30 cm), assumindo como valor do potencial mátrico -0.008 MPa.

e_{ma} = valor médio da umidade volumétrica atual do perfil de solo (0 a 30 cm), em cm^3/cm^3 .

O valor médio da umidade atual do perfil de solo de 0 a 30 cm de profundidade foi obtido pela seguinte equação (ver alínea e do item 3.5):

$$\theta_{ma} = (\theta_{15} \times 0,75) + (\theta_{30} \times 0,25) \quad [18]$$

onde:

θ_{ma} = valor médio da umidade volumétrica (cm^3/cm^3) no perfil de solo correspondente à profundidade efetiva do sistema radicular da cultura, cujo valor foi fixado em 30 cm.

θ_{15} = umidade volumétrica (cm^3/cm^3) a 15 cm de profundidade estimada indiretamente a partir da curva de retenção;

θ_{30} = umidade volumétrica (cm^3/cm^3) a 30 cm de profundidade estimada indiretamente a partir da curva de retenção.

3.5.3. Determinação da lâmina bruta de água

A lâmina bruta de água aplicada foi definida pela equação [19].

$$D_b = \frac{D_r}{E_i} \quad [19]$$

onde:

D_b = lâmina bruta de água a ser aplicada pelo sistema de irrigação (mm);

D_r = lâmina de água requerida pela cultura (mm);

E_i = valor da eficiência de aplicação (decimal) obtido de ensaio realizado anteriormente ao experimento conforme Relatório nº 27.406, do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, ($E_i = 0,79$).

3.5.4. Determinação da lâmina de água aplicada

A lâmina de água aplicada pelo pivô central é inversamente proporcional à velocidade de deslocamento, sendo controlada por um relé. A velocidade máxima de deslocamento da última torre corresponde ao valor de 100% para o relé controlador de velocidade. Os valores subseqüentes, são obtidos através de uma porcentagem do valor da velocidade máxima de deslocamento (m/h). Por facilidade e rapidez na tomada de decisão da irrigação, assumiu-se que a relação funcional entre o valor médio da lâmina de água aplicada pelo equipamento e a velocidade de deslocamento fosse linear. Com isto posto, foi executada uma análise de regressão entre o valor do relé percentual (correspondente a uma dada velocidade de deslocamento) e os valores de lâmina média aplicada, obtidos indiretamente através dos dados de velocidade de giro e vazão do sistema, conforme apresentado na Tabela 7. A equação de regressão que permite a definição da velocidade do sistema em função da lâmina de irrigação é a seguinte:

$$R = a + b D_b \quad [10]$$

onde:

R = valor da regulação no relé percentual controlador da velocidade de deslocamento do pivô central, (%);

D_b = valor da lâmina bruta de água a ser aplicada pelo pivô central, (mm).

a e b = parâmetros empíricos da equação (a = 114,78 e b = -3,29)

O modelo linear representado pela equação [10] foi significativo ao nível de 1%, para o teste F, com um coeficiente de determinação R^2 de 0,95.

3.5.5. Estimativa da uniformidade de distribuição de água e eficiência de irrigação

As medidas de uniformidade de distribuição expressam a variabilidade da lâmina de irrigação aplicada ao longo do raio do pivô central, isto é, mostram a dispersão dos valores obtidos em relação à lâmina média.

As medidas de eficiência de irrigação permitem uma avaliação das irrigações efetuadas, tendo por base as relações entre o volume de água aplicado pelo sistema, o volume de água infiltrado no solo e o volume de água incorporado ao solo até a profundidade efetiva do sistema radicular.

3.5.5.1. Uniformidade de distribuição de água

Foi adotado o seguinte procedimento para o cálculo dos parâmetros estatísticos relacionados à uniformidade de distribuição de água:

a) Coeficiente de uniformidade de Christiansen - CUC.

Adotou-se o procedimento sugerido por HEERMANN & HEIN (1968), através do qual se utiliza um fator de ponde-

ração para corrigir a diferença existente entre a área representativa de cada coletor.

O coeficiente de uniformidade utilizado neste procedimento é o seguinte:

$$CUC = \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^{i=60} r_i |D_i - D_m|}{D_m \sum_{i=1}^{i=60} r_i} \right] \cdot 100 \quad [11]$$

onde:

D_i = lâmina aplicada no coletor de número i (mm);

r_i = $i-0,5$, conforme definido anteriormente (ver equação [6]);

D_m = lâmina média ponderada, calculada pela equação [12]:

$$D_m = \frac{\sum_{i=1}^{i=60} (r_i \times D_i)}{\sum_{i=1}^{i=60} r_i} \quad [12]$$

do mesmo modo que se calculou h pela equação [6].

b) Coeficiente de uniformidade de distribuição - UD

Representa a relação entre a média ponderada das 25% menores lâminas, correspondentes a 25% da área, e a lâmina média ponderada.

$$UD = \frac{d(25)}{D_m} \quad [13]$$

onde:

$d(25)$ = média ponderada das menores precipitações correspondentes a 25% da área;

D_m = lâmina média ponderada, cujo valor é estimado pela equação [12], (mm).

c) Coeficiente de variação - Cv

Calculado pela seguinte equação:

$$Cv = \frac{s}{D_m} \quad [14]$$

onde:

s = desvio padrão das lâminas de água aplicadas, calculado pela seguinte equação:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=60} r_i (D_i - D_m)^2}{\sum_{i=1}^{i=60} r_i}} \quad [15]$$

D_m = lâmina média ponderada, cujo valor é estimado pela equação [12], (mm).

3.5.5.2. Eficiências de aplicação e armazenagem de água segundo o modelo Normal

O modelo normal, citado por WALKER (1979), foi utilizado para determinar os valores da eficiência de armazenagem e aplicação de água de cada irrigação e de todas as

irrigações acumuladas. Este modelo calcula os parâmetros tendo por base um diagrama de distribuição de frequência acumulada e normalizada. O detalhamento metodológico do modelo normal de distribuição de água é discutido em HART (1961) e WALKER (1979). A Figura 11 ilustra este modelo de distribuição de água.

Figura 11 - Diagrama esquemático da distribuição normal acumulada.

Observando a Figura 11, nota-se que o ponto $H_i = 1$ corresponde à lâmina média infiltrada, uma vez que neste ponto a lâmina aplicada no coletor i , (D_i) é igual à lâmina média ponderada, D_m . Se, no entanto, a lâmina média infiltrada no solo for igual à lâmina de água requerida, determinada pela equação [7] (página 47), esse modelo estima que 50% da área irrigada receberá uma lâmina maior ou igual à lâmina média e os outros 50% da área uma lâmina inferior à média. No primeiro caso ocorrerá percolação profunda, e no segundo haverá "déficit" de água. A análise da relação entre áreas de excesso e de déficit, representadas pela distribuição acumulada de água, conduz à determinação dos valores das diferentes eficiências.

Os parâmetros do modelo de WALKER (1979), são definidos como:

Δ' = parâmetro que representa uma aproximação da função de distribuição normal, uma vez que esta é assintótica à ordenada quando os valores na abscissa (fração de área) são iguais a zero e um, respectivamente. O valor de Δ' é unicamente função do coeficiente de variação (Cv), caracterizando, portanto, a distribuição. WALKER (1979) propõe que o valor de Δ' seja definido por:

$$\Delta' = 3,634 \times Cv \quad [16]$$

Para esta aproximação, a fração de área representada pelo eixo das abscissas tem um valor de 10^{-4} , (apro-

ximadamente igual a zero), enquanto no eixo das ordenadas, representado pela lâmina adimensional, H_i , tem um valor de $1+\Delta'$.

Δ = é a diferença entre a lâmina média adimensional, que é igual a 1, e a lâmina requerida adimensional, H_r .

Ad = representa área deficientemente irrigada, em função da razão Δ/Δ' estimada pela equação:

$$Ad = [3,2362 (1 - (\Delta/\Delta'))]^{3,3223} \quad [17]$$

A eficiência de aplicação é o parâmetro que avalia as perdas por percolação profunda. No modelo de WALKER (1979), é calculada pela seguinte equação:

$$Ea = 100 \times [1 - Cv(3,634 - 1,123Ad^{0,301} + 0,003Ad^{1,2925})] \quad [18]$$

A eficiência de armazenagem (HART & REYNOLDS, 1965) é o parâmetro que avalia a reposição de água ao solo na profundidade efetiva do sistema radicular da cultura, portanto, com significado físico importante para a otimização da quantidade de água a ser aplicada. No modelo de WALKER (1979) é determinada pela seguinte expressão:

$$Es = 100 \times \frac{Ea}{[1 - Cv(3,634 - 1,123 \cdot Ad^{0,301})]} \quad [19]$$

3.5.6. Estimativa da evapotranspiração do feijoeiro

- método da FAO - (DOOREMBOS & KASSAN, 1979)

Com o objetivo de avaliar procedimentos e analisar os resultados obtidos, optou-se por estimar a evapotranspiração da cultura do feijão através de duas metodologias distintas. A primeira recomendada pela FAO (DOOREMBOS & KASSAN, 1979), e a segunda, através do balanço hídrico com tensiômetro.

Segundo DOOREMBOS & KASSAN (1979), para um determinado clima e para uma cultura em etapa de desenvolvimento, a evapotranspiração máxima da cultura (ET_m) em mm/dia do período considerado é:

$$ET_m = K_c \cdot ET_o \quad (20)$$

onde:

ET_m (evapotranspiração máxima) = taxa de evapotranspiração máxima de uma cultura sã, sem estresse hídrico, que se desenvolve em grandes áreas e em condições ótimas de fitossanidade, (mm/dia);

K_c (coeficiente de cultura) = determinado empiricamente para relacionar a evapotranspiração máxima da cultura com a evapotranspiração de referência (ET_o), quando não há "déficit" hídrico. Seu valor depende da cultura, ^e da etapa de seu desenvolvimento.

ET_o (evapotranspiração de referência) = taxa de evapotranspiração de uma superfície extensa coberta com

grama batatais (*Paspalum notatum*, Flugge), com 8 a 15 cm de altura, em pleno desenvolvimento vegetativo, sombreando completamente o terreno e sem escassez de água.

Nesse trabalho, foram utilizados os valores de K_c sugeridos pela FAO (DOOREMBOS & KASSAN, 1979), tendo em vista, conforme citado por FRIZZONE (1986), que trabalhos desenvolvidos por SCARDUA (1970), SOUZA (1976), VILLA NOVA *et alii* (1978) e ENCARNAÇÃO (1979) verificaram um razoável grau de confiabilidade neste coeficiente.

A evapotranspiração de referência E_{To} foi determinada utilizando-se o método do tanque "classe A", conforme recomendação de DOOREMBOS & KASSAN (1979). A equação que determina seu valor é a seguinte:

$$E_{To} = K_p \cdot ECA \quad [21]$$

onde:

E_{To} = evapotranspiração de referência, mm/dia;

K_p (coeficiente do tanque "classe A") = determinado empiricamente para relacionar a E_{To} com a evaporação obtida no tanque tipo "classe A"; depende diretamente da umidade relativa do ar, da velocidade do vento e do tipo e extensão da bordadura do tanque "classe A".

Nesse trabalho os dados de evaporação do tanque "classe A" foram obtidos do posto meteorológico da Estação Experimental de Ribeirão Preto, pertencente ao Instituto Agrônomo da Secretaria de Agricultura do Estado de São Paulo, distante aproximadamente 100 km da área experimental.

A relação entre a taxa real de absorção de água por uma cultura e a sua evapotranspiração máxima (ET_m) vem determinada pela disponibilidade hídrica do solo. Portanto, evapotranspiração atual (ET_a) refere-se à perda de água por uma cultura qualquer, com ou sem restrição hídrica, em qualquer etapa de desenvolvimento. Com o objetivo de determinar seu valor diário, utilizou-se a seguinte equação:

$$ET_a = ET_m \cdot K_s \quad [22]$$

onde ET_a é a taxa de evapotranspiração atual, mm/dia e ET_m a taxa de evapotranspiração máxima, mm/dia. O coeficiente K_s, denominado coeficiente de umidade do solo, determina a fração da ET_m que evapotranspira, à medida que a umidade do solo vai diminuindo; representa, portanto, o nível de depleção da água disponível do solo. Conforme BRONER (1990) seu valor pode ser expresso como uma função logarítmica da máxima capacidade de água disponível (W_m), e da depleção atual de água no solo (D_p), de acordo com a seguinte equação:

$$K_s = \frac{\log[1 + 100(1 - D_p/W_m)]}{\log 101} \quad [23]$$

Por esta equação verifica-se que K_s varia de 0 (quando D_p = W_m) a 1 (quando D_p = 0). O valor numérico de D_p é a

diferença entre a armazenagem de água no solo quando esse se encontra na "capacidade de campo", (refere-se ao potencial mátrico da solução do solo a -0.008MPa), e a armazenagem atual do solo. O de W_m , a diferença entre a armazenagem de água quando o solo se encontra na "capacidade de campo", (cc), e a armazenagem de água no "ponto de murchamento permanente, (pmp).

Os valores da "capacidade de campo", e do "ponto de murchamento permanente", foram obtidos da curva de retenção de água no solo, para os valores de potencial mátrico -0.008 e -1.5 MPa , respectivamente.

Os valores de umidade atual foram estimados a partir da equação 2. Utilizou-se como módulo do potencial mátrico (h) o valor médio ponderado das leituras dos 20 tensiômetros instalados a 15 e a 30 cm de profundidade, conforme apresentado anteriormente (ver equação 6, página 47).

3.5.7. Cálculo do Balanço Hídrico com tensiômetro.

O balanço hídrico é a soma algébrica das quantidades de água que entram num determinado volume de solo vegetado (ou não), e das quantidades de água que dele saem. O resultado é a variação do volume de água armazenado no perfil, de profundidade igual à do sistema radicular da cultura, para o caso de solo vegetado.

Para a cultura do feijoeiro, em solos tropicais, a maior parte do sistema radicular encontra-se a uma

profundidade inferior a 30 cm (FANCELLI, 1990; ARRUDA, 1987; STONE *et alii*, 1988). Neste trabalho a profundidade efetiva do sistema radicular foi fixada em 30 cm para todo o ciclo da cultura.

Considera-se como entrada de água no volume de solo, num período de tempo Δt , a soma das quantidades de água provenientes da chuva, da irrigação, do escoamento superficial e da ascensão capilar. Da mesma forma, consideram-se como saída de água, no mesmo período Δt , as quantidades de água proveniente da drenagem profunda, evapotranspiração e escoamento superficial. O saldo deste balanço é igual à variação de armazenagem de água no perfil de solo, entre 0 e 30 cm de profundidade, para o intervalo (Δt), de tempo considerado.

O balanço de água é estabelecido pela seguinte equação da conservação de massa, LIBARDI (1984):

$$P + I \pm R - D + AC - ET = \pm \Delta A \quad (24)$$

onde:

P = precipitação (mm);

I = irrigação (mm);

R = escoamento superficial (mm);

D = drenagem profunda (mm);

AC = ascensão capilar (mm);

ET = evapotranspiração real da cultura (mm), e

ΔA = variação de armazenagem no volume de solo considerado (mm).

Neste trabalho, que tem por objetivo avaliar a metodologia de controle de irrigação por tensiômetro, os dois componentes de maior interesse são a evapotranspiração real da cultura e a drenagem profunda abaixo da profundidade efetiva do sistema radicular.

Os procedimentos metodológicos adotados foram baseados em LIBARDI (1984). A determinação de cada componente do balanço hídrico foi executada da seguinte maneira:

a) Pluviometria e irrigação

A medida da precipitação pluvial e da irrigação foi feita através de 60 coletores (recipientes metálicos cilíndricos) com capacidade de um litro, apresentando área de captação de 53 cm^2 , resultando uma relação volume/lâmina de $5,3 \text{ ml/mm}$.

b) Escoamento superficial

O escoamento superficial foi considerado nulo, uma vez que o terreno na área é plano.

c) Drenagem profunda e ascensão capilar

O fluxo de água que drena ou ascende ao volume de solo considerado foi determinado pela equação de Buckingham - Darcy, (ver página 26).

A determinação da drenagem profunda e/ou ascensão capilar exige, portanto, o conhecimento tanto da condutividade hidráulica do solo, para tantas quantas forem as

camadas de interesse, para uma larga faixa de valores de umidade, bem como do gradiente de potencial total para as camadas mencionadas.

A soma do potencial mátrico da solução do solo fornecido pela média ponderada dos 20 tensiômetros a 15 e a 30 cm de profundidade, com o potencial gravitacional respectivo, dado pela cota vertical, fornece o potencial total às profundidades de interesse. A diferença entre os dois potenciais totais (15 e 30 cm), quando dividida pela espessura da camada (15 cm), definirá o valor do gradiente de potencial total.

Foram executadas 130 leituras da altura da coluna de mercúrio das 20 estações tensiométricas durante o período de desenvolvimento da cultura, a partir do vigésimo quinto dia após a semeadura. O procedimento de leitura dos tensiômetros foi adotado de tal forma que, além das leituras regulares diárias previstas para 8:00 h, leituras adicionais, próximas ao momento da irrigação, eram realizadas no período vespertino. A finalidade das leituras adicionais está relacionada ao cuidado que se demonstrou no controle do valor do potencial mátrico crítico (-0,060 MPa). As leituras da altura da coluna de mercúrio (h_1), que, juntamente com as distâncias da superfície do solo ao nível superior do mercúrio na cuba de vidro (h_c), e à profundidade de 15 cm e 30 cm (z), foram utilizadas na equação:

$$\phi_m = (-12,8h_1 + h_c + z)/10000$$

A função $K(\psi_m)$ utilizada foi obtida através dos trabalhos realizados na Fazenda Recanto da Barcelona no ano de 1986, (14/3 a 12/04), calculada pelo método do perfil instantâneo e apresentada no Relatório do Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT nº 23.966 em 1986. Os procedimentos utilizados foram resumidamente os seguintes: escolheu-se uma parcela de área igual a 12 m^2 , de tal forma que os processos em seu centro não fossem afetados pelos seus limites. Com a parcela definida e limitada por pranchas de madeira em sua borda, foi iniciado o processo de saturação do perfil. As leituras dos tensiômetros instalados nas profundidades de 15, 30, 45, 60, 75, 90 e 105 cm indicaram quando se atingiram as condições de infiltração em regime estacionário. Terminada a saturação do perfil do solo, a superfície do solo foi coberta com lona plástica, para se evitarem a evaporação e a entrada de água através da superfície. A água contida no perfil redistribuiu-se pelo processo de drenagem interna. Leituras diárias dos tensiômetros foram realizadas durante 28 dias, totalizando um período de 672 horas.

Para o cálculo da condutividade como uma função do potencial mátrico, a uma profundidade, bastou dividir o fluxo pelo gradiente de potencial total nessa profundidade, para os diversos tempos de drenagem. Com isto posto, foi possível a elaboração de três gráficos, ou seja: o primeiro relacionando o potencial mátrico a 90 cm de profundidade em função do tempo de drenagem; o segundo, relacionando o gradiente de potencial total, a 90 cm, em função do tempo de

drenagem; e o terceiro, relacionando a armazenagem a 90 cm, em função do tempo de drenagem.

De posse dos gráficos foi possível a seleção dos seguintes tempos de drenagem: 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60, 80, 100, 150, 250 e 400 horas. Para estes tempos calculou-se a tangente à curva do gráfico entre a armazenagem e o tempo de drenagem, nos respectivos tempos de drenagem selecionados. Com este procedimento determinou-se a densidade de fluxo ($\dot{q}$), também nestes tempos. De posse dos valores das densidades de fluxo, dividiu-se cada um deles pelo valor do gradiente de potencial total no respectivo tempo de drenagem, obtendo-se os valores de $K(\phi_m)$ nestes mesmos tempos.

Os valores da condutividade hidráulica em função do potencial mátrico, para os diferentes tempos de drenagem, são apresentados na Tabela 8, a seguir:

Tabela 8 - Cálculo da condutividade hidráulica.

TEMPO (h)	(-) POT. MÁTRICO (MPa)	COND. HIDRÁULICA (mm/dia)
10	0,0041	38,40
15	0,0051	25,08
20	0,0058	19,20
30	0,0068	12,96
40	0,0075	9,60
50	0,0081	7,68
60	0,0085	6,48
80	0,0092	4,80
100	0,0098	3,84
150	0,0108	2,64
250	0,0121	1,56
400	0,0132	0,98

Através de análise de regressão desses resultados, a seguinte equação foi obtida para estimar o valor da condutividade hidráulica em função do potencial mátrico do solo.

$$K(\phi_m) = \exp^{0.04 \cdot |\phi_m|} + 3.287 \quad [26]$$

De posse da função $K(\phi_m)$ e das leituras diárias dos tensiômetros, obtiveram-se os valores de drenagem diária de água (drenagem profunda e ascensão capilar) pela equação de Buckingham - Darcy, (ver página 26).

d) Variação de armazenagem

Para o cálculo da variação de armazenagem foram utilizados os valores médios de umidade do solo obtidos indiretamente pelas leituras dos tensiômetros e calculados pelo modelo de van GENUCHTEN (1980), conforme equação [2]. A equação que calcula a armazenagem diária é a seguinte:

$$ARM = (e_{15} \times 225 + e_{30} \times 75) \quad [27]$$

onde:

ARM = armazenagem da água no solo na camada equivalente à zona radicular da cultura do feijão em (mm);

e_{15} = umidade volumétrica na profundidade de 15 cm, (cm^3/cm^3);

e_{30} = umidade volumétrica na profundidade de 30 cm, (cm^3/cm^3).

A variação de armazenagem foi determinada pela diferença de armazenagem no perfil do solo entre tempo final e o tempo inicial, isto é:

$$\Delta A = \text{ARM} (t_i) - \text{ARM} (t_{i-1}) \quad [28]$$

onde:

ΔA = variação de armazenagem no perfil de solo correspondente à profundidade efetiva do sistema radicular, (mm);

$\text{ARM} (t_i)$ = valor da armazenagem no iésimo dia após a semeadura, (mm);

$\text{ARM} (t_{i-1})$ = valor da armazenagem no dia anterior ao iésimo dia após a semeadura, (mm).

d) Evapotranspiração atual

A evapotranspiração da cultura é a incógnita da equação do balanço [24] (ver página 60).

Os valores estimados (mm/dia) da evapotranspiração atual foram determinados para cada estágio fenológico da cultura e para 11 períodos, com intervalos variando de 5 a 10 dias durante o 25º e o 104º dia após a semeadura (ver Tabela 19, página 109).

A evapotranspiração atual diária foi estimada a partir da análise de regressão entre a evapotranspiração média de cada um dos onze períodos considerados e o dia após semeadura (DAS), correspondente ao intervalo médio desse período.

3.5.8. Observações fenológicas

a) Data da emergência

Foi considerada como sendo o 12º dia após a semeadura.

b) Data do início da floração

Data na qual 50% das plantas apresentaram pelo menos, uma flor aberta.

c) Data do início do enchimento de vagens

Data na qual 50% das vagens apresentaram sementes em crescimento, a qual foi detectada através do tato ao longo da vagem.

d) Data do início da maturação

Data na qual 90% das vagens sofreram mudança na coloração, de verde para amarelo rosado.

3.5.9. Determinação do rendimento da cultura

O rendimento de grãos da cultura foi determinado em cada uma das 60 parcelas de $5,3m^2$. As plantas de cada parcela foram arrancadas manualmente e expostas ao sol para secagem durante o período diurno, por dois dias consecutivos. As plantas secas foram embaladas em sacos de 60 kg e batidas manualmente, para se evitarem perdas. Os grãos

foram coletados e acondicionados em sacos de papel e pesados em balança eletrônica.

3.5.10. Eficiência do uso da água (EUA)

É a razão entre o valor do rendimento de grãos e a quantidade de água consumida no processo de evapotranspiração. Foi calculada de acordo com a razão entre o rendimento e o volume de água aplicado durante todo o ciclo da cultura, para cada parcela experimental.

3.5.11. Estimativa do número mínimo e localização dos tensiômetros sob pivô central, através da análise de regressão linear múltipla

Com o objetivo de estimar o menor número possível de tensiômetros, bem como a sua posição sob o pivô central para definir o controle da irrigação, foi realizada uma análise de regressão linear múltipla entre a matriz composta pelas 130 leituras dos 20 tensiômetros à profundidade de 15 cm e a sua posição física, conforme apresentado no delineamento experimental.

A regressão múltipla é utilizada com a finalidade de testar dependências cumulativas de uma única variável dependente (potencial mátrico), em relação a diversas variáveis independentes (localização dos tensiômetros). Cada variável é isolada e mantida constante, enquanto as variá-

veis restantes variam sistematicamente, sendo observados seus efeitos sobre a variável dependente.

A variável a ser mantida inicialmente constante é aquela que ocasiona a maior influência na variabilidade da variável dependente. O modelo geral é representado por:

$$\phi_m = a_0 + b_1 t_1 + b_2 t_2 + b_3 t_3 + \dots + b_{20} t_{20} + e_1 \quad [29]$$

Uma das aplicações da análise de regressão múltipla é a escolha, entre diversas variáveis independentes (x), daquelas mais úteis na previsão de (y). Esta é, portanto, a metodologia que se utilizou para estimar, em função das diferentes posições de materiais de tensiômetros, quais as mais úteis para a previsão do valor do potencial mátrico. O coeficiente de determinação R^2 fornece uma medida adimensional da quantidade do ajuste do modelo de regressão múltipla dos dados.

Finalmente, verifica-se, através da análise de regressão linear múltipla, a contribuição pura de cada variável independente por comparações sucessivas entre os diversos resultados.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Duração dos Estádios Fenológicos da Cultura

A Tabela 9 e a Figura 12 apresentam a duração dos estádios fenológicos da cultura do feijão *Phaseolus vulgaris* L. (cultivar carioca). O ciclo da cultura teve a duração de 104 dias após a semeadura, em função das condições ambientais reinantes e dos tratos culturais aplicados. Durante os estádios iniciais da cultura (emergência e desenvolvimento vegetativo), as temperaturas, mínimas foram, respectivamente, 11,9°C e 9,6°C e as máximas 24,4°C e 27,0°C. No período reprodutivo (floração e frutificação), nos meses de agosto e setembro, as temperaturas mínimas foram 10,3°C e 16,3°C. Deve-se considerar também que durante todo o ciclo da cultura não houve precipitações pluviais; somente a água de irrigação foi a responsável pelo seu desenvolvimento.

A maioria dos autores, entre os quais, DOOREMBOS & KASSAN (1979); FANCELLI (1990) e BULISANI (1990), afirma que os cultivares mais comuns apresentam melhor desenvolvimento quando a temperatura varia entre 15°C a 27°C. Porém, a maioria das plantas suporta extremos amplos de temperatura, que vão desde 5°C a 40°C, dentro de períodos

limitados, muito embora possam ocorrer danos irrecuperáveis, ao considerar o feijoeiro como planta de ciclo curto, onde os processos de desenvolvimento da cultura, que definem o seu desempenho, acontecem em poucos dias.

Tabela 9 - Fenologia da cultura.

DATAS	FASES DA CULTURA	DURAÇÃO DA FASE (dias)	DIAS APÓS SEMEADURA (DAS)
15-6-88 a 27-6-88	Plantio a Emergência	13	13
28-6-88 a 11-8-88	Emergência ao início da floração	45	58
12-8-88 a 18-8-88	Início da floração ao início do enchimento dos grãos	6	64
19-8-88 a 16-9-88	Início do enchimento dos grãos ao início da maturação	30	94
17-9-88 a 28-9-88	Início da maturação ao final da matu- ração	10	104

Figura 12 - Fenologia da cultura.

4.2. Parâmetros Hídricos do Solo

Os parâmetros de interesse para a realização da análise da armazenagem de água nos processos de umedecimento e secagem do solo, após cada irrigação, foram calculados, e os valores obtidos são os seguintes:

a) armazenagem do perfil de solo na capacidade de campo:

121,5 mm;

b) armazenagem do perfil de solo no ponto de murchamento

permanente: 88,74 mm;

c) capacidade de água disponível: 32,76 mm.

4.3. O Controle da Irrigação

O controle da irrigação realizado através de tensiometria indicou 16 regas durante o período de 09/07/1988 a 26/09/1988, isto é, a partir do 25º dia após a semeadura. Como pode ser observado, o controle da irrigação foi possível em 80 dias do ciclo da cultura, isto é, em 76,92% de seu ciclo total, perfazendo, portanto, os períodos mais críticos em relação à necessidade de água da cultura.

A análise dos resultados do controle da irrigação foi desenvolvida com base em dois processos que se interrelacionam na agricultura irrigada, ou seja: o umedecimento do solo devido à aplicação da irrigação; e a secagem relativa ao tempo em que a cultura absorve a água do solo, deplecionado-o em relação a sua disponibilidade de água para as plantas, devido à demanda evapotranspirativa e à drenagem profunda.

A Figura 13 apresenta a variação dos potenciais mátricos do solo a 15 e a 30 cm de profundidade, mostrando a evidência e a interação destes dois processos que ocorrem em intervalos de tempo distintos.

Figura 13 - Valor médio do potencial mátrico ao longo do ciclo da cultura.

4.3.1. Processo de umedecimento do solo

Este processo ocorre entre o intervalo de tempo (t_1) em que as leituras dos tensiômetros possibilitam a definição do valor mínimo de armazenagem no perfil do solo, (momento da decisão da irrigação) e a armazenagem máxima do perfil do solo após a irrigação (t_2). Os valores máximos e mínimos de armazenagem estão intimamente associados aos intervalos de leitura executada nos tensiômetros (130 em 80 dias; em média 1 leitura a cada 15 horas).

As Tabelas 10 e 11 apresentam a variação do potencial mátrico e da umidade do solo, para as profundidades de 15 e 30 cm, bem como a variação temporal (horas e dias) após a irrigação. São também apresentados os valores de

variação de armazenagem ocorrida, neste intervalo de tempo, em cada região de influência dos tensiômetros (0 a 22,5 cm para o tensiômetro de 15 cm e 22,5 a 30 cm para o de 30 cm).

Os valores dos potenciais mátricos médios que decidiram o momento da irrigação (15 cm), para a fase de desenvolvimento vegetativo, reprodutivo e maturação, foram respectivamente -0,0337 MPa, -0,0526 MPa e -0,0531 MPa. Pode-se notar que os valores de potencial mátrico que definiram o momento de irrigação estão concordantes com o critério proposto; exceção se faz ao valor que definiu a décima primeira irrigação.

Ressalta-se, também, que o tempo para o solo sair da condição de armazenagem mínima para armazenagem máxima foi, em média, 19,8 horas, 14,14 horas e 11,00 horas, para as três fases da cultura, respectivamente. As lâminas médias que propiciaram estes tempos foram: 20,70 mm, 25,10 mm e 24,45 mm. A variação da armazenagem (diferença entre a máxima após a irrigação e a mínima antes da irrigação) foi para a região de influência do tensiômetro de 15 cm de profundidade, (0 a 22,5 cm), 7,78 mm; 13,78 mm e 12,53 mm, em média, para cada fase do ciclo da cultura. Na região representativa do tensiômetro de 30 cm de profundidade (22,5 cm a 30,0 cm) a variação deste parâmetro foi, respectivamente, 0,99 mm; 1,08 mm e 1,07 mm, para as 3 fases de desenvolvimento da cultura. Este fato mostra que a grande flutuação dos valores de umidade do solo, devido à aplicação da água de irrigação, se deu, basicamente, na profundidade de 0 a 22,5 cm.

Tabela 10 - Variação temporal do potencial mátrico, da unidade e da armazenagem, na fase de umedecimento do perfil do solo, na camada 0 a 22,5 cm.

Nº DE ORDEM IRRIG.	LÂMINA MÉDIA APLIC. CULTURA (mm)	ESTÁDIO FENOL.	$ \phi_m _{15}$ (cm água)	$ \phi_m _{15}$ (cm água)	e_{t1} (cm³/cm³)	e_{t2} (cm³/cm³)	TEMPO (horas)	TEMPO (dias)	VARIAÇÃO ARMAZENAGEM (0-22,5cm) (mm)
1	39	D. veg.	363	50	0,347	0,436	8,5	0,4	19,94
2	16,3	D. veg.	237	132	0,361	0,383	25,25	1,1	5,17
3	8,9	D. veg.	156	126	0,376	0,386	17,83	0,7	2,09
4	14,6	D. veg.	345	302	0,349	0,353	21	0,9	0,89
5	22,6	D. veg.	378	66	0,346	0,419	15,50	0,6	16,41
6	20,9	D. veg.	521	157	0,338	0,376	32,50	1,4	8,56
7	22,6	D. veg.	357	80	0,348	0,408	18	0,8	13,61
Subt. 144,9		Média =	336,71	130,43	0,349	0,384	19,80	0,8	7,78
8	26,8	Reprod.	425	98	0,343	0,398	16	0,7	12,28
9	21,5	Reprod.	544	126	0,337	0,386	24,5	1,0	10,93
10	26,8	Reprod.	501	71	0,339	0,415	16	0,7	17,09
11	26,2	Reprod.	727	88	0,331	0,403	11,5	0,5	16,29
12	24,8	Reprod.	454	92	0,341	0,401	5,5	0,2	13,39
13	26	Reprod.	454	105	0,341	0,394	14	0,6	11,89
14	23,6	Reprod.	582	88	0,335	0,403	11,5	0,5	15,23
Subt. 175,7		Média =	526,71	95,43	0,338	0,399	14,14	0,6	13,78
15	25,6	Maturação	577	69	0,336	0,417	7,50	0,3	18,19
16	23,3	Maturação	526	149	0,338	0,378	13	0,5	9,10
Subt. 48,9		Média =	551,50	109,00	0,337	0,392	11,02	0,5	12,53
Total 369,40 mm									

OBS.: (t1 = leitura antes da irrigação);

(t2 = leitura após a irrigação, quando o valor de ϕ_{m15} for máximo).

Tabela 11 - Variação temporal do potencial mátrico, da unidade e da armazenagem, na fase de umedecimento do perfil do solo, na camada 22,5 a 30,0 cm.

Nº DE ORDEM IRRIG.	LÂMINA MÉDIA APLIC. CULTURA (mm)	ESTÁDIO FENOL.	ϕ_m (cm água)		ϕ_m (cm água)	e_{t1} (cm³/cm³)	e_{t2} (cm³/cm³)	TEMPO (horas)	TEMPO (dias)	VARIACÃO ARMAZENAGEM (22,5a30cm) (mm)
			t1	t2						
1	39	D. veg.	213	83		0,351	0,393	8,50	0,4	3,17
2	16,3	D. veg.	168	154		0,360	0,364	25,25	1,1	0,27
3	8,9	D. veg.	159	159		0,362	0,362	17,83	0,7	0,00
4	14,6	D. veg.	221	231		0,350	0,348	21	0,9	-0,12
5	22,6	D. veg.	257	119		0,345	0,375	39,50	1,6	2,29
6	20,9	D. veg.	262	209		0,344	0,352	32,50	1,4	0,58
7	22,6	D. veg.	275	148		0,342	0,365	42	1,8	1,72
Subt. 144,9 Média =			222,14	157,57		0,350	0,363	26,65	1,1	0,99
8	26,8	Reprod.	271	182		0,343	0,357	40,50	1,7	1,06
9	21,5	Reprod.	355	258		0,335	0,344	24,50	1,0	0,73
10	26,8	Reprod.	388	163		0,332	0,361	40	1,7	2,18
11	26,2	Reprod.	464	249		0,328	0,346	35,50	1,5	1,35
12	24,8	Reprod.	377	197		0,333	0,354	54	2,3	1,57
13	26	Reprod.	356	273		0,335	0,343	53,30	2,2	0,60
14	23,6	Reprod.	440	339		0,329	0,336	35,50	1,5	0,53
Subt. 175,7 Média =			378,71	237,29		0,333	0,347	40,47	1,7	1,08
15	25,6	Maturação	514	161		0,325	0,362	31,50	1,3	2,75
16	23,3	Maturação	463	381		0,328	0,333	46,30	1,9	0,38
Subt. 48,9 Média =			427,53	262,47		0,330	0,344	42,37	1,8	1,07
Total 369,40 mm										

OBS.: (t1 = leitura antes da irrigação);

(t2 = leitura após a irrigação, quando o valor de ϕ_m for máximo).

Em relação à variação da armazenagem de água na profundidade efetiva do sistema radicular (0 a 30 cm), nota-se, pela Tabela 12, que as irrigações de número 1 (39 mm) e de número 5 (22,6 mm) ultrapassaram a armazenagem do solo na capacidade de campo em 5% e 0.76%, respectivamente, proporcionando portanto, armazenagem completa. Ao contrário, as outras 14 irrigações efetuadas variaram a armazenagem de um mínimo de 86,81%, consequência da irrigação 4 (14,6 mm) a um máximo de 99,47% relativo à irrigação 14 (23,6 mm). Em média, a armazenagem propiciada pelas 16 irrigações efetuadas foi de 95% em relação à armazenagem na capacidade de campo. A Figura 14 apresenta os valores de armazenagem no momento da irrigação, armazenagem máxima após a irrigação e a armazenagem com o solo na "capacidade de campo".

Figura 14 - Armazenagem de água no solo: inicial, final e na "capacidade de campo".

Tabela 12 - Análise das eficiências de armazenagem calculada com base na variação de armazenagem da solução do solo.

Nº DE ORDEM IRRIG.	LÂMINA MÉDIA APLICADA (mm)	ESTÁDIO FENOL. CULTURA	ARMAZ. ANTES IRRIGAÇÃO (mm)	ARMAZ. DEPOIS IRRIGAÇÃO (mm)	ARMAZ. CAPACIDADE CAMPO (mm)	VARIACÃO ARMAZ. (mm)	EFICIÊNCIA ARMAZ. (%)
1	39	D. veg.	104,47	127,58	121,5	17,00	100,00
2	16,3	D. veg.	108,13	113,56	121,5	5,44	93,47
3	8,9	D. veg.	111,85	113,93	121,5	2,09	93,77
4	14,6	D. veg.	104,70	105,47	121,5	0,77	86,81
5	22,6	D. veg.	103,73	122,43	121,5	18,69	100,00
6	20,9	D. veg.	101,85	110,99	121,5	9,15	91,35
7	22,6	D. veg.	103,93	119,26	121,5	15,33	98,16
Subtotal	144,9	Média =	105,52	116,17	121,50	9,78	95,62
8	26,8	Reprod.	102,90	116,24	121,5	13,34	95,67
9	21,5	Reprod.	100,93	112,59	121,5	11,67	92,67
10	26,8	Reprod.	101,18	120,45	121,5	19,27	99,14
11	26,2	Reprod.	98,99	116,64	121,5	17,65	96,00
12	24,8	Reprod.	101,78	116,74	121,5	14,95	96,08
13	26	Reprod.	101,90	114,39	121,5	12,49	94,15
14	23,6	Reprod.	100,15	115,92	121,5	15,77	95,59
Subtotal	175,7	Média =	101,12	116,14	121,50	15,02	95,59
15	25,6	Mat.	99,91	120,85	121,5	20,95	99,47
16	23,3	Mat.	100,57	110,06	121,5	9,49	90,58
Subtotal	48,9	Média	100,63	115,82	121,50	15,19	95,32
Total	369,40 mm						

A análise dos resultados apresentados indica que o critério utilizado para definir o momento e a quantidade de água a ser aplicada, a partir das informações fornecidas pelo tensiômetro, possibilitou alta eficiência de armazenagem, significando portanto que, do total de água infiltrado devido à irrigação, 95% foram armazenados na profundidade efetiva do sistema radicular, ficando disponível às plantas. O valor mais baixo de armazenagem antes de cada irrigação foi de 98,99 mm, isto é 81,47% do valor da armazenagem à capacidade de campo (121,5 mm). Este valor representa uma depleção de água em função da quantidade de água disponível de 68,71%. O solo no momento da irrigação estava com uma reserva de água de 31,29%, (10,25 mm), o que equivale a um potencial mátrico médio de -0.066MPa . Nesta situação de estresse a cultura permaneceu somente 11,5 horas. A cultura em nenhum momento esteve com um valor de "déficit" hídrico capaz de comprometer o seu rendimento. Esta assertiva é corroborada pelos resultados apresentados em MAGALHÃES *et alii* (1979) para a cultura do feijoeiro.

Em média, a cultura ficou com uma depleção de água no solo da ordem de 19,08 mm, significando um valor de 58,24% em relação à água disponível (32,76 mm), num intervalo de tempo médio de 19:00 horas. No período de desenvolvimento vegetativo este valor foi de 16,78 mm, equivalente a uma depleção de 48,78%. No período reprodutivo a depleção foi em média de 62,21%, e, na maturação, de 63,71%.

Como pode ser observado, os valores de "déficit" de água no solo foram aumentando ao longo do ciclo da cultura devido ao crescimento da demanda evapotranspirativa. Observa-se, também, uma tendência do potencial mátrico na profundidade de 30 cm ir-se tornando cada vez mais negativo. Seu valor antes de cada irrigação passa de $-0,0271$ MPa no início do período reprodutivo para $-0,0514$ MPa, no início da fase de maturação. Esta constatação, mostra que as aplicações de água através da irrigação, atingiram adequadamente a profundidade efetiva do sistema radicular (0-30 cm). Nesse sentido, pode-se afirmar que as lâminas de água aplicadas, não sofreram perdas relevantes por percolação profunda, abaixo da camada considerada.

Antes de se iniciar o processo de umedecimento do solo, correlacionou-se os valores de potencial mátrico medidos anteriormente a cada irrigação, nas profundidades de 15 e 30 cm. Obteve-se, uma equação que estima o valor do potencial mátrico a 15 cm, tendo como base, os valores do potencial mátrico a 30 cm. Essa equação, possibilita a previsão dos valores de potencial mátrico na profundidade de 15 cm, acima da faixa de operação dos tensiômetros (0,0 a 0,075 MPa). A correlação é linear, com coeficiente de determinação R^2 de 0,75. A análise de variância do modelo mostrou ser este significativo ao nível de 1% no teste F. A Figura 15 apresenta os valores determinados e os valores estimados pela equação [30].

$$|\psi_{m_{15}}| = a + b |\psi_{m_{30}}| \quad [30]$$

onde:

$|\psi_{m_{15}}|$ = módulo do potencial mátrico a 15 cm de profundidade, em cm de água;

$|\psi_{m_{30}}|$ = módulo do potencial mátrico a 30 cm de profundidade, em cm de água;

a e b = parâmetros empíricos da equação (a = 90,58 e b = 1,10).

Figura 15 - Potenciais mátricos (15 e 30 cm) antes de cada irrigação.

Os resultados obtidos estão em concordância com as conclusões de STONE *et alii* (1988), que não encontraram diferença no rendimento da cultura do feijoeiro quando a irrigação foi controlada, tanto pelo tensiômetro localizado a 15 cm de profundidade como pelo de 30 cm, em solo com um perfil homogêneo como o Latossolo Vermelho-Escuro. Apesar do resultado obtido, os autores recomendaram o controle do potencial mátrico pelo tensiômetro de 15 cm de profundidade conforme o adotado no presente trabalho.

4.3.2. Processo de secagem do solo

Este processo ocorre entre o tempo t_1 após a irrigação em que as leituras dos tensiômetros possibilitam a definição do valor máximo de armazenagem no perfil do solo, e o tempo t_2 quando se obtém o valor mínimo de armazenagem no perfil do solo (momento da irrigação). Os valores máximos e mínimos de armazenagem estão intimamente associados aos intervalos de leitura executada nos tensiômetros (130 em 80 dias; em média, 1 leitura a cada 15 horas). A análise deste processo ocorreu a partir da definição da primeira irrigação. O objetivo da análise do processo de secagem está voltado para a determinação dos intervalos de irrigação efetivamente havidos em função do controle da irrigação com o tensiômetro. As Tabelas 13 e 14 apresentam os resultados obtidos, para as camadas de 0 a 22,5 cm e 22,5 a 30,0 cm, respectivamente.

Tabela 13 - Variação temporal do potencial mátrico, da umidade e da armazenagem na fase de secagem do perfil do solo, na camada de 0 a 22,5 cm.

Nº DE ORDEN	LÁMINA MÉDIA	ESTÁDIO FENOL.	$ \phi_m _{15}$	$ \phi_m _{15}$	e_{t1}	e_{t2}	TEMPO (horas)	TEMPO (dias)	VARIACÃO ARMazenagem (mm)
IRRIG.	APLIC.	CULTURA	t1 (cm água)	t2 (cm água)	cm³/cm³	cm³/cm³			
1	39	D. veg.	50	237	0,436	0,361	169,17	7,0	16,96
2	16,3	D. veg.	132	156	0,383	0,376	24	1,0	1,62
3	8,9	D. veg.	126	345	0,386	0,349	122,17	5,1	8,29
4	14,6	D. veg.	302	378	0,353	0,346	31	1,3	1,46
5	22,6	D. veg.	66	521	0,419	0,338	129	5,4	18,24
6	20,9	D. veg.	157	357	0,376	0,348	54,20	2,3	6,37
7	22,6	D. veg.	80	425	0,408	0,343	95,50	4,0	14,68
Subt.	144,9	Média =	130,43	345,57	0,384	0,349	89,29	3,7	7,95
8	26,8	Reprod.	98	544	0,398	0,337	96	4,0	13,64
9	21,5	Reprod.	126	501	0,386	0,339	54,20	2,3	10,50
10	26,8	Reprod.	71	727	0,415	0,331	105,50	4,4	18,93
11	26,2	Reprod.	88	454	0,403	0,341	82,17	3,4	13,91
12	24,8	Reprod.	92	454	0,401	0,341	81	3,4	13,39
13	26	Reprod.	105	582	0,394	0,335	72,50	3,0	13,27
14	23,6	Reprod.	88	577	0,403	0,336	129,17	5,4	15,01
Subt.	175,7	Média =	95,43	548,43	0,399	0,337	88,65	3,7	13,99
15	25,6	Maturação	69	526	0,417	0,338	150	6,7	17,72
16	23,3	Maturação	149	209	0,378	0,365	33,40	1,4	2,99
Subt.	48,9	Média =	551,50	109,00	0,337	0,392	71,88	4,0	10,22
Total	369,50	mm							

OBS.: (t1 = leitura após a irrigação, quando o valor de ϕ_{m15} for máximo);
(t2 = leitura antes da irrigação).

Tabela 14 - Variação temporal do potencial mátrico, da unidade e da armazenagem na fase de secagem do perfil do solo, na camada de 22,5 a 30,0 cm.

Nº DE ORDEN	LÂMINA ESTÁDIO MÉDIA FENOL.	$ \phi_m _{30}$ t1 (cm água)	$ \phi_m _{30}$ t2 (cm água)	θ_{t1} (cm³/cm³)	θ_{t2} (cm³/cm³)	TEMPO (horas)	TEMPO (dias)	VARIAÇÃO ARMazenagem (22,5a30cm) (mm)
1	39 D. veg.	83	168	0,393	0,360	169,17	7,0	2,49
2	16,3 D. veg.	154	159	0,364	0,362	24	1,0	0,10
3	8,9 D. veg.	159	221	0,362	0,350	122,17	5,1	0,94
4	14,6 D. veg.	231	257	0,348	0,345	31	1,3	0,27
5	22,6 D. veg.	119	262	0,375	0,344	105	4,4	2,33
6	20,9 D. veg.	209	275	0,352	0,342	54,20	2,3	0,70
7	22,6 D. veg.	148	271	0,365	0,343	71,50	3,0	1,69
Subt.	144,9 Média =	157,57	230,43	0,363	0,348	82,43	3,4	1,08
8	26,8 Reprod.	182	355	0,357	0,335	72,20	3,0	1,67
9	21,5 Reprod.	258	388	0,344	0,332	54,20	2,3	0,92
10	26,8 Reprod.	163	464	0,361	0,328	86	3,6	2,53
11	26,2 Reprod.	249	377	0,346	0,333	54,20	3,6	0,95
12	24,8 Reprod.	197	356	0,354	0,335	32,50	2,3	1,45
13	26 Reprod.	273	440	0,343	0,329	33,20	1,4	1,03
14	23,6 Reprod.	339	514	0,336	0,325	105,20	1,4	0,82
Subt.	175,7 Média =	237,29	413,43	0,347	0,331	62,50	4,4	1,25
15	25,6 Maturação	161	463	0,362	0,328	136	5,7	2,56
16	23,3 Maturação	452	383	0,328	0,333	33,30	1,4	-0,33
Subt.	48,9 Média =	306,50	423	0,339	0,330	136	5,7	0,68
Total	369,5 mm							

OBS.: (t1 = leitura após a irrigação, quando o valor de ϕ_{m30} for máximo);
(t2 = leitura antes da irrigação).

Para a análise dos intervalos de irrigação, foram escolhidas, entre as 16 irrigações havidas, aquelas em que os valores do potencial mátrico a 15 cm de profundidade variaram entre os valores próximos à "capacidade de campo" até valores próximos ao "limite crítico" de $-0,060$ MPa.

Neste sentido, observa-se que a irrigação de número 5 na fase de desenvolvimento vegetativo, com um intervalo de irrigação de 5,4 dias aproximadamente, representa, de forma mais adequada, o tempo de depleção da água no solo para esta fase, pois os potenciais variaram de $-0,006$ MPa (próximo à "capacidade de campo") até $-0,0521$ MPa, durante um intervalo de tempo de 129 horas. O período reprodutivo pode ser representado pelo valor médio das 7 irrigações efetuadas nesse período, uma vez que o valor do potencial mátrico médio variou de $-0,0095$ MPa a $-0,0548$ MPa, durante um tempo médio de 88,17 horas, ou seja, aproximadamente 3,5 dias. A irrigação de número 15 representa a fase de maturação. Nessa fase, o potencial mátrico variou de $-0,0069$ MPa até $-0,0526$ MPa durante um período de tempo de 160 horas, ou seja, aproximadamente 6,5 dias.

4.4. Uniformidade de Distribuição de Água e Eficiência de Irrigação

Os parâmetros estatísticos que definem a uniformidade de distribuição de água estão apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 - Parâmetros relativos a uniformidade de distribuição de água.

Nº DE ORDEM DAS IRRIG.	DATA LEITURA	LÂMINA REQUERIDA Dr (mm)	L. MÉDIA COLETADA Dm (mm)	LÂMINA REQUER. ADIMEN. Hr = Dr / Dm	COEFICIENTE DE CHRISTIANSEN CUC (%)	UNIFORMIDADE DE DISTRIBUIÇÃO UD (%)	COEFICIENTE DE VARIACÃO (CV)
1	15-Jul-88	17,04	39,00	0,4	86,87	80,88	0,168
2	23-Jul-88	13,36	16,36	0,8	86,31	79,37	0,176
3	25-Jul-88	9,63	8,90	1,1	90,96	87,67	0,110
4	31-Jul-88	16,80	14,64	1,1	83,86	76,45	0,233
5	02-Ago-88	17,77	22,60	0,8	90,88	85,36	0,119
6	08-Ago-88	19,65	20,90	0,9	91,80	87,67	0,106
7	12-Ago-88	17,57	22,60	0,8	86,57	80,66	0,168
8	17-Ago-88	18,61	26,80	0,7	90,41	82,96	0,118
9	22-Ago-88	20,58	21,48	1,0	92,13	86,09	0,103
10	25-Ago-88	20,33	26,80	0,8	89,46	81,58	0,142
11	30-Ago-88	22,51	26,16	0,9	93,35	87,09	0,091
12	03-Set-88	19,73	24,75	0,8	88,86	83,68	0,138
13	07-Set-88	19,61	26,00	0,8	88,09	78,38	0,158
14	11-Set-88	21,36	23,60	0,9	93,47	91,23	0,084
15	17-Set-88	21,60	25,60	0,8	90,52	84,41	0,121
16	24-Set-88	20,92	23,25	0,9	87,54	79,62	0,159
Irr.	Acumulada	297,06	369,44	0,8	93,97	90,97	0,072

De maneira geral, observou-se valores elevados para o coeficiente de uniformidade de CHRISTIANSEN (CUC) e da uniformidade padrão de CRIDDLE (UD) em todas as irrigações realizadas. Os menores valores foram causados pela irrigação 4, com 83,8% e 76,4%, para CUC e UD, respectivamente. Nota-se que, quando os volumes coletados das 16 irrigações efetuadas foram totalizados, a dispersão em torno do valor médio da lâmina de água diminui. Os parâmetros estatísticos obtidos nesta condição foram de, respectivamente, 93,4% CUC, 91% UD e 7,2% de coeficiente de variação. NORUM *et alii* (1983)¹, citados por THOYAMANI & NORUM (1987), obtiveram resultados de uniformidade de aplicação em ambas as direções circular e radial do pivô central acima do valor geralmente aceito, que é de 80% em 8 diferentes equipamentos. Valores similares foram encontrados por BRIDI *et alii* (1986) e COLOMBO *et alii* (1988), durante ensaios de avaliação de desempenho de equipamentos do tipo pivô central.

A Figura 16 apresenta o resultado do perfil de distribuição das lâminas de água das 16 irrigações ao longo do raio do pivô central. Nota-se que, apesar dos valores altos de uniformidade apresentados, o equipamento acumulou uma região de excesso de água entre 12,5 e 72,5 m de distância do ponto do pivô. Nesta região do pivô central, cuja área representa 5,30% da área total irrigada, a diferença

¹ NORUM, D.I.; MURRAY, J.M.; DUBETZ, S. Evaluation of and recommendation for operation of low pressure center pivô Aprinklers. Ottawa, Prairie Regional Agriculture Canada, 1983 (36p.) (Publ. 1-4791).

entre o valor médio e o valor máximo de lâmina de água foi de 90,5 mm. Isto ocorreu no coletor 5, a 22,5 m do ponto do pivô central.

16 IRRIGAÇÕES (CUC = 94 % UD = 91 % cv = 7,2 % $D_m = 370$ mm)

Figura 16 - Perfil da distribuição de água acumulada em 16 irrigações.

Notam-se, no perfil de distribuição das 16 lâminas de água acumuladas, três regiões características. A primeira, onde ocorreu excesso de água (17% acima do valor médio); a segunda, entre 75 m a 250 m, onde houve pouca dispersão dos valores em torno da média, representando 58,8% da área irrigada; e, por último, uma região com valores de pre-

precipitação abaixo do valor médio da lâmina, entre 250 a 300 mm no final do pivô, representando 28,40% da área irrigada. Notou-se um gradiente nos valores de precipitação do centro para a região externa do pivô central.

A análise do gráfico da Figura 17 indica que 97% da área irrigada sob o pivô central recebeu um valor igual ou superior à lâmina requerida, cujo valor médio para as 16 irrigações foi de 297,06 mm. Isto significa que somente 3% da área irrigada recebeu precipitações inferiores à lâmina requerida.

Figura 17 - Distribuição normal acumulada das 16 irrigações segundo modelo WALKER (1979).

A Tabela 16 e a Figura 18 apresentam os resultados das eficiências de aplicação e de armazenagem calculadas para cada uma das 16 irrigações efetuadas. A primeira irrigação apresentou eficiência de aplicação muito baixa devido aos problemas eletromecânicos ocorridos durante a irrigação, no relê de controle de velocidade do sistema. Nesta irrigação, o equipamento aplicou 2,5 vezes o valor da lâmina requerida.

Quando se comparam os resultados obtidos utilizando-se o modelo de WALKER (1979), para o cálculo da eficiência de armazenagem, com os resultados de eficiência real medidos pelo tensiômetro (Tabela 12), observa-se que os valores de eficiência de armazenagem fornecidos pelo modelo de WALKER (1979) são mais elevados. Isto é explicado pelo fato de que as áreas de "déficit" de água, estimadas pelo modelo proposto por esse autor, foram sempre muito reduzidas em função dos valores determinados para lâmina requerida.

Neste caso, os valores encontram-se dentro da região final da curva de distribuição normal acumulada, onde foi feita aproximação, por Δ' , para eliminar-se a característica assintótica, conforme o modelo de WALKER (1979).

Tabela 16 - Parâmetros de eficiência de armazenagem e aplicação de água, segundo WALKER (1979).

NÚMERO DE ORDEM DAS IRRIGAÇÕES	LÂMINA REQUERIDA Dr (z=30cm) (mm)	LÂM. MÉDIA COLETADA Dm (mm)	LÂMINA REQUERIDA ADIMENSIONAL Hr = Dr/Dm	COEF. DE VARIACÃO IRRIGAÇÃO (cv)	Δ	Δ'
1	17,04	39,00	0,4	0,168	0,563	0,611
2	13,36	16,36	0,8	0,176	0,184	0,640
3	9,63	8,90	1,1	0,110	-0,082	0,400
4	16,80	14,64	1,1	0,233	-0,148	0,846
5	17,77	22,60	0,8	0,119	0,214	0,431
6	19,65	20,90	0,9	0,106	0,060	0,386
7	17,57	22,60	0,8	0,168	0,223	0,612
8	18,61	26,80	0,7	0,118	0,306	0,429
9	20,58	21,48	1,0	0,103	0,042	0,375
10	20,33	26,80	0,8	0,142	0,242	0,515
11	22,51	26,16	0,9	0,091	0,139	0,332
12	19,73	24,75	0,8	0,138	0,203	0,503
13	19,61	26,00	0,8	0,158	0,246	0,575
14	21,36	23,60	0,9	0,084	0,095	0,304
15	21,60	25,60	0,8	0,121	0,156	0,438
16	20,92	23,25	0,9	0,159	0,100	0,577
TOTAL	297,06	369,44	0,8	0,072	0,196	0,262

continua.

Tabela 16 - Continuação.

NÚMERO DE ORDEM DAS IRRIGAÇÕES	RELAÇÃO: Δ/Δ'	ÁREA DE DEFICIT C%	EFICIÊNCIA APLICAÇÃO C%	EFICIÊNCIA ARMAZENAGEM C%
1	0,92	0,011	43,7	100,0
2	0,29	16,098	80,0	98,0
3	-0,20	91,837	99,5	92,0
4	-0,17	84,461	98,2	85,6
5	0,50	5,078	78,4	99,7
6	0,15	28,356	92,1	97,9
7	0,36	11,026	76,8	98,7
8	0,71	0,782	69,4	100,0
9	0,11	33,357	93,5	97,6
10	0,47	6,046	75,5	99,5
11	0,42	8,116	85,7	99,6
12	0,40	8,888	79,1	99,2
13	0,43	7,768	74,8	99,2
14	0,31	14,226	89,8	99,3
15	0,36	11,434	83,6	99,1
16	0,17	26,296	87,3	97,0
TOTAL	0,75	0,503	80,4	100,0

Figura 18 - Eficiências das irrigações, segundo modelo de WALKER (1979).

A Figura 19 apresenta o gráfico dos valores da eficiência de aplicação e armazenagem em função da lâmina adimensional (D_r/D_m), com base nos valores acumulados das 16 irrigações. Observa-se que, para a lâmina adimensional requerida de 0,8 (valor médio das 16 irrigações), as eficiências de armazenagem e aplicação foram respectivamente 100% e 80%. Para a lâmina adimensional de 1, os valores das eficiências estariam em condições ideais, isto é, 97,5% para as duas. Como a cultura do feijão foi considerada de alto valor econômico, anteriormente ao experimento, optou-se, segundo

critério de SCALOPPI (1984), por irrigar com valores mais elevados de eficiência de armazenagem, diminuindo a possibilidade de perda de rendimento em função de áreas com "déficit" de irrigação.

16 IRRIGAÇÕES (CUC = 94%, UD = 91%, CV = 7.2 %)

Figura 19 - Eficiências em função da lâmina adimensional.

4.5. Evapotranspiração da Cultura do Feijão

Com a finalidade de analisar e discutir os dados de evapotranspiração da cultura de feijão em função dos estádios fenológicos, o ciclo de desenvolvimento da cultura durante o período em que houve o controle da irrigação foi dividido em 3 fases. A primeira, do vigésimo quinto dia ao

quincuagésimo oitavo dia após sementeira, dentro do estágio de desenvolvimento vegetativo; a segunda, do quinquagésimo nono dia ao nonagésimo quarto dia após a sementeira, compreendendo do início da floração ao final da formação das vagens; a terceira e última fase, compreendendo o estágio fenológico da maturação (nonagésimo quinto dia até o centésimo quarto dia após a sementeira).

A evapotranspiração da cultura foi estimada a partir de dados de evaporação obtidos no tanque "classe A", utilizando os coeficientes de tanque (K_p) e o coeficiente de cultura (K_c), conforme DOOREMBOS & KASSAN (1979); além do coeficiente de depleção de água no solo (K_s), sugerido por BRONER (1990) e BERNARDO (1986).

Os valores diários de evaporação do tanque "classe A" e das evapotranspirações de referência (ET_o); máxima (ET_m); e atual (ET_a), com seus respectivos coeficientes, K_p , K_c e K_s , estão apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 - Estimativa da evapotranspiração de referência (ETo), evapotranspiração máxima (ETm) e da evapotranspiração atual (ETa) segundo DOOREM-BOS & KASSAN (1979).

DATA	ESTÁDIO DE DESENV.	DIAS APÓS SEMEADURA	ECA (mm)	ETo (mm)	Kc FAO	ETm (mm)	FATOR DEPLEÇÃO Ks	ETa (mm)	ETa ACUM. (mm)	ETa FASE (mm/dia)
09-Jul-88		25	3,0	2,4	0,7	1,68	-	-	-	
10-Jul-88		26	1,6	1,3	0,7	0,90	0,93	0,84	0,84	2,26
11-Jul-88		27	4,7	3,8	0,7	2,63	0,92	2,46	3,29	2,26
12-Jul-88		28	3,3	2,6	0,7	1,85	0,90	1,70	4,99	2,26
13-Jul-88		29	5,6	4,5	0,7	3,14	0,89	2,84	7,83	2,26
14-Jul-88		30	5,9	4,7	0,7	3,30	0,87	2,94	10,77	2,26
15-Jul-88		31	4,1	3,3	0,7	2,30	0,85	2,01	12,77	2,26
16-Jul-88		32	5,4	4,3	0,7	3,02	0,90	2,58	15,36	2,26
17-Jul-88		33	5,4	4,3	0,7	3,01	1,00	2,72	18,08	2,26
18-Jul-88	D	34	5,3	4,3	0,7	2,98	0,98	3,02	21,10	2,26
19-Jul-88	E	35	5,6	4,5	0,7	3,14	0,96	3,08	24,18	2,26
20-Jul-88	S	36	3,6	2,9	0,7	2,03	0,95	1,95	26,13	2,26
21-Jul-88	E	37	3,9	3,1	0,7	2,16	0,93	2,05	28,17	2,26
22-Jul-88	N	38	3,0	2,4	0,7	1,69	0,92	1,58	29,75	2,26
23-Jul-88	V	39	1,3	1,0	0,7	0,73	0,90	0,67	30,42	2,26
24-Jul-88	O	40	4,5	3,6	0,7	2,50	0,91	2,24	32,67	2,26
25-Jul-88	L	41	5,0	4,0	0,7	2,82	0,93	2,57	35,24	2,26
26-Jul-88	V	42	3,8	3,0	0,7	2,11	0,93	1,96	37,20	2,26
27-Jul-88	I	43	5,5	4,4	0,7	3,08	0,94	2,88	40,08	2,26
28-Jul-88	M	44	5,4	4,3	0,7	3,02	0,92	2,83	42,91	2,26
29-Jul-88	E	45	3,8	3,1	0,7	2,15	0,91	1,98	44,89	2,26
30-Jul-88	N	46	2,8	2,2	0,7	1,56	0,89	1,41	46,31	2,26
31-Jul-88	T	47	6,5	5,2	0,7	3,63	0,86	3,22	49,52	2,26
01-Ago-88	O	48	5,1	4,1	0,7	2,84	0,85	2,45	51,97	2,26
02-Ago-88		49	5,1	4,1	0,7	2,86	0,84	2,43	54,40	2,26
03-Ago-88		50	4,0	3,2	0,7	2,25	0,89	1,90	56,30	2,26
04-Ago-88		51	4,0	3,2	0,7	2,21	0,98	1,96	58,26	2,26

continua.

Tabela 17 - Continuação.

DATA	ESTÁDIO DE DESENV.	DIAS APÓS SEMEADURA	ECA (mm)	ETo (mm)	Kc FAO	ETm (mm)	FATOR DEPLEÇÃO Ks	ETa (mm)	ETa ACUM. (mm)	ETa FASE (mm/dia)
05-Ago-88	FASE I	52	5,5	4,4	0,7	3,09	0,96	3,04	61,31	2,26
06-Ago-88		53	2,3	1,8	0,7	1,29	0,93	1,23	62,54	2,26
07-Ago-88		54	5,2	4,2	0,7	2,92	0,90	2,72	65,26	2,26
08-Ago-88		55	3,5	2,8	0,7	1,97	0,84	1,77	67,03	2,26
09-Ago-88		56	4,2	3,4	0,7	2,36	0,84	1,98	69,02	2,26
10-Ago-88		57	4,8	3,9	0,7	2,70	0,91	2,26	71,28	2,26
11-Ago-88	-----	58	6,6	5,3	0,7	3,71	0,90	3,36	74,64	2,26
12-Ago-88		59	3,4	2,7	1,05	2,83	0,86	2,55	77,19	4,48
13-Ago-88	F	60	4,6	3,7	1,05	3,87	0,89	3,33	80,52	4,48
14-Ago-88	L	61	4,5	3,6	1,05	3,80	0,97	3,37	83,89	4,48
15-Ago-88	O	62	4,9	3,9	1,05	4,12	0,93	3,98	87,87	4,48
16-Ago-88	R	63	6,9	5,5	1,05	5,80	0,88	5,37	93,24	4,48
17-Ago-88	A	64	4,8	3,9	1,05	4,06	0,84	3,58	96,82	4,48
18-Ago-88	C	65	4,5	3,6	1,05	3,77	0,87	3,17	99,98	4,48
19-Ago-88	Ã	66	5,0	4,0	1,05	4,23	0,94	3,67	103,65	4,48
20-Ago-88	O	67	4,6	3,7	1,05	3,90	0,91	3,68	107,33	4,48
21-Ago-88		68	6,2	4,9	1,05	5,19	0,86	4,70	112,03	4,48
22-Ago-88		69	6,0	4,8	1,05	5,03	0,81	4,32	116,36	4,48
23-Ago-88		70	7,8	6,2	1,05	6,56	0,84	5,32	121,68	4,48
24-Ago-88	e	71	6,0	4,8	1,05	5,06	0,91	4,24	125,92	4,48
25-Ago-88		72	6,9	5,5	1,05	5,80	0,83	5,27	131,19	4,48
26-Ago-88		73	6,9	5,5	1,05	5,81	0,85	4,84	136,02	4,48
27-Ago-88	F	74	3,5	2,8	1,05	2,94	0,97	2,51	138,53	4,48
28-Ago-88	R	75	6,3	5,0	1,05	5,29	0,92	5,13	143,66	4,48
29-Ago-88	U	76	7,5	6,0	1,05	6,28	0,87	5,81	149,47	4,48
30-Ago-88	T	77	7,9	6,3	1,05	6,64	0,79	5,79	155,26	4,48
31-Ago-88	I	78	7,2	5,7	1,05	6,01	0,81	4,76	160,02	4,48
01-Set-88	F	79	4,6	3,7	1,05	3,86	0,95	3,13	163,15	4,48
02-Set-88	I	80	7,0	5,6	1,05	5,87	0,91	5,56	168,71	4,48
03-Set-88	C	81	5,6	4,5	1,05	4,74	0,84	4,32	173,02	4,48
04-Set-88	A	82	4,2	3,3	1,05	3,51	0,85	2,95	175,97	4,48
05-Set-88	C	83	6,3	5,1	1,05	5,33	0,96	4,55	180,52	4,48
06-Set-88	Ã	84	7,9	6,3	1,05	6,64	0,93	6,34	186,86	4,48
07-Set-88	O	85	3,5	2,8	1,05	2,94	0,85	2,74	189,60	4,48
08-Set-88		86	8,2	6,5	1,05	6,86	0,85	5,83	195,43	4,48
09-Set-88		87	8,9	7,2	1,05	7,51	0,92	6,39	201,82	4,48
10-Set-88		88	4,7	3,8	1,05	3,95	0,90	3,63	205,45	4,48

continua.

Tabela 17 - Continuação.

DATA	ESTÁDIO DE DESENV.	DIAS APÓS SEMEADURA	ECA (mm)	ET ₀ (mm)	K _c FAO	ET _m (mm)	FAIOR DEPLEÇÃO K _s	ET _a (mm)	ET _a ACUM. (mm)	ET _a FASE (mm/dia)
11-Set-88	FASE II	89	7,5	6,0	1,05	6,32	0,82	5,68	211,13	4,48
12-Set-88		90	11,3	9,0	1,05	9,48	0,83	7,78	218,91	4,48
13-Set-88		91	6,3	5,0	1,05	5,26	0,94	4,36	223,26	4,48
14-Set-88		92	9,4	7,6	1,05	7,93	0,89	7,44	230,70	4,48
15-Set-88		93	3,3	2,7	1,05	2,81	0,84	2,49	233,19	4,48
16-Set-88	-----	94	3,7	3,0	1,05	3,14	0,80	2,63	235,82	4,48
17-Set-88	M	95	3,8	3,1	0,65	1,99	0,78	1,59	237,41	3,12
18-Set-88	A	96	5,2	4,2	0,65	2,70	0,83	2,10	239,51	3,12
19-Set-88	T	97	3,8	3,0	0,65	1,98	0,98	1,64	241,15	3,12
20-Set-88	U	98	7,1	5,7	0,65	3,70	0,96	3,62	244,77	3,12
21-Set-88	R	99	9,6	7,7	0,65	4,99	0,92	4,80	249,57	3,12
22-Set-88	A	100	6,4	5,1	0,65	3,31	0,89	3,05	252,63	3,12
23-Set-88	C	101	8,3	6,7	0,65	4,33	0,85	3,83	256,46	3,12
24-Set-88	Á	102	4,9	3,9	0,65	2,53	0,81	2,15	258,60	3,12
25-Set-88	O	103	8,2	6,5	0,65	4,24	0,83	3,42	262,02	3,12
26-Set-88	FASE III	104	11,8	9,4	0,65	6,12	0,89	5,05	267,07	3,12
TOTAIS =			436,4	349,1		302,64				

Os valores médios diários de ETa, por fase da cultura foram os seguintes:

- a) Fase I (desenvolvimento vegetativo) = 2,26 mm;
- b) Fase II (reprodutivo) = 4,48 mm;
- c) Fase III (maturação) = 3,12 mm.

A evapotranspiração média de 80 dias do ciclo da cultura foi de 3,38 mm. Como pode ser observado pela análise dos gráficos das Figuras 20 e 21, o maior consumo de água se deu no período reprodutivo. Neste mesmo período de desenvolvimento da cultura, LOUREIRO *et alii* (1990), utilizando coeficientes de cultura (Kc) determinados por MANTOVANI (1988) e DOOREMBOS & KASSAN (1979), obtiveram um valor de 2,31 mm/dia de consumo máximo em Viçosa, MG, no período de abril a julho de 1987. O menor consumo de água (52%) em relação ao valor observado em Guaíra, SP, ocorreu devido às baixas temperaturas e doenças havidas durante a fase reprodutiva da cultura, conforme os autores observaram no experimento. FRIZZONE (1986) e COSTA (1986) citam vários trabalhos cujos autores estimaram, para a cultura do feijão de inverno, um intervalo de consumo de água entre 3,0 e 5,3 mm/dia no período de maior demanda evapotranspirativa, nas mais diferentes regiões de cerrado do país. O resultado obtido para Guaíra, na safra de inverno de 1988, enquadra-se dentro desta faixa de variação.

Figura 20 - Evaporação (ECA) e Evapotranspiração atual (ETa) diárias ao longo do ciclo da cultura.

Figura 21 - Evapotranspiração referência (ETo) e evapotranspiração máxima (ETm) ao longo do ciclo da cultura.

4.5.1. "Déficit" de água no solo e a evapotranspiração (ETa)

Os valores do coeficiente de depleção de umidade do solo (K_s) estão apresentados na Tabela 18. Nota-se que o menor valor de K_s foi 0,78 no início da maturação. Estes valores mostram que a relação entre a evapotranspiração atual (ETa) e a máxima (ETm) para todo o ciclo da cultura foi, em média, 0,88.

Os gráficos das Figuras 22 e 23, apresentam a variação do valor de água disponível no solo, ao longo do ciclo da cultura. Observa-se que, a camada considerada de 0 a 30 cm para a profundidade efetiva do sistema radicular, sempre permaneceu com disponibilidade de água para a cultura.

A comparação dos valores de reserva de água no solo obtidos pela diferença entre a armazenagem diária e a armazenagem no ponto de murchamento permanente, bem como os limites críticos de água no solo definidos com base na evapotranspiração máxima da cultura sugeridos por DOOREMBOS & KASSAN (1979), estão apresentados na Figura 24.

Tabela 18 - Cálculo do fator Ks, do valor da capacidade de água disponível do solo (Wm), da depleção de água no solo (Dp) e do valor Dp/Wm.

DIAS APÓS SEMEADURA	MÓDULO POTENCIAL MÁTRICO (15 cm) cm ÁGUA	UNIDADE VOLUMÉTRICA ESTIMADA GENUÏTEN cm ³ /cm ³	MÓDULO POTENCIAL MÁTRICO (30 cm) cm ÁGUA	UNIDADE VOLUMÉTRICA ESTIMADA GENUÏTEN cm ³ /cm ³	ARMAZENAGEM ATUAL DO SOLO CAMADA (0 a 30 cm) mm	ARMAZENAGEM DE CAMPO mm	VALOR DA DEPLEÇÃO DE ÁGUA NO SOLO (Dp) mm	ARMAZENAGEM CAPACIDADE DE DEPLEÇÃO DE MURCHAMENTO DISPONÍVEL mm	RELAÇÃO DE DEPLEÇÃO DE ÁGUA NO SOLO Dp/Wm	Ks
25	152,8	0,377	128,3	0,372	112,73	121,50	8,77	88,74	0,27	0,93
26	174,7	0,368	139,5	0,368	111,23	121,50	10,27	88,74	0,31	0,92
27	202,2	0,364	151,2	0,364	109,72	121,50	11,78	88,74	0,36	0,90
28	234,7	0,361	162,7	0,361	108,30	121,50	13,20	88,74	0,40	0,89
29	274,4	0,358	177,4	0,358	106,87	121,50	14,63	88,74	0,45	0,87
30	329,3	0,354	198,7	0,354	105,29	121,50	16,21	88,74	0,49	0,85
31	206,7	0,365	148,1	0,365	108,60	121,50	11,90	88,74	0,36	0,90
32	67,7	0,418	86,4	0,391	123,29	121,50	-1,90	88,74	-0,05	1,01
33	96,8	0,398	95,1	0,386	118,56	121,50	2,94	88,74	0,09	0,98
34	117,1	0,389	106,9	0,380	116,03	121,50	5,47	88,74	0,17	0,96
35	134,7	0,383	118,1	0,375	114,24	121,50	7,27	88,74	0,22	0,95
36	151,0	0,378	128,3	0,372	112,85	121,50	8,66	88,74	0,26	0,93
37	174,7	0,372	139,7	0,368	111,23	121,50	10,27	88,74	0,31	0,92
38	213,8	0,364	156,7	0,363	109,15	121,50	12,35	88,74	0,38	0,90
39	184,5	0,370	160,6	0,362	110,31	121,50	11,20	88,74	0,34	0,91
40	114,0	0,380	156,2	0,363	112,66	121,50	8,84	88,74	0,27	0,93
41	140,6	0,381	159,1	0,362	112,83	121,50	8,67	88,74	0,26	0,93
42	135,7	0,382	159,6	0,362	113,17	121,50	8,33	88,74	0,25	0,94
43	159,0	0,378	166,5	0,360	111,53	121,50	9,98	88,74	0,30	0,92
44	189,6	0,369	177,0	0,358	109,78	121,50	11,72	88,74	0,36	0,91
45	229,8	0,362	188,7	0,356	108,02	121,50	13,48	88,74	0,41	0,89
46	298,7	0,353	208,7	0,352	105,81	121,50	15,69	88,74	0,48	0,86
47	323,6	0,351	225,7	0,349	105,06	121,50	16,44	88,74	0,50	0,85
48	340,3	0,349	243,6	0,346	104,53	121,50	16,97	88,74	0,52	0,84
49	222,0	0,353	202,7	0,353	108,09	121,50	13,41	88,74	0,41	0,89
50	82,3	0,407	134,0	0,370	119,23	121,50	2,27	88,74	0,07	0,98
51	114,6	0,390	128,9	0,372	119,88	121,50	5,83	88,74	0,18	0,96
52	151,3	0,378	142,4	0,367	112,48	121,50	9,03	88,74	0,28	0,93
53	202,0	0,368	166,6	0,360	109,42	121,50	12,08	88,74	0,37	0,90
54	376,5	0,348	221,2	0,350	104,14	121,50	17,36	88,74	0,53	0,84
55	354,5	0,348	254,4	0,345	104,16	121,50	17,34	88,74	0,53	0,84
56	172,3	0,372	228,0	0,349	109,91	121,50	11,59	88,74	0,36	0,91
57	186,0	0,369	215,4	0,351	109,39	121,50	12,11	88,74	0,37	0,90
58	285,9	0,354	248,6	0,346	105,66	121,50	15,84	88,74	0,48	0,86
59	218,3	0,363	213,9	0,351	108,08	121,50	13,42	88,74	0,41	0,89
60	99,3	0,397	150,2	0,365	116,67	121,50	4,83	88,74	0,15	0,97
61	150,9	0,378	168,8	0,360	111,98	121,50	9,53	88,74	0,29	0,93
62	237,2	0,360	204,9	0,352	107,55	121,50	13,96	88,74	0,43	0,88
63	358,1	0,348	245,6	0,346	104,18	121,50	17,32	88,74	0,53	0,84
64	261,5	0,357	246,0	0,346	106,33	121,50	15,17	88,74	0,46	0,87

Tabela 18 - Continuação.

DIAS APÓS SEMEADURA	MÓDULO POTENCIAL MÁTRICO (15 cm) cm	UNIDADE VOLUMÉTRICA ESTIMADA GENUCHTEN cm ³ /cm ³	MÓDULO POTENCIAL MÁTRICO (30 cm) cm	UNIDADE VOLUMÉTRICA ESTIMADA GENUCHTEN cm ³ /cm ³	ARMAZENAGEM ATUAL DO SOLO CAMADA SOLO a 30 cm mm	ARMAZENAGEM CAPACIDADE DE CAMPO mm	VALOR DA DEPLEÇÃO DE ÁGUA NO SOLO (Dp) mm	ARMAZENAGEM CAPACIDADE DE ÁGUA MURCHAMENTO PERMANENTE mm	DEPLEÇÃO DE ÁGUA NO SOLO Dp/Wm	Ks
66	118,3	0,368	201,1	0,353	113,99	121,50	7,61	88,74	0,23	0,94
67	179,8	0,371	201,5	0,353	109,87	121,50	11,63	88,74	0,35	0,91
68	284,1	0,365	250,1	0,346	105,99	121,50	15,81	88,74	0,48	0,86
69	445,8	0,342	316,8	0,338	102,26	121,50	19,24	88,74	0,59	0,81
70	335,2	0,350	306,5	0,339	104,08	121,50	17,42	88,74	0,53	0,84
71	163,8	0,374	259,8	0,344	110,03	121,50	11,47	88,74	0,36	0,91
72	361,8	0,348	324,4	0,337	103,54	121,50	17,88	88,74	0,53	0,83
73	286,1	0,354	286,7	0,341	105,31	121,50	16,19	88,74	0,49	0,85
74	92,0	0,401	174,5	0,359	117,08	121,50	4,42	88,74	0,13	0,97
75	150,8	0,378	179,4	0,358	111,80	121,50	9,71	88,74	0,30	0,92
76	256,5	0,358	224,3	0,349	106,71	121,50	14,79	88,74	0,45	0,87
77	525,8	0,338	358,4	0,334	101,08	121,50	20,42	88,74	0,62	0,79
78	407,6	0,344	410,2	0,331	102,24	121,50	19,27	88,74	0,59	0,81
79	103,3	0,395	302,8	0,339	114,32	121,50	7,18	88,74	0,22	0,95
80	158,7	0,375	256,6	0,345	110,36	121,50	11,15	88,74	0,34	0,91
81	326,6	0,350	320,3	0,338	104,15	121,50	17,35	88,74	0,53	0,84
82	273,3	0,356	331,1	0,337	105,31	121,50	16,20	88,74	0,49	0,85
83	97,4	0,398	265,2	0,344	115,30	121,50	6,20	88,74	0,19	0,96
84	129,5	0,384	221,0	0,350	112,71	121,50	8,79	88,74	0,27	0,93
85	305,4	0,352	276,7	0,342	104,94	121,50	16,56	88,74	0,51	0,85
86	279,7	0,355	351,4	0,335	105,01	121,50	16,49	88,74	0,50	0,85
87	137,8	0,382	319,0	0,338	111,19	121,50	10,31	88,74	0,31	0,92
88	175,9	0,371	282,3	0,342	109,20	121,50	12,31	88,74	0,36	0,90
89	381,6	0,346	356,7	0,335	102,92	121,50	18,58	88,74	0,57	0,82
90	335,0	0,350	442,4	0,329	103,31	121,50	18,19	88,74	0,56	0,83
91	107,5	0,393	391,7	0,332	113,33	121,50	8,17	88,74	0,25	0,94
92	188,9	0,369	342,9	0,336	108,14	121,50	13,36	88,74	0,41	0,89
93	318,8	0,351	375,8	0,333	103,97	121,50	17,54	88,74	0,54	0,84
94	455,7	0,341	436,8	0,329	101,47	121,50	20,04	88,74	0,61	0,80
95	550,5	0,337	491,8	0,326	100,22	121,50	21,28	88,74	0,65	0,78
96	322,6	0,351	459,2	0,328	103,49	121,50	18,01	88,74	0,55	0,83
97	75,1	0,412	282,6	0,342	118,25	121,50	3,25	88,74	0,10	0,98
98	100,4	0,396	188,4	0,360	116,19	121,50	5,31	88,74	0,16	0,96
99	149,6	0,378	192,3	0,355	111,68	121,50	9,83	88,74	0,30	0,92
100	215,3	0,364	237,4	0,347	107,92	121,50	13,58	88,74	0,41	0,89
101	302,8	0,353	287,7	0,341	104,91	121,50	16,59	88,74	0,51	0,85
102	440,2	0,342	366,1	0,332	101,91	121,50	19,50	88,74	0,60	0,81
103	337,1	0,349	457,3	0,328	103,21	121,50	18,29	88,74	0,56	0,83
104	178,9	0,371	416,4	0,330	108,21	121,50	13,29	88,74	0,41	0,89

— CAPACIDADE DE ÁGUA DISPONÍVEL

Figura 22 - Água disponível no solo para profundidade efetiva do sistema radicular de 30 cm ao longo do ciclo da cultura.

Figura 23 - Armazenagem de água no solo (da superfície até a profundidade efetiva do sistema radicular) ao longo do ciclo da cultura.

— OBSERVADO — — — MODELO (FAO) 1-p.

Figura 24 - Água disponível no solo e o fator (1-p) de disponibilidade hídrica de DOOREMBOS & KASSAN (1979) ao longo do ciclo da cultura.

Como pode ser observado na Figura 24, na fase de desenvolvimento vegetativo (até o 58º dia após a semeadura), os valores de reserva de água no solo ficaram bem acima dos limites propostos por DOOREMBOS & KASSAN (1979), isto em face da pouca demanda evapotranspirativa, bem como, por se considerar fixa a profundidade efetiva do sistema radicular em 30 cm. No período onde o efeito do "déficit" de água é mais acentuado, conforme MILLAR (1984), a fração de reserva de água no solo ficou muito próxima dos limites críticos definidos pelo fator p sugerido por DOOREMBOS & KASSAN (1979). Os valores diários de p , foram obtidos através da equação [31], resultado da análise de regressão entre os valores de ET_m e de p , apresentados pelos autores, para a cultura do feijoeiro.

$$p = 0,8575 - 0,0596 \cdot ET_m$$

[31]

onde:

p = fração da água disponível do solo que pode ser deplecionada sem que a ET_a chegue ser inferior a ET_m .

Depende da cultura, do valor de ET_m e do solo.

ET_m = evapotranspiração máxima da cultura (mm), estimada em função da evaporação do tanque "classe A" através da equação [20] (página 56).

4.6. Balanço Hídrico com o Uso do Tensiômetro

Apesar do controle da irrigação ter sido executado de forma estática, sem considerar a demanda evapotranspirativa da atmosfera e levando em conta somente o valor do potencial mátrico, fornecido pelo tensiômetro, reconhece-se o fato de que o sistema solo/água interage de forma dinâmica. É a taxa de movimentação da água no solo ou a sua densidade de fluxo ($\vec{q}$), e não o potencial ou a umidade do solo que determinam a necessidade ou não de irrigação, conforme discutido em CAMPBELL & CAMPBELL (1982). Para o cálculo do balanço hídrico da cultura as medidas de umidade e/ou de potencial mátrico são necessárias para serem utilizadas com um conjunto de outras informações sobre o sistema solo/planta/atmosfera.

No sentido de avaliar o processo de monitoramento da água no solo de uma forma mais dinâmica, é que se desenvolveu o estudo do balanço hídrico da cultura.

4.6.1. Os componentes do balanço hídrico

A fase experimental de 80 dias sob controle de irrigação foi dividida em 11 períodos, com intervalo de tempo variável. O resultado dos valores obtidos para cada um dos componentes do balanço hídrico, para cada um dos períodos considerados, está apresentado na Tabela 19.

Foi assumido que 95% do sistema radicular da cultura, em média, tivessem sido envolvidos nos processos de transferência.

A Figura 25 apresenta a variação temporal dos componentes do balanço hídrico.

Figura 25 - Componentes do balanço hídrico.

Tabela 19 - Valores em mm de água dos componentes do Balanço hídrico.

PERÍODO	DATAS SELECIONADAS	DIAS DO PERÍODO	VALOR DA DRENAGEM PROFUNDA (mm)	VALOR DA ASCENSÃO CAPILAR (mm)	VALOR DA LÂMINA DE ÁGUA INFILT. NO SOLO (mm)	VARIÇÃO DE ARMAZENAGEM DE ÁGUA NO SOLO (mm)	EVAPOTRANS- PIRAÇÃO DA CULTURA (mm)
1	10/07 a 14/07/88	5	0,00	4,88	0,00	-5,86	10,75
2	15/07 a 22/07/88	8	18,80	3,86	39,00	4,36	19,70
3	23/07 a 30/07/88	8	2,73	1,42	25,26	-3,21	27,16
4	31/07 a 07/08/88	8	6,65	0,79	37,24	1,40	29,97
5	08/08 a 14/08/88	7	2,37	0,32	43,50	7,25	34,20
6	15/08 a 21/08/88	7	1,07	0,14	26,80	-10,98	36,85
7	22/08 a 27/08/88	6	0,04	0,01	48,28	-2,05	50,29
8	28/08 a 02/09/88	7	1,65	0,03	26,16	10,68	13,85
9	03/09 a 10/09/88	8	0,33	0,00	50,75	-3,13	53,56
10	11/09 a 16/09/88	6	0,02	0,00	23,60	-7,23	30,80
11	17/09 a 26/09/88	10	1,72	0,00	48,85	4,24	42,89
TOTAIS		80,00	35,40	11,46	369,44	-4,52	350,03

4.6.1.1. Evapotranspiração (ETa)

Verifica-se que a evapotranspiração total da cultura foi de 350.03 mm, correspondendo a 94,75% do valor da quantidade de água aplicada pelo sistema de irrigação. Durante o período compreendido entre 25^o ao 58^o dia após a semeadura, o valor médio de ETa foi de 3,38 mm; no período que compreendeu do 59^o ao 94^o dia após a semeadura, o valor médio foi de 5,44 mm; e do 95^o ao 104^o dia após a semeadura, o valor médio foi de 4,04 mm.

Observa-se que os valores de evapotranspiração calculados a partir do balanço hídrico foram superiores aos estimados pelo método de DOOREMBOS & KASSAN (1979) em 49,56%, 21,43% e 29,49%, respectivamente, para os três períodos considerados. Em relação ao período total de 80 dias, o valor da ETa calculada pelo balanço hídrico, foi maior que a ETa estimada pelo método de DOOREMBOS & KASSAN (1979), em 31,06%, isto é, o método sugerido pela FAO subestimou em 82,96 mm a evapotranspiração havida no período de controle da irrigação. Esse resultado pode estar relacionado, tanto com a distância do tanque "classe A" em relação a área experimental (100 Km) como aos erros cometidos ao serem utilizados, de forma arbitrária os coeficientes de conversão do tanque "classe A" (K_p) e coeficiente de cultura (K_c). As Figuras 26 e 27 apresentam, respectivamente, a comparação dos valores diários e acumulados de evapotranspiração determinados pelos dois procedimentos. Os valores de ETa diários

foram obtidos através da análise de regressão entre os valores médios de evapotranspiração determinados para cada um dos onze períodos considerados (Tabela 19) e o valor médio do dia após semeadura referente a cada período estudado. A equação [32] estima estes valores.

$$ETa = 0,4466 \times \text{Exp}(0,0658d - 0,000427d^2) \quad [32]$$

onde:

ETa = evapotranspiração em mm/dia;

d = dia após semeadura (DAS).

Através da análise de variância o modelo é significativo ao nível de 1%. O coeficiente de determinação do modelo R^2 foi de 0,94.

A Figura 28 apresenta os valores diários de evapotranspiração real diários obtidos pelo modelo exponencial quadrático.

A Figura 29 apresenta o gráfico comparativo dos valores médios por fase da cultura da razão ETa/ETo e os coeficientes de cultura sugeridos por DOOREMBOS & KASSAN (1979). Os valores médios de ETa/ETo e Kc foram respectivamente 1,06, 1,22, 0,95; e, 0,70, 1,05 e 0,65 para as três fases da cultura, respectivamente. MANTOVANI *et alii* (1988) obtiveram para o feijão irrigado em plantio de seca os seguintes valores para a relação ETa/ETo : 0,85; 1,43 e 0,41 nos estádios de desenvolvimento vegetativo, reprodutivo e de maturação, respectivamente.

Figura 26 - Evapotranspiração pelos métodos do balanço hídrico e tanque "classe A".

Figura 27 - Evapotranspiração acumulada estimada pelo tanque "classe A" e pelo balanço hídrico a campo.

Figura 28 - Evapotranspiração (ET_a) estimada pelo balanço hídrico a campo.

Figura 29 - Coeficiente de cultura e relação ET_a/ET_o .

STEINMETZ (1984)¹, citado por MOREIRA *et alii* (1988), observou que os valores de Kc do feijão foram de 0,69; 1,28 e 1,04 para as fases de germinação ao início da floração, floração e desenvolvimento de vagens à maturação, respectivamente. COSTA (1986) obteve para a fase de desenvolvimento vegetativo, floração, formação de vagens e maturação, os seguintes valores de Kc: 1,35; 1,27; 1,07 e 0,83, respectivamente. Os valores das duas fases iniciais foram superestimados, segundo o autor, devido à não contabilização do escoamento superficial, e pelo fato de não ter sido calculada a variação de armazenagem na camada de 0-22,5 cm.

Os resultados da evapotranspiração da cultura do feijão calculados pelo balanço hídrico obtidos por COSTA (1986) foram superestimados em relação aos métodos climatológicos em função de três condicionantes básicas: (i) não contabilização da armazenagem na superfície; (ii) não determinação do escoamento superficial e (iii) utilizou-se de uma função K(c) para estimar a drenagem profunda. Estes fatores tornam-se muito relevantes, principalmente quando há períodos chuvosos durante o ciclo da cultura. Ao contrário, em períodos onde a evapotranspiração é elevada e sem precipitação (como o ocorrido neste trabalho) o método do balanço hídrico fornece melhores estimativas de evapotranspiração.

¹ STEINMETZ, S. Evapotranspiração máxima no cultivo de feijão de inverno. Goiânia, EMBRAPA/CNPAP, 1984. 4p. EMBRAPA/CNPAP, Pesquisa em andamento, 47).

4.6.1.2. Drenagem profunda

O cálculo da drenagem profunda foi feito através da equação de BUCKINGHAM-DARCY (01), para uma única função $K(\phi_m)$, representando toda a área e desprezando-se a variabilidade espacial deste atributo do solo.

A função $K(\phi_m)$ utilizada para o cálculo da drenagem foi calculada pela equação [26].

Os valores da condutividade hidráulica e do gradiente de potencial total da solução do solo, em função do tempo, estão apresentados no gráfico da Figura 30. Nota-se que durante o período de 17/07 a 21/07/88 (33º ao 37º dia após a semeadura) os valores da condutividade hidráulica foram os mais elevados, em função da primeira irrigação de 39 mm ocorrida no dia 15/07/88. A tendência do potencial mátrico tornar-se mais negativo na profundidade de 30 cm durante o ciclo da cultura é confirmada pelos valores elevados dos gradientes de potencial total positivos a partir do dia 31/08/88 (78º dia após a semeadura), bem como pelos baixos valores da condutividade hidráulica apresentados nesse período.

Os valores de drenagem profunda representam 9,58% do total de água aplicado por irrigação. Das perdas havidas, 53,11% ocorreram no período de 15/07/88 a 22/07/88, como consequência da primeira irrigação.

Valores de drenagem profunda obtidos por SILVEIRA & STONE (1979), trabalhando com a cultura do feijão

em Latossolo Vermelho Amarelo, foram da ordem de 18% da evapotranspiração calculada (220,47 mm), para a profundidade de 60 cm. COSTA (1986) obteve 47,75 mm de drenagem profunda para a camada de 45 cm de profundidade trabalhando com feijão em Terra Roxa Estruturada; esse valor representou 14,89% da precipitação ocorrida. SILVEIRA *et alii* (1981), obtiveram para o feijão de inverno irrigado um valor de 10,01 mm de drenagem profunda em Latossolo Vermelho Escuro, com a profundidade da camada considerada em 120 cm. Esse valor representou 3,12% dos valores de precipitação somados à irrigação.

Figura 30 - Variação da condutividade hidráulica e do gradiente de potencial ao longo do ciclo da cultura.

4.7. Rendimento da Cultura e Eficiência do Uso da Água

A Tabela 20 apresenta os resultados dos rendimentos havidos nas 60 parcelas experimentais ($5,3 \text{ m}^2$).

A Tabela 21 apresenta os resultados representativos do rendimento da cultura e a eficiência do uso da água para cada uma das baterias de tensiômetro instaladas ao longo do raio do pivô central.

Os altos valores de eficiência do uso da água obtidos nesse experimento, em relação aos índices relatados por DOOREMBOS & KASSAN (1979), demonstraram o desempenho adequado da metodologia de controle de irrigação utilizada. Apesar de se ter obtido uma alta eficiência de armazenagem (100%), conseguiu-se um baixo valor de percolação profunda (10%) e um alto valor de eficiência de aplicação (80%), implicando portanto, num alto valor de eficiência do uso da água.

A Figura 31 mostra os valores dos rendimentos ao longo do raio do pivô central. O rendimento médio da área foi obtido utilizando-se da mesma metodologia adotada para o cálculo do potencial mátrico médio (ver equação [6]), e da lâmina média ponderada (ver equação [12]), que são similares. Este procedimento foi adotado para se obter uma coerência metodológica e facilidade de comparações entre o potencial mátrico, lâmina de irrigação e rendimento da cultura. O valor do rendimento médio ponderado foi de $3044,02 \text{ kg/ha}$; o coeficiente de variação do rendimento ao longo do pivô central foi de 5%. Isto mostra compatibilidade com os valores

obtidos para o coeficiente de variação da distribuição de água das 16 irrigações acumuladas, cujo valor foi de 7%.

Tabela 20 - Rendimento (kg/ha) e lâmina de água aplicada (mm).

Nº DE ORDEM REPET.	Nº DE ORDEM PARCELA	RENDIM. PARCELA (kg/ha)	VALOR MÉDIO RENDIMENTO (kg/ha)	VALOR DA LÂMINA ÁGUA (mm)
1	1	2939,96	2913,25	367,07
2		2949,21		
3		2850,58		
4	2	2819,81	3035,85	460,95
5		2824,62		
6		3472,11		
7	3	2656,85	2887,23	423,39
8		2920,04		
9		3084,81		
10	4	3170,47	2983,04	433,84
11		2725,32		
12		3053,32		
13	5	2859,17	2858,89	415,81
14		2678,87		
15		3038,64		
16	6	2818,49	2970,44	388,19
17		2837,43		
18		3255,40		
19	7	2949,08	3021,60	391,50
20		3012,06		
21		3103,66		
22	8	3065,40	3049,91	382,35
23		2954,96		
24		3129,38		
25	9	2912,06	3050,34	391,43
26		2828,38		
27		3410,58		
28	10	3000,23	3183,62	371,91
29		3384,60		
30		3166,04		

Tabela 20 - Continuação.

Nº DE ORDEM REPET.	Nº DE ORDEM PARCELA	RENDIM. PARCELA (kg/ha)	VALOR MÉDIO RENDIMENTO (kg/ha)	VALOR DA LÂMINA ÁGUA (mm)
31	11	2955,17	2996,77	360,14
32		3071,11		
33		2964,04		
34	12	2927,13	3058,83	377,73
35		2895,47		
36		3353,89		
37	13	3297,40	3243,96	364,31
38		3148,58		
39		3285,89		
40	14	3065,89	3245,67	347,88
41		3336,28		
42		3334,85		
43	15	3308,96	3288,50	387,77
44		3109,34		
45		3447,21		
46	16	3070,55	3026,34	353,12
47		3032,57		
48		2975,91		
49	17	3121,81	2959,67	391,46
50		2752,26		
51		3004,94		
52	18	2915,51	2964,78	356,31
53		3107,23		
54		2871,60		
55	19	3047,17	3079,88	332,59
56		3145,09		
57		3047,38		
58	20	2839,42	2766,42	331,19
59		2422,43		
60		3037,40		

Tabela 21 - Eficiência do Uso da Água (EUA).

Nº DE ORDEM DA PARCELA	VALOR MÉDIO DO RENDIMENTO (kg/ha)	VALOR DA LÂMINA ÁGUA (mm)	EFICIÊNCIA DO USO DA ÁGUA (kg/m ³)
1	2913,25	367,07	0,794
2	3035,85	460,95	0,659
3	2887,23	423,39	0,682
4	2983,04	433,84	0,688
5	2858,89	415,81	0,688
6	2970,44	388,19	0,765
7	3021,60	391,50	0,772
8	3049,91	382,35	0,798
9	3050,34	391,43	0,779
10	3183,62	371,91	0,856
11	2996,77	360,14	0,832
12	3058,83	377,73	0,810
13	3243,96	364,31	0,890
14	3245,67	347,88	0,933
15	3288,50	387,77	0,848
16	3026,34	353,12	0,857
17	2959,67	391,46	0,756
18	2964,78	356,31	0,832
19	3079,88	332,59	0,926
20	2766,42	331,19	0,835

Figura 31 - Rendimento do feijoeiro ao longo do raio do pivô central.

A Tabela 22 mostra que as baterias de tensiômetro 2 a 5 (situadas entre 22,5 a 67,5 m do ponto do pivô central) receberam uma lâmina adimensional de água (lâmina coletada D_i /lâmina média D_m) de 1,17 em média, para um valor médio de rendimento relativo (rendimento da parcela i /rendimento máximo) de 89%. A bateria de tensiômetro 20 localizada na extremidade final do pivô central (292,5 m) recebeu uma lâmina adimensional de 0,9 com um rendimento relativo de 84%. Nota-se, portanto, que a diferença de rendimento relativo, entre os locais que receberam uma lâmina de água adimensional de 1,17 e 0,9 foi de 6,32% quando comparada com um adicional de lâmina de aproximadamente 17% do valor da lâmina média. Esse fato sugere que as áreas de "déficit" de água devam ser economicamente mais vantajosas do que as áreas de excesso.

Tabela 22 - Valores adimensionais de lâmina de água, potencial mátrico e rendimento relativo ao longo do raio do pivô central, para a cultura do feijão.

BATERIAS TENSÍOM.	DISTÂNCIA PONTO DO PIVÔ (cm)	FRAÇÃO DE ÁREA ADIMEN- SIONAL (dec)	VALOR ADIMENSIONAL DE LÂMINA DE ÁGUA (dec)	LÂMINA MÉDIA (mm)	VALOR DO POT. MÁTRICO ADIMEN- SIONAL (dec)	MÓDULO DO POT. MÁT. (cm ÁGUA)	RENDIMENTO RELATIVO (dec)	RENDIMENTO (kg/ha)
1	7,5	0,0025	0,99	367,07	0,54	130,76	0,89	2913,25
2	22,5	0,0075	1,25	480,95	0,79	191,08	0,92	3035,85
3	37,5	0,0125	1,14	423,39	0,66	159,13	0,88	2887,23
4	52,5	0,0175	1,17	433,84	0,57	138,45	0,91	2983,04
5	67,5	0,0225	1,12	415,81	0,65	158,20	0,87	2858,89
6	82,5	0,0275	1,05	388,19	0,84	203,64	0,90	2970,44
7	97,5	0,0325	1,06	391,50	0,76	183,37	0,92	3021,60
8	112,5	0,0375	1,03	382,35	1,11	269,53	0,93	3049,91
9	127,5	0,0425	1,08	391,43	0,70	168,59	0,93	3050,34
10	142,5	0,0475	1,01	371,91	1,04	251,64	0,97	3183,62
11	157,5	0,0525	0,97	360,14	1,01	244,48	0,91	2996,77
12	172,5	0,0575	1,02	377,73	0,72	174,33	0,93	3058,83
13	187,5	0,0625	0,98	364,31	0,80	194,69	0,99	3243,96
14	202,5	0,0675	0,94	347,88	1,01	244,25	0,99	3245,67
15	217,5	0,0725	1,05	387,77	0,75	182,11	1,00	3288,50
16	232,5	0,0775	0,95	353,12	1,25	303,08	0,92	3026,34
17	247,5	0,0825	1,06	391,46	1,03	249,63	0,90	2959,67
18	262,5	0,0875	0,96	356,31	1,21	292,87	0,90	2964,78
19	277,5	0,0925	0,90	332,59	1,08	260,42	0,94	3079,88
20	292,5	0,0975	0,90	331,19	1,34	323,98	0,84	2766,42
		1,0000						

Os rendimentos obtidos foram 67,81% maiores do que o valor médio obtido por 15 autores em pesquisas realizadas com diferentes cultivares, em diversas localidades do Brasil, citados por MOREIRA *et alii* (1988).

A função de produção pode ser observada no gráfico da Figura 32. Nota-se que os maiores valores de rendimento foram obtidos nas áreas onde o pivô central aplicou uma lâmina de água variando de 365 a 380 mm.

A função de produção é representada pela seguinte equação:

$$\hat{Y} = f(W) = \hat{a} + \hat{b}W + \hat{c}W^2 \quad [33]$$

em que:

$\hat{Y}$ = estimativa do rendimento de grãos, Kg/ha;

W = lâmina total de água aplicada, mm;

$\hat{a}$, $\hat{b}$ e $\hat{c}$ = parâmetros da equação cujos valores são: -23577,14; 139,61; e - 0,1825; respectivamente.

O coeficiente de determinação R^2 foi 0,94 e o modelo significativo pelo teste F a 1%.

Esta função é válida para a faixa de lâminas de água entre 340 mm a 420 mm.

Figura 32 - Função de produção.

4.8. Variação da Distribuição de Água, Umidade, Potencial Mátrico e o Rendimento Relativo da Cultura ao Longo do Raio do Pivô Central

Analizando as curvas do gráfico apresentado na Figura 33, observa-se que os valores acumulados das lâminas de água (16 irrigações) ao longo do raio do pivô central tiveram tendência a diminuir seus valores do ponto do pivô para o seu final (460 mm a 22,5 m para 331,19 mm a 292,5 m). Os valores médios do potencial mátrico da solução do solo apresentaram o comportamento inverso, pois passaram de -0,0131 MPa a 7,5 metros do ponto do pivô, para -0,0324 MPa a 292,5 metros. Os valores de umidade obtidos através da curva de retenção mostram que este atributo sofreu uma variação muito menor, ao longo do raio do pivô central, do que

os valores do potencial mátrico. Mesmo assim, confirmam o efeito observado da distribuição de água no sistema de irrigação. O comportamento da variação do potencial mátrico do solo em função da distribuição de água pelo pivô central, mostra, portanto, uma íntima relação entre causa e efeito. PAIVA (1980) afirma que a distribuição dos valores de potencial mátrico é muito mais dependente da uniformidade de distribuição da água aplicada superficialmente do que a dos valores de umidade. Os resultados obtidos, apresentados na Figura 33, estão concordantes com as conclusões de PAIVA (1980).

Figura 33 - Variação da umidade, do potencial mátrico e da lâmina coletada, ao longo do pivô central.

Tendo em vista os resultados anteriormente apresentados, o tensiômetro com manômetro de mercúrio é um instrumento sensível na detecção das variações de umidade do solo provocadas pela variação na distribuição de água ao longo do raio do pivô central. Este fato faz com que a estimativa do número de tensiômetros a serem instalados para monitorar a irrigação de uma cultura deva levar em consideração, além da homogeneidade dos atributos físico-hídricos do solo, a distribuição de água do sistema de irrigação. Ressalta-se, através destes resultados, a importância de ponderar o resultado das leituras do tensiômetro em função da área representativa, principalmente em casos como a irrigação por pivô central.

Ao assumir que não houve diferenciação nas dosagens dos insumos aplicados ao longo do raio do pivô central, e que a variação do rendimento foi causada somente pela distribuição de água, observa-se pelo gráfico da Figura 34 que os maiores rendimentos (7% maiores que o valor médio) estão localizados entre 187,5 e 217,5 metros em uma área de 3,82 ha, correspondendo a 12,6% da área total. Nota-se que há uma diminuição dos valores de rendimento do centro da área irrigada (212,5 m) para as extremidades. O valor de rendimento máximo representa um incremento de 244,5 kg/ha em relação ao valor do rendimento médio, na produção total da área.

Figura 34 - Variação do rendimento e das lâminas coletadas ao longo do pivô central.

4.9. Estimativa do Número Mínimo e Localização dos Tensiômetros

Ao assumir que o solo na área experimental é isotrópico em relação a seus atributos físico-hídricos, pode-se constatar através do modelo de regressão linear múltipla, que 4 baterias de tensiômetros são suficientes para representar a distribuição do potencial mátrico (130 leituras em 20 tensiômetros), em função de sua posição ao longo do raio do pivô central. Este modelo linear é representado pela seguinte equação [34]:

$$\begin{aligned}\phi_m = & -6,4644 - 0,4919BAT_1 - 0,6888BAT_4 + \\ & + 0,2709BAT_6 + 0,0802BAT_{10}\end{aligned}\quad [34]$$

onde:

ϕ_m = valor do módulo do potencial mátrico da área irrigada.

BAT_1 , BAT_4 , BAT_6 e BAT_{10} = módulos do potencial mátrico correspondentes às respectivas posições ao longo do raio do pivô central.

A análise de variância do modelo foi significativa ao nível de 1%. O coeficiente de determinação R^2 foi de 0,8636.

A interpretação física do modelo está intimamente associada à distribuição de água do sistema de irrigação, conforme exposto anteriormente. As quatro posições selecionadas representaram a tendência, ao longo das 16 irrigações ocorridas, do sistema aplicar lâminas de água mais elevadas próximas ao centro do pivô central. Confirma-se, desta maneira, a sensibilidade do tensiômetro como instrumento capaz de detectar as variações de lâmina de água infiltrada e redistribuída no perfil do solo.

5. CONCLUSÕES

Nas condições do experimento os resultados obtidos permitem concluir que:

- O tensiômetro com manômetro de mercúrio é um instrumento viável para o controle de irrigação por pivô central em área de Latossolo Roxo (Typic Haporthox), com cultura do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.);
- A equação utilizada para descrever a relação funcional entre a umidade volumétrica (θ) e o potencial mátrico, segundo GENUCHTEN (1980) ajustou-se aos dados experimentais;
- A drenagem profunda foi da ordem de 10% do valor da irrigação aplicada. Foi causada por três motivos básicos:
 - i) Problemas eletromecânicos no relê controlador da velocidade do equipamento durante a primeira irrigação. Este fato causou cerca de 50% das perdas.
 - ii) Por não se adotar o critério da demanda evapotranspirativa, fator p de DOOREMBOS & KASSAN (1979), para definir as irrigações. Isto ocorreu principalmente na fase de desenvolvimento vegetativo, onde a taxa de eva-

potranspiração era baixa e a profundidade efetiva do sistema radicular menor do que a fixada de 30 cm. Este fato causou cerca de 30% das perdas.

iii) Os restantes 20% das perdas ocorreram durante a fase reprodutiva e de maturação da cultura, e foram consequência do critério adotado de se irrigar com elevada eficiência de armazenagem.

- A diferença dos valores de evapotranspiração calculados pelo método do balanço hídrico e estimados pelo tanque "classe A" está associada a localização do tanque "classe A" e aos valores de coeficiente de cultura utilizados;
- O pivô central aumenta os coeficientes de uniformidade quando os volumes de água de cada irrigação são totalizados. Neste sentido, os efeitos climáticos sobre a uniformidade de distribuição de água, como o vento, são compensados ao longo do ciclo da cultura, à exceção da extremidade final. Por outro lado, quando o problema é hidráulico, como ocorreu nos primeiros 100 metros, a dispersão dos valores se acentua. O comportamento do rendimento da cultura ao longo do raio do pivô central, esteve diretamente associado a uniformidade de distribuição de água, que por sua vez, influenciou diretamente nos valores de potenciais mátricos medidos através das 20 baterias de tensiômetros;

- Quatro é o número mínimo de baterias de tensiômetros a serem instalados para controle da irrigação em equipamento de irrigação pivô central. São localizadas a 7,5 m, 52,5 m, 82,5 m e 277,5 m do ponto do pivô central. As profundidades de instalação são a 15 e a 30 cm da superfície do solo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARRUDA, F.B. Uso da água na produção agrícola. In: SIMPÓSIO SOBRE MANEJO DE ÁGUA NA AGRICULTURA, Campinas, 1987. Anais. Campinas, Fundação Cargill, 1987. p.177-99.
- AZEVEDO, J.A. de & CAIXETA, T.J. Irrigação do feijoeiro. Planaltina, EMBRAPA/CPAC, 1986. 60p. (EMBRAPA/CPAC. Circular Técnica, 23).
- AZEVEDO, J.A. de; SILVA, E.M. da; MORETHSON, R.; GUERRA, A.F. Aspectos sobre o manejo da irrigação por aspersão para o cerrado. 2 ed. Planaltina, EMBRAPA/CPAC, 1986. 52p. (EMBRAPA/CPAC. Circular Técnica, 16).
- BACCHI, O.O.S. & REICHARDT, K. Escalonamento de propriedades hídricas na avaliação de métodos de determinação da condutividade hidráulica de solos. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, 12: 217-23, 1988.
- BASCUR, B.G. & FRITSCH, F.N. Efeitos de métodos y frecuencias de riego sobre componentes de rendimiento en frejol (*Phaseolus vulgaris* L.). Agricultura Técnica, Santiago, 35(3): 147-52, jul./Set. 1975.
- BERNARDO, S. Manual de irrigação. 4. ed. Viçosa, UFV Impr. Univ., 1986. 488p.
- BONANO, A.R. & MACK, H.J. Yield components and pod quality of snap beans grown under differential irrigation. Jour-

nal of the American Society for Horticultural Science, Alexandria, 108(5): 832-6, 1983.

- BRIDI, S.; BERNARDO, S.; FERREIRA, P.A.; SEDIYAMA, G.C. Análise de uniformidade da distribuição de água em sistema de irrigação por pivô central. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 7., Brasília, 1986. Anais. Brasília, ABID, 1986. v.1, p.27-52.
- BRONER, I. Irrigation scheduling with atmometers. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON IRRIGATION, 5., Tel. Aviv, 1990. Proceedings. Tel. Aviv, 1990. p.99-107.
- BRUNINI, O.; GROHMANN, F.; SANTOS, J.M. dos. Balanço hídrico em condições de campo para dois cultivares de arroz sob duas densidades de plantio. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, 5(1): 1-6, jan./abr., 1981.
- BULISANI, E.A. Principais problemas da cultura do feijoeiro irrigado. In: FANCELLI, A.L. Feijão irrigado. Piracicaba, FEALQ, 1990. p.25-30.
- CAIXETA, T.J. Irrigação do feijoeiro. Informe Agropecuário, Belo Horizonte, 4(46): 36-40, 1978.
- CALVACHE, M. & GARCIA, C. Dinâmica de água em un cultivo de frejol (*Phaseolus vulgaris* L.). Rumipamba, Quito, 4(1): 1-18, 1987.
- CAMARGO, A.M.P.; JUNQUEIRA, P.C.; CAMARGO FILHO, W.P. de. Área cultivada com irrigação no Estado de São Paulo. Informações Econômicas, São Paulo, 20(3): 37-52, mar. 1990.
- CAMPBELL, G.S. & CAMPBELL, M.D. Irrigation scheduling using soil moisture measurements; theory and practice. In:

- HILEL, D., ed. *Advances in irrigation*. Orlando, Academic Press, 1982. v.1, p.25-42.
- CASSEL, D.K. & KLUTE, A. Water potencial, tensiometry. In: KLUTE, A., ed. *Methods of soil analysis*. Madison, ASA/SSSA, 1986. pt.1: Physical and Mineralogical Methods, p.563-96. (Agronomy, 1).
- COLOMBO, A.; ZAGGO, S.P.; ALBINO, J.A.S.; SAAD, A.M.; SCALOPPI, E.J. Desempenho de sistema de irrigação por aspersão pivô-central em Guaíra, SP. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 8., Florianópolis. 1988. Anais. Florianópolis, ABID, 1988. v.1, p.237-58.
- COSTA, A.C.S. da. Balanço hídrico em culturas de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) e de milho (*Zea mays* L.) sob condições de campo. Piracicaba, 1986. 166p. (Mestrado - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP).
- DANE, J.H. Comparison of field and laboratory determined hydraulic conductivity values. *Soil Science Society of American Journal*, Madison, 44: 228-31, 1980.
- DOORENBOS, J. & KASSAN, A.H. Efectos del agua sobre el rendimiento del los cultivos. Roma, FAO, 1979. 212p. (Estudio FAO: Riego y Drenaje, 33).
- DOURADO NETO, D. Variabilidade espacial das alturas de chuva de irrigação e de potenciais da solução do solo. Piracicaba, 1989. 180p. (Mestrado - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP).
- DOURADO NETO, D. Aspectos práticos de manejo de sistemas de irrigação e fertirrigação na cultura do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.). In: FANCELLI, A., coord. *A cultura do feijão irrigado*. Piracicaba, FEALQ, 1990. p.115-31.

- ENCARNAÇÃO, C.R.F. Estudo da demanda de água do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) var. Goiano precoce. Piracicaba, 1979. 82p. (Mestrado - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP).
- FANCELLI, A.L., coord. Feijão irrigado. Piracicaba, FEALQ, 1990. 130p.
- FOLEGATTI, M.V. "Avaliação do desempenho de um "scheduler" na detecção do estresse hídrico em cultura do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) irrigada com diferentes lâminas". Piracicaba, 1988. 187p. (Doutorado - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP).
- FRIZZONE, J.A. Funções de resposta do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) ao uso de nitrogênio e lâmina de irrigação. Piracicaba, 1986. 133p. (Doutorado - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP).
- FRIZZONE, J.A.; CASSIANO SOBRINHO, F.; SA, M.E. de; BUZETTI, S. Efeito da irrigação e da adubação fosfatada sobre a produção de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.). In: REUNIÃO NACIONAL DE PESQUISA DE FEIJÃO, 1., Goiania, 1982. Anais. Goiania, EMBRAPA/CNPAF, 1982. p.169-72. (EMBRAPA/CNPAF. Documentos, 1).
- FULLER, K.D. & MOOLMAN, J.H. An evaluation of simplified field method used for estimating soil hydraulic conductivity. South African Tydskrif Plant Ground, Pretória, 6(1): 64-9, 1989.
- GENUCHTEN, M.T. van. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Science Society American Journal, Madison, 44: 892-7, 1980.

- GREEN, R.E.; AHUJA, L.R.; CHONG, S.K. Hydraulic conductivity, diffusivity and sorptivity of unsaturated soils: field methods. In: KLUTE, A. de. *Methods of soil analysis*. 2.ed. Madison, ASA/SSSA, 1986. pt.1: Physical and Mineralogical Methods, p.771-98. (Agronomy, 9).
- HART, W.E. Overhead irrigation pattern parameters. *Agricultural Engineers, St. Joseph*, 42(7): 354-5, 1961.
- HART, W.E. & REYNOLDS, W.N. Analitical design of sprinkler systems. *Transactions of the ASAE, St. Joseph*, 8(10): 83-9, 1965.
- HEERMAN, D.F. & HEIN, P.F. Performance characteristics of self-propelled center pivot sprinkler irrigation systems. *Transactions of the ASAE, St. Joseph*, 11(1): 11-5, 1968.
- HENDRICKYX, J.M.H. & WIERENGA, P.J. Variability of soil water tension in a trickle irrigated Chile pepper field. *Irrigation Science, St. Joseph*, 11: 23-30, 1990.
- HILLEL, D.; KRENTOS, V.D.; STYLIANOU, Y. Procedure and test of an internal drainage method for measuring soil hydraulic characteristics in situ. *Soil Science, Baltimore*, 114: 395-400, 1972.
- HILLER, E.A. Irrigation timing by the stress day index methods. *Transactions of the ASAE, St. Joseph*, 17(3): 393-8, 1974.
- HOSTALÁCIO, S. & VÁLIO, I.F.M. Desenvolvimento dos frutos de feijão em diferentes regimes de irrigação. *Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília*, 19(1): 53-7, jan. 1984a.

- HOSTALÁCIO, S. & VÁLIO, I.F.M. Desenvolvimento de plantas de feijão cv. Goiano precoce em diferentes regimes de irrigação. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, 19(2): 211-8, fev. 1984b.
- INDUE, M.; YAND, T.; CHIKUSHI, J. Optimum values of parameters in equations for estimating the soil water characteristics curve and relative hydraulic conductivity of sandy soils. Journal of the Faculty of Agriculture, Tottori University, Tottori, 19: 24-34, 1983.
- JENSEN, M.E. Summary and challengers. In: IRRIGATION SCHEDULING CONFERENCE, Chicago, 1981. Irrigation scheduling for water energy conservation in the 80's; proceedings. St. Joseph, ASAE, 1981. p.225-31.
- KLUTE, A. Water retention; laboratory methods. In: _____. Methods of soil analysis; part 1 physical and mineralogical methods. 2 ed. Madison, ASA, 1986. p.365-662. (Agronomy, 9).
- LAMBERT, J.R.; DOTY, C.W.; QUISENBERRY, V.L. Irrigation scheduling in humid areas. In: IRRIGATION SCHEDULING CONFERENCE, Chicago, 1981. Irrigation scheduling for water energy conservation in the 80's, proceedings, St. Joseph, ASAE, 1981. p.133-43.
- LIBARDI, P.L. Dinâmica da água no sistema solo-planta-atmosfera. Piracicaba, CENA, 1984. 232p.
- LIBARDI, P.L. Dinâmica da água no sistema solo-planta-atmosfera. Piracicaba, 1991. (no prelo).
- LONG, F.L. A field system for automatically measuring soil water potential. Soil Science, Baltimore, 137(4): 227-30, Apr. 1984.

- LONG, F.L. & HUCK, M.G. An automated system for measuring soil water potential gradients in a rhizotron soil profile. *Soil Science*, Baltimore, 129(5): 305-10, May 1980.
- LOUREIRO, B.T.; MACHADO, P.B.; DENÍCULI, W.; FERREIRA, P.A. Efeito de diferentes lâminas de água sobre a produtividade do feijoeiro comum (*Phaseolus vulgaris* L.). *Revista Ceres*, Viçosa, 37(211): 215-26, 1990.
- LUCHIARI JUNIOR, A. Determinação do coeficiente de cultura (Kc) para feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) pelo método do balanço hídrico. Piracicaba, 1978. 59p. (Mestrado - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP).
- MACK, H.J. & VARSEVELD, G.W. Response of bush snap beans (*Phaseolus vulgaris* L.) to irrigation and plant density. *Journal of American Society for Horticultural Science*, Alexandria, 107(2): 286-90, 1982.
- MAGALHÃES, A.A. & MILLAR, A.A. Efeito do déficit de água no período reprodutivo sobre a produção do feijão. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, 13(2): 55-60, 1978.
- MAGALHÃES, A.A.; MILLAR, A.A.; CHOUDHURY, E.N.; CHOUDHURY, M.M. Efeito do déficit fenológico de água sobre a produção do feijão. *Turrialba*, San Jose, 29(4): 269-73, 1979.
- MANTOVANI, E.C.; SEDIYAMA, G.C.; BERNARDO, S.; LOUREIRO, B.T. Coeficiente de cultura para o feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) irrigado em plantio de seca. *Revista Ceres*, Viçosa, 35(199): 297-306, 1988.
- MARQUELLI, W.A. Manejo da irrigação em hortaliças. Anápolis, EMBRAPA/CNPH, 1986. 12p. (EMBRAPA/CNPH - Circular Técnica, 2).

- MARTHALER, H.P.; VOGELSANGER, W.; RICHARD, F.; WIERENGA, P.J. A pressure transducer for field tensiometers. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, 47: 624-7, 1983.
- MILLAR, A.A. Manejo racional da irrigação; uso de informações básicas sobre diferentes culturas. Brasília, IICA, 1984. 57p. (IICA. Publicações Miscelaneas, 461).
- MILLAR, A.A. & GARDNER, W.R. Effect of soil plant water potential on the dry matter production of snap beans. *Agronomy Journal*, Madison, 64: 562-99, 1972.
- MILLER, D.E. & BURKE, D.W. Response of dry beans to daily deficit sprinkler irrigation. *Agronomy Journal*, Madison, 75(5): 775-8, 1983.
- MIRANDA, N.O. & BELMAR, C. Déficit hídrico y frecuencia de riego en frejol (*Phaseolus vulgaris* L.). *Agricultura Técnica*, Santiago, 37(3): 111-7, jul./set. 1977.
- MOREIRA, J.A.; AZEVEDO, J.A.; STONE, L.F.; CAIXETA, T.J. Irrigação. In: ZIMMERMAN, M.J., ed. *Cultura do feijoeiro: fatores que afetam a produtividade*. Piracicaba, Potafos, 1988. p.317-40.
- OLIVEIRA, J.B. de & PRADO, H. de. Levantamento pedológico semidetalhado do Estado de São Paulo: quadrícula de Ribeirão Preto; memorial descritivo. Campinas, Instituto Agrônômico, 1987. 133p. (IAC. Boletim Científico, 7).
- PAIVA, J.B.D. de. Uniformidade de aplicação de água, abaixo da superfície do solo, utilizando irrigação por aspersão. São Carlos, 1980. 333p. (Mestrado - Escola de Engenharia de São Carlos/USP).

- PEREIRA, A.R.; FERRAZ, E.S.B.; REICHARDT, K.; LIBARDI, P.L.
Estimativa da evapotranspiração e da drenagem profunda em cafezais cultivados em solos podzolizados Lins e Marília. Piracicaba, CENA/USP, 1974. 13p. (CENA. Boletim Científico, 14).
- PIZZARRO, F. Automatización por otros parámetros. In: _____. Riegos localizados de alta frecuencia. Madrid, Ediciones Mundi-Prensa, 1986. cap.13, p.356.
- POOLEY, S.G. Tensiometers in irrigated agriculture. St. Joseph, ASAE, 1973. 4p. (ASAE Paper, 73-2533).
- PURCINO, J.R.C. Irrigação do feijoeiro. Informe Agropecuário, Belo Horizonte, 8(90): 36-9, jun. 1982.
- REICHARDT, K. & LIBARDI, P.L. A new equation to estimate soil-water diffusivity. In: SIMPOSIUM ON ISOTOPES AND RADIATION TECHNIQUES IN SOIL PHYSICS AND IRRIGATION STUDIES, Viena, 1973. Proceedings. Viena, IAEA, 1974. p.45-51.
- REICHARDT, K.; LIBARDI, P.L.; SANTOS, J.M. dos. An analysis of soil-water movement in the field: II - water balance in a snap bean crop. Piracicaba, CENA/USP, 1974. 19p. (CENA, Boletim Científico, 22).
- RESENDE, M.; HENDERSON, D.W.; FERERES, E. Frequência de irrigação, desenvolvimento e produção do feijão Kidney. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, 16(3): 363-70, maio/jun. 1981.
- ROBINS, J.S. & DOMINGO, C.E. Moisture deficits in relation to the growth and development of dry beans. Agronomy Journal, Madison, 48(2): 67-70, 1956.

- SAAD, A. M., coord. Apoio tecnológico à agricultura irrigada do Município de Guaíra, São Paulo. São Paulo, Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1987. 59p. (Publicação IPT, 1746).
- SAAD, A. M.; TOGNON, A. A.; SANSIGOLO, C. Subsídios para projetos e manejo de irrigação por aspersão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 8, Florianópolis, 1988. Anais. Florianópolis, ABID, 1988. p.555-85.
- SAKAI, E. Balanço hídrico e energético na cultura irrigada do feijoeiro em latossolo roxo. Piracicaba, 1989. 121p. (Mestrado - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP).
- SCALOPPI, E. J. Eficiência de aplicação de água em sistemas de irrigação. Item Irrigação e Tecnologia Moderna, Brasília, (16): 37,40, mar. 1984.
- SCALOPPI, E. Otimização da produção em função dos recursos hídricos disponíveis. Item Irrigação e Tecnologia Moderna, Brasília, (20): 2-5, mar. 1985.
- SCARDUA, R. Evapotranspiração real da cultura do milho como base aos projetos de irrigação. Piracicaba, 1970. 160p. (Doutorado - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP).
- SILVA, A. R. da. Aconselhamento de irrigação. Item Irrigação e Tecnologia Moderna, Brasília, (33): 18-20, 1988.
- SILVEIRA, P. M. da & STONE, L. F. Balanço de água na cultura do feijão em latossolo vermelho-amarelo. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, 14(2): 111-5, abr. 1979.

- SILVEIRA, P.M. da; FONSECA, J.R.; GUIMARÃES, C.M. Consumo de água pelo feijão de 3ª época irrigado por aspersão. Goiânia, EMBRAPA/CNPAF, 1981. 5p. (EMBRAPA/CNPAF. Comunicado Técnico, 9).
- SILVEIRA, P.M. da; STEINMETZ, S.; GUIMARÃES, H.A.; CARVALHO, J.R.P. de. Lâminas de água e turnos de rega na cultura do feijoeiro de inverno. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, 19(2): 219-23, fev. 1984.
- SMAJSTRLA, A.G. & KOO, R.C. Use of tensiometers for scheduling of citrus trickle irrigation. Proceedings of the Florida State Horticultural Society, Tallahassee, 99: 51-6, 1986.
- SOUZA, J.A.G. Efeito da tensão da água do solo na cultura da cana-de-açúcar. Limeira, 1976. 183p. (Doutorado - Faculdade de Engenharia de Limeira/UNICAMP).
- STANHILL, G. A comparison of methods of calculating potential evapotranspiration from climatic data. Israel Journal Agricultural Research, Bet-Dagam, 11(3/4): 158-71, 1961.
- STANSELL, J.R. & SMITTLE, D.A. Effects of irrigation regimes on yield and water use of snap bean (*Phaseolus vulgaris* L.). Journal of American Society for Horticultural Science, Alexandria, 105(6): 869-73, 1980.
- STEGMAN, E.C.; MUSICK, J.T.; STEWART, J.I. Irrigation water management. In: JENSEN, M.E., ed. Design and operation of farm irrigation systems. St. Joseph, ASAE, 1983. p.763-816. (ASAE, Monograph, 3).
- STONE, L.F.; MOREIRA, J.A.A.; SILVA, S.C. da. Efeitos da tensão da água do solo sobre a produtividade e crescimen-

to do feijoeiro. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, 23(2): 161-7, fev. 1988.

TAYLOR, S.A. Managing irrigation water on the farm. Transactions of ASAE, St. Joseph, 8(6): 433-6, 1965.

THOYAMANI, K.P. & NORUM, D.I. Performance of low pressure center-pivot sprinkler irrigation systems in Saskatchewan. Canadian Agricultural Engineering, Ottawa, 29(2): 143-8, 1987.

TOSSO, T.J. Relaciones hídricas del poroto (*Phaseolus vulgaris* L.). I. Extracción de agua del suelo bajo diferentes regimenes de agua aplicada. Agricultura Técnica, Santiago, 48(3): 197-205, jul./sept. 1988.

VAUCLIN, M.; IMBERNOM, J.; VACHAUD, G. Analyse comparative de différents méthodes de détermination de la conductivité hydraulique des sols non saturés de la zone center-nord des Sénégal. L'Agronomie Tropicale, Nogent-sur-Marne, 8: 186-97, 1982.

VILLA NOVA, N.A.; SCARDUA, R.; BACCHI, O.O. Considerações sobre a utilização do tanque Classe "A" na estimativa da quantidade e frequência de aplicação de água, na irrigação da cana-de-açúcar. Piracicaba, ESALQ, 1977. 13p.

VILLAGRA, M.M.; MATSUMOTO, O.M.; BACCHI, O.O.S.; MORAES, S.O.; LIBARDI, P.L.; REICHARDT, K. Tensiometria e variabilidade espacial em terra roxa estruturada. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, 12: 205-10, 1988.

WALKER, W.R. Explicit sprinkler irrigation uniformity: efficiency model. Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE, New York, 105(IR2): 129-36, 1979.

VIEIRA, C. Perspectiva da cultura do feijão e de outras leguminosas de grão no país e no mundo. In: ZIMMERMAN, M.J., ed. Cultura do feijoeiro; fatores que afetam a produtividade. Piracicaba, Potafos, 1988. p.3-19.