DESEMPENHO DE UM SISTEMA DE IRRIGAÇÃO PIVÔ-CENTRAL QUANTO A UNIFORMIDADE E EFICIÊNCIA DE APLICAÇÃO DE ÁGUA, ABAIXO E ACIMA DA SUPERFICIE DO SOLO

ROBERTO REZENDE

Engenheiro Agricola

Orientador: Prof. Dr. JOSÉ ANTONIO FRIZZONE

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

PIRACICABA

Estado de São Paulo - Brasil[®]
Agosto - 1992

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

Rezende, Roberto

R433d Desempenho de um sistema de irrigação pivô-central quanto a uniformidade e eficiência de aplicação de água, abaixo e acima da superfície do solo. Piracicaba. 1992.

86p.

Diss.(Mestre) - ESALQ Bibliografia

Irrigação por pivô central 2. Irrigação - Água - Aplicação 3. Irrigação - Equipamento - Desempenho I. Escola Superior de Agricultura LUiz de Queiroz. Piracicaba

CDD 631.7

DESEMPENHO DE UM SISTEMA DE IRRIGAÇÃO PIVÔ-CENTRAL QUANTO A UNIFORMIDADE E EFICIÊNCIA DE APLICAÇÃO DE ÁGUA, ABAIXO E ACIMA DA SUPERFÍCIE DO SOLO

ROBERTO REZENDE

Aprovada em	20-08-	1992
-------------	--------	------

Comissão Julgadora:

Prof.	Dr. José Antonio Frizzone		ESALQ/USF
Prof	Dr. Tanlei Anniel Retnel		POATO MICE
1101.	Dr. Tarlei Arriel Botrel		· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
Prof.	Dr. Manoel Alves Faria .	* * * * * *	ESAL-Lavras-MG

Prof. Dr. JOSÉ ANTONIO FRIZZONE

OFEREÇO

aos meus pais,

ANTONIO PINTO e VERA TEIXEIRA,

'e respectiva família,

a quem só DEUS sabe o quanto

devo e os admiro.

AGRADEÇO

Ao Prof. Dr. JOSÉ ANTONIO FRIZZONE pela orientação, incentivo, exemplo e, acima de tudo, pela valiosa amizade.

DEDICO

à minha querida
esposa DULCE e meu
filhinho LUIZ FERNANDO
pelo precioso apoio e
por tudo que eles
representam para mim.

AGRADECIMENTOS

AGRADEÇO

- a DEUS, pela fé, perseverança, saúde e por todas as graças concedidas durante o curso;
- aos professores Dr. Manoel Alves Faria e Dr.

 Tarlei Arriel Botrel pela participação na

 comissão julgadora;
- aos professores Altair Bertonha, Antonio Carlos, Cássio Tormena e Paulo Sérgio pela amizade e pelas valiosas sugestões, as quais muito contribuíram para este trabalho;
- à coordenação do curso de Pós-graduação em Irrigação e Drenagem, pela oportunidade e apoio concedidos:
- aos professores, colegas de curso e funcionários do Departamento de Engenharia Rural da ESALQ pelas sugestões e convivio amigo;

- à Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" ESALQ/USP, pela acolhida e assistência dispensada;
- à Universidade Estadual de Maringá, pela oportunidade e apoio prestado;
- à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, pelo auxílio financeiro através de bolsa de estudos;
- a todos que direta ou indiretamente contribuíram para o êxito deste trabalho.

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS
LISTA DE TABELAS i
RESUMO
SUMMARY
1. INTRODUÇÃO
2. REVISÃO DE LITERATURA
2.1. Determinação da vazão em pivô-central
2.2. Determinação da pressão na linha
lateral do sistema pivô-central
2.3. Elementos climáticos
2.4. Uniformidade de distribuição
2.5. Eficiência de irrigação
3. MATERIAL E MÉTODOS
3.1. Local
3.2. Clima
3.3. Solo
3 3 4 Tino

	vi
3.3.2. Análise física	27
3.3.3. Características hidricas	28
3.4. Sistema de irrigação	29
3.5. Realização dos ensaios	31
3.5.1. Condições ambientais	34
3.5.2. Medição de vazão	34
3.5.3. Medição de pressão	35
3.5.4. Distribuição superficial da água	
aplicada	35
3.5.5. Umidade abaixo da superficie	38
3.5.6. Coeficiente de uniformidade	39
3.5.7. Eficiência de irrigação	39
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	42
4.1. Distribuição de pressão	42
4.2. Distribuição da vazão	44
4.3. Uniformidade de distribuição de água	
acima da superfície do solo	44
4.4. Uniformidade de distribuição de água	
abaixo da superficie do solo	56
4.5. Eficiência de irrigação	7.1
5. CONCLUSÕES	77
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79

LISTA DE FIGURAS

Figu	ura (n. 1865). A series de la companya de la compa	Pág i na
1	- Diagrama esquemático da distribuição normal	
	acumulada	23
2	- Curva de retenção de água no solo	30
3	- Croqui da área em que foram realizados os ensaios.	33
4	- Distribuição de pressão nos bocais dos difusores ao	
	longo da linha lateral do pivô-central	43
5	- Distribuição de vazão ao longo da linha lateral do	
	pivô-central	45
6	- Perfil da precipitação ao longo da linha lateral,	
	para o pivô-central operando a 20% de velocidade em	
	suas condições normais de funcionamento	53
7	- Perfil da precipitação ao longo da linha lateral,	
	para o pivô-central operando a 40% de velocidade em	
	suas condições normais de funcionamento	5.4

F			

página

8	- Perfil da precipitação ao longo da linha lateral,	
	para o pivô-central operando a 60% de velocidade em	
	suas condições normais de funcionamento 5	5

LISTA DE TABELAS

Tabela		Págin
4 1 7	Análise Granulométrica e Densidade Global	. 28
2 -	Características do Sistema Pivô-central	. 32
3 -	Características do Conjunto Motobomba	. 32
4 -	Valores do Coeficiente de Uniformidade d Christiansen (CUC), Coeficiente de Uniformidade d	
	Distribuição (CUD), Velocidade do Vento, Temperatur e Umidade Relativa do Ar, para os ensaios realizado	
	com equipamento em suas condições normais d funcionamento	
5 -	Valores do Coeficiente de Uniformidade d Christiansen (CUC), Coeficiente de Uniformidade d	е
	Distribuição (CUD), Velocidade do Vento, Temperatur e Umidade Relativa do Ar, para os ensaios realizado	• S
	com equipamento tendo 10 difusores eliminados	. 49
6 -	Valores dos principais parâmetros obtidos no ensaios realizados com o equipamento em condiçõe	
	normais de funcionamento	. 51

57

58

60

Tabela

- 7 Valores médios dos Coeficientes de uniformidade de Christiansen (CUC), obtidos através de umidade do solo, após irrigações realizadas com o equipamento em condições normais de funcionamento, em diferentes tempos e profundidades para as três velocidades estudadas, na posição 1 (linha lateral em nivel).
- 8 Valores médios dos Coeficientes de Uniformidade de Christiansen (CUC), obtidos através de umidade do solo, após irrigações realizadas com o equipamento em condições normais de funcionamento, em diferentes tempos e profundidades para as três velocidades estudadas, na posição 2 (linha lateral em aclive).
- 9 Valores médios dos Coeficientes de Uniformidade de Distribuição (CUD), obtidos através de umidade do solo, após irrigações realizadas com o equipamento em condições normais de funcionamento, em diferentes tempos e profundidades para as três velocidades testadas, na posição 1 (linha lateral em nível).

Tabela Página,

10 -	Valores médios dos Coeficientes de Uniformidade
	de Distribuição (CUD), obtidos através de umidade
	do solo, após irrigações realizadas com o
	equipamento em condições normais de
	funcionamento, em diferentes tempos e
	profundidades para as três velocidades testadas,
	na posição 2 (linha lateral em aclive) 61
11 -	Valores médios dos Coeficientes de Uniformidade
	de Christiansen (CUC), obtidos através de umidade
	do solo, após irrigações realizadas com o
	equipamento tendo 10 difusores eliminados, em
	diferentes tempos e profundidades para as três
	velocidades estudadas, na posição 1 63
12 -	Valores médios dos Coeficientes de Uniformidade
	de Christiansen (CUC), obtidos através de umidade
	do solo, após irrigações realizadas com o
	equipamento tendo 10 difusores eliminados, em
	diferentes tempos e profundidades para as três
	velocidades estudadas, na posição 2 64

13 -	Valores médios dos Coeficientes de Uniformidade
	de Distribuição (CUD), obtidos através de umidade
	do solo, após irrigações realizadas com o
	equipamento tendo 10 difusores eliminados, em
	diferentes tempos e profundidades para as três
	velocidades estudadas, na posição 1 68
14 -	Valores médios dos Coeficientes de Uniformidade
	de Distribuição (CUD), obtidos através de umidade
	do solo, após irrigações realizadas com o
	equipamento tendo 10 difusores eliminados, em
	diferentes tempos e profundidades para as três
	velocidades estudadas, na posição 2 69
15 -	Comparação entre valores dos coeficientes de
	uniformidade obtidos acima e abaixo da superficie
	do solo
16 -	Lâmina média (Y), em mm, Lâmina requerida (Yr),
	em mm, Área Deficientemente Irrigada (AD),
	Volume Deficiente (VD), Eficiência de Aplicação
	(Ea), Eficiência de Armazenamento (Es), e Perda
	por Percolação Profunda (Pp), para a irrigação
	realizada a 20% de velocidade

Ta	ha	1	2
4 199			-

	em mm, Área Deficientemente Irrigada (AD),
	Volume Deficiente (VD), Eficiência de Aplicação
	(Ea), Eficiência de Armazenamento (Es), e Perda
	por Percolação Profunda (Pp), para as irrigações
	realizadas a 40% e 60% de velocidade
	Eficiência, em Potencial de Aplicação (EPa),
_	
-	Velocidade média do vento, umidade relativa média

DESEMPENHO DE UM SISTEMA DE IRRIGAÇÃO PIVÔ-CENTRAL QUANTO
A UNIFORMIDADE E EFICIÊNCIA DE APLICAÇÃO DE ÁGUA, ABAIXO
E ACIMA DA SUPERFÍCIE DO SOLO

Autor: ROBERTO REZENDE

Orientador: PROF. DR. JOSÉ ANTONIO FRIZZONE

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi avaliar as características de desempenho do equipamento de irrigação pivô-central, operando em condições de campo e também analisar o comportamento da água abaixo da superfície do solo, quanto à uniformidade de distribuição.

Para a avaliação do desempenho do sistema utilizaram-se os coeficientes de uniformidade de Christiansen (CUC) e de distribuição (CUD), calculados a partir de dados de precipitação coletados segundo a metodologia proposta por MERRIAN et alii (1973) e também com dados de umidade do perfil de solo em três profundidades.

Os ensaios foram conduzidos no campus da Universidade Estadual de Maringá-PR em área com solo

classificado como Terra Rexa Estruturada. O Pivô foi ensaiado em três velocidades 20, 40 e 60%, com a linha lateral em duas posições, sendo uma em nível e a outra em aclive de 5,78%.

Com a finalidade de serem obtidos altos e baixos valores de coeficiente de uniformidade acima da superficie do solo, possibilitando a comparação com os valores obtidos abaixo da superfície, trabalhou-se com o equipamento com todos seus emissores em funcionamento e também com o equipamento tendo 10 difusores obstruídos, de um total de 39, condição esta que esperava-se obter baixos valores de coeficientes.

Baseando-se nos resultados obtidos nas condições em que foram realizados os ensaios, conclui-se que:

- para maior temperatura e menor umidade relativa do ar, menor foi a eficiência em potencial de aplicação;
- em todas as profundidades os coeficientes de uniformidade foram superiores aos obtidos acima da superfície do solo;
- os valores dos coeficientes de uniformidade abaixo da superficie do solo aumentaram com o tempo, em todas as profundidades estudadas;
- os altos valores alcançados pelos coeficientes de uniformidade abaixo da superfície do solo,

em pequeno espaço de tempo, mesmo nos ensaios em que a uniformidade de água aplicada na superficie foi baixa, mostram que a uniformidade subsuperficial pouco depende da uniformidade acima da superficie.

PERFORMANCE OF CENTER PIVOT IRRIGATION SYSTEM ABOUT
UNIFORMITY AND EFICIENCE WATER APLICATION OVER AND DOWN
GROUND SURFACE

Author: ROBERTO REZENDE

Adviser: PROF. DR. JOSE ANTONIO FRIZZONE

SUMMARY

The objective of this research was to evaluate the performance characteristics of a center pivot irrigation equipment operating at field conditions and analyze the under the surface of the soil water behaviour in regard to its distribution uniformity.

The performance of the system was evaluated by Christiansen uniformity coefficient (CUC) and the coefficient of uniform distribution (CUD). Both were calculated from precipitation data collected according to the method of MERRIAN et alii (1973) as well as with moisture data from the layer of the soil at three depths.

The experiments were conducted on thr campus of Universidade Estadual de Maringá, Paraná, in a Red Earth (Paleudult) type of soil. The center pivot was tested at

20%, 40% and 60% velocities with the lateral line at level and 5.78% upward.

The equipment of irrigation operated with all emissaries opened and with ten of them clased in order to obtain high and low values of coefficient of uniformity.

Those values were compared to those from the under the surface of the soil.

The results of this research allowed the following conclusions:

- the Application Potencial Efficiency reduced with the increase of the ambient temperature and the reduction of the air relative humidity;
- the coefficients of uniformity were always greater for conditions under the surface of the soil than for conditions above it:
- the under the surface of the soil coefficients of uniformity increased with time, at all depths investigated;
- the high values obtained by the under the surface of the soil coefficients of uniformity in short periods of time, even in those tests where the uniformity of the water supplied to the surface was low, indicate that the uniformity under the surface of the soil is almost independent of the above the surface of the soil uniformity.

1. INTRODUÇÃO

A irrigação é uma operação agricola que tem por finalidade básica colocar à disposição da planta, água ao solo, com o objetivo de o manter com teor de água adequado, podendo ser feito por diferentes métodos de irrigação. Não é possível caracterizar um método como o melhor que os demais, para qualquer situação. Assim sendo, a opção pelo uso de um determinado método, em uma situação, deve ser feita observando-se as particularidades de cada um de forma a se identificar o que melhor se adapta às condições locais.

Os sistemas de irrigação por aspersão convencional, de movimentação manual, se adequam a pequenas áreas, desde que se tenha disponível uma certa quantidade de mão-de-obra necessária. Em se tratando de áreas médias ou grandes a quantidade de mão-de-obra necessária à operação dificulta o emprego desses sistemas.

Buscando reduzir a quantidade de mão-de-obra necessária à irrigação de áreas maiores, foram desenvolvidos sistemas mecanizados de irrigação por aspersão, com elevado nível de automação. Dentre tais sistemas, o pivô-central, objeto de estudo deste trabalho,

constitui-se por uma linha lateral equipada por aspersores ou difusores convenientemente espaçados, apoiada em torres dotadas de mecanismos de auto-propulsão e ancorada em uma das extremidades. Este sistema opera girando em torno do ponto de ancoramento da lateral, irrigando uma área circular.

Em eventos técnicos e científicos na área de irrigação, muita ênfase tem sido dada a esses sistemas, buscando-se obter explicações sobre como conduzir culturas no que se refere a preparo do solo, controle de pragas e doenças, aplicação de fertilizantes e defensivos, além da especial atenção ao manejo de tais sistemas quanto a distribuição de água, observando-se a movimentação e retenção da água nos solos sob seu domínio de cobertura.

Sistemas de irrigação tipo pivô-central têm sido avaliados pela uniformidade da água aplicada na superfície do solo. Porém, a planta retira água do solo, dentro da zona de suas raízes. Portanto, pode-se supor que a uniformidade de distribuição da água dentro do solo é mais importante que aquela na superfície.

Devido ao movimento da água desde as zonas de maior umidade para as de menor umidade, pode-se esperar que haja uma redistribuição da água aplicada no solo, aumentando a sua uniformidade em relação à uniformidade superficial.

HART & REYNOLDS (1965) usando um modelo

matemático, estudou a influência de diversas variáveis de irrigação na redistribuição da água dentro do solo. Concluiu que a avaliação de sistemas de aspersores pelas medidas de superfície subestima a sua uniformidade, sendo portanto, inadequada se o objetivo do projeto é resultar no sistema mais econômico possível.

No entanto, para que se possa fazer um correto manejo da irrigação, é necessário que se conheçam, além das características do solo, do clima e as necessidades hídricas da cultura, as características do sistema de irrigação.

O presente trabalho tem como objetivo a avaliação das características de desempenho do equipamento de irrigação Pivô-central, operando em condições de campo, e também analisar o comportamento da água abaixo da superficie do solo, quanto à uniformidade de distribuição de água. Os Parâmetros a serem avaliados se referem à uniformidade de distribuição de água e a eficiência de aplicação, em potencial, do sistema, além daqueles parâmetros que caracterizam a quantidade de água aplicada, nas diferentes condições de operação.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Determinação da vazão em pivô-central

Destudo teórico de um pivô-central permite a construção de um gráfico da curva de diminuição do fluxo ao longo da lateral, seguido pela curva de distribuição de pressão a partir do ponto pivô em direção ao final da lateral. Uma vez que a linha lateral do pivô gira em relação a um ponto central, para que a lateral como um todo aplique a mesma lâmina de água, a vazão de cada emissor aumenta a partir do ponto do pivô em direção à sua extremidade final, (ROLLAND, 1982).

De acordo com LINSLEY & FRANZINI (1978), a determinação da vazão em condutos forçados pode ser feita por vários métodos, sendo que cada um deles tem suas próprias características, devendo-se preferir o que melhor se adapte às condições de cada caso. Entretanto, RUSSEL (1942), pondera que para trabalhos precisos é melhor fazer determinações separadas da velocidade média a cada nova taxa de fluxo, utilizando tubo de pitot.

SPINK (1967) afirma que entre os métodos para medição de vazão em tubulações, o tubo de pitot é um

dos mais eficientes, pois mede a velocidade num ponto do conduto. Portanto, deve ser determinada a velocidade média que ocorre no conduto e relacioná-la com sua seção transversal. Para resultados confiáveis, o tubo de pitot deve ser instalado a uma distância de 50 ou mais diâmetros, a partir de curvas, registros ou qualquer outra singularidade, em tubos lisos e retos. Se houver um comprimento de tubo reto suficiente antes do tubo pitot, a velocidade média aproximada será obtida numa posição de 30% do raio a partir da parede do tubo, isto é, aproximadamente a 70% do raio a partir do centro da tubulação.

STREETER & WYLIE (1982), afirmam que a determinação de velocidade em vários pontos de uma seção transversal permite a avaliação da vazão. Como a determinação da velocidade é de dificil execução, utilizase de um dispositivo que determina uma grandeza mensurável que pode ser relacionada com a mesma. Para isso o tubo de pitot, que trabalha com este princípio é um dos métodos mais precisos de determinação de velocidades, corroborando as acertivas de SPINK (1967).

AZEVEDO NETO & ALVAREZ (1977), cita que os orificios concêntricos instalados nos encanamentos, constituem um dos processos mais simples para medição de vazões. Devendo ser instalado em trechos retilineos, horizontais ou verticais, sem qualquer causa perturbadora próxima (derivações, curvas, registros). Segundo o mesmo

autor o processo direto de medição de vazão constitui-se num método bastante preciso, desde que utilizado em condições favoráveis, isto é, em casos de pequenas descargas.

Os hidrômetros, segundo LINSLEY & FRANZINI (1978), não são instrumentos precisos e não se prestam para medir valores muito pequenos de fluxo, porque o líquido pode passar através do hidrômetro sem mover as peças móveis. Este fato é afirmado no trabalho de tese realizado por FURUKAWA (1991).

2.2. Determinação da pressão na linha lateral do sistema pivô-central

Conforme STREETER & WYLIE (1982), na prática se empregam frequentemente os manômetros metálicos (Bourdon) para verificação e controle de pressões. O manômetro tipo Bourdon é um dos dispositivos típicos para medida de pressões efetivas (pressão em relação à pressão atmosférica local). Por outro lado, os manômetros diferenciais determinam a diferença de pressão entre dois pontos quaisquer, quando a pressão real em qualquer ponto do sistema não puder ser determinada.

Alguns erros usuais encontrados com manômetros tipo Bourdon são citados por GILL (1984):

- erro devido a histerese:

- multiplicação do erro, quando o manômetro fornece pressões maiores ou menores que as reais;
- erro de angularidade quando o ponto zero e o ponto mais elevado do manômetro estão de acordo com o real, mas os pontos intermediários se distanciam acima ou abaixo.

Manômetro metálico tipo Bourdon adaptados a tubo de pitot foram usados por KINCAID & HEERMANN (1970), para determinação de pressão em bocais de emissores a fim de verificar experimentalmente a distribuição de pressão em sistema de irrigação pivô-central. Como resultado, puderam verificar que em um dos pivôs estudados, os reguladores de pressão apresentaram um funcionamento não adequado.

2.3. Elementos climáticos

Os principais elementos climáticos que influem no uso da irrigação por aspersão são vento, umidade relativa e temperatura do ar. O vento influencia a uniformidade de distribuição dos aspersores e, juntamente com a temperatura e umidade relativa do ar, favorece a perda de água por evaporação (FROST, 1963; SOLOMON, 1979).

JENSEN (1983), afirma que sob condições de vento, o sistema pivô-central apresenta vantagens sobre os sistemas fixos de aspersão. Primeiro, a linha lateral movimenta-se continuamente, representando um número

infinito de posições ao longo da sua trajetória. Segundo, o espaçamento entre os aspersores, ao longo da linha lateral, é relativamente pequeno, permitindo maior sobreposição dos perfis de distribuição. Uma desvantagem é que os emissores de água no pivô estão geralmente mais altos em relação à cultura ou solo, sujeitos, portanto a maiores velocidades do vento. Entretanto, permitem conseguir altos valores de coeficiente de uniformidade de Christiansen sob condições moderadas de velocidades de vento.

De acordo com LOPEZ (1975), o elemento climático de consideração mais importante na aspersão é o vento, devendo-se ter, por um lado, uma idéia aproximada de sua velocidade que desempenha um papel significativo na eficiência de aplicação e, por outro, sua direção, que deve ser levada em conta nas disposições das tubulações. O autor esclarece, ainda, que as altas temperaturas e a baixa umidade relativa do ar diminuem a eficiência do sistema, aumentando as perdas por evaporação.

Através de coleta de água em pluviômetros CHRISTIANSEN (1942), estimou as perdas por evaporação na irrigação por aspersão e concluiu que tais perdas estiveram entre 10 e 42%, para os testes realizados à tarde, e próximos de 4%, para aqueles conduzidos pela manhã. Mesmo não tendo realizado estudos para diferentes condições de clima, concluiu que as perdas são mais elevadas em dias com

ventos fortes, quentes e secos. KELLER (1984), cita que em condições de baixa demanda evaporativa as perdas por evaporação e arrastamento estão entre 5 e 10%, chegando a valores entre 30 e 40%, sob condições de alta demanda.

2.4. Uniformidade de distribuição

Vários coeficientes de uniformidade tem caracterizado a distribuição da água em sistemas de irrigação por aspersão. CHRISTIANSEN (1942), foi o primeiro pesquisador a estudar a uniformidade de distribuição em aspersão, quantificando-a através de um índice estatístico denominado coeficiente de uniformidade de Christiansen, CUC, para o qual utilizou o desvio médio como medida de dispersão, eq.1.

$$CUC = 100 \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^{N} |y_i - y_N|}{Ny_N} \right) \dots eq. 1$$

em que:

CUC - coeficiente de uniformidade de Christiansen
modificado, %;

 $oldsymbol{Y_i}$ - lâmina coletada no pluviômetro i, em mm;

Y_w - lâmina média coletada, em mm;

N - número de coletores, adimensional

grande diferença de pressão pode causar uma redução significativa na uniformidade de distribuição de água, em sistemas de irrigação por aspersão convencionais. Entretanto, no pivô-central, a uniformidade da lâmina aplicada não é somente função da diferença de pressão, mas também do aumento do diâmetro do bocal do aspersor à medida que se afasta radialmente em relação ao centro da área irrigada. Esses autores propuseram uma modificação na equação de Christiansen, para calcular a uniformidade de distribuição da água em pivô-central. A equação proposta é a seguinte:

$$CUC = 100 \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^{R} Si \mid y_i - y_p \mid}{\sum_{i=1}^{R} Si \quad y_i} \right) \dots eq.2$$

em que:

 $oldsymbol{S_1}$ - distância do ponto pivô ao ponto i, m;

 Y_p - lâmina média ponderada, calculada pela eq.3.

$$y_{p} = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^{R} y_{i} & Si \\ \sum_{i=1}^{R} Si \end{pmatrix} \dots eq.3$$

Segundo DAVIS (1966), o coeficiente de uniformidade de distribuição deve considerar a parte da área coberta pelos aspersores que fornecem as precipitações mais baixas, isto é, deve-se considerar a média dos 25% menores valores de precipitação, com relação à média geral.

Esse coeficiente pode ser definido por meio da seguinte equação:

$$CUD = \frac{\dot{y}_{25}}{y_p} \times 100 \dots eq.4$$

em que:

CUD - coeficiente de uniformidade de distribuição em %;

Y₂₅ - média ponderada das menores precipitações correspondentes a 25% da área;

 Y_p - lâmina média ponderada cujo valor é estimado pela eq.3, (mm).

De acordo com RING & HEERMANN (1978), é frequentemente necessário determinar o desempenho de um sistema de irrigação, a fim de avaliar sua aplicabilidade sob certas condições. A uniformidade de distribuição de água é uma característica que pode ser usada para comparar sistemas. Uma uniformidade deficiente resulta em área super ou sub-irrigada. A fim de obter a mesma produtividade, um sistema com baixa uniformidade teria que distribuir mais água, ou se dois sistemas distribuem a mesma quantidade de água, o sistema com melhor uniformidade teria melhor eficiência no uso de água.

OLITTA (1987) afirma que o planejamento racional de um sistema de irrigação, dentre outras coisas, exige o conhecimento da distribuição de água aplicada, bem

como a intensidade de aplicação do sistema. De acordo com o autor, o melhor meio de se obter esses dados é determina-los em condições normais de funcionamento.

Conforme relatam alguns pesquisadores (PERI et alii, 1979; WALKER, 1979), a aplicação de água por qualquer sistema de irrigação é naturalmente desuniforme. Em geral, para um método particular de irrigação, alta uniformidade de aplicação somente pode ser alcançada com aumento nos gastos em capital ou nos custos de operação. Esses autores afirmam que, sob o aspecto econômico, alguns niveis particulares de desuniformidade podem ser aceitáveis para cada tipo de irrigação. Ao irrigante faculta-se escolher entre aplicar agua suficiente para que a lâmina minima seja igual à lâmina real necessária (aplicando excesso de água em parte da área) ou aplicar uma lâmina menor, permitindo que parte da minima área seja deficientemente irrigada (provocando redução na produção).

A ABNT (1985), no seu projeto de norma 12:02.08-005 recomenda analisar a distribuição da água estimando a uniformidade na porção da área irrigada que recebe menos água pela irrigação. O coeficiente de uniformidade de distribuição, é definido como uma medida da distribuição da água que relaciona a quarta parte da área irrigada total que recebe menos água que a lâmina média aplicada. Caso toda a área receba no mínimo a lâmina real necessária, um baixo valor de Coeficiente de Uniformidade

de Distribuição (CUD) indica uma excessiva perda por percolação profunda.

GILLEY et alii (1983), afirma que um importante fator a ser considerado nos sistemas com pressão reduzida é a uniformidade de aplicação de água. Sistemas com altas pressões geralmente apresentam boa uniformidade de aplicação devido a maior sobreposição. Em sistemas com pressões reduzidas, o raio de alcance dos aspersores ou difusores será menor que em sistemas a alta pressão, resultando em uma menor sobreposição, especialmente em sistemas com difusores.

TOOYAMANI et alii (1987), concluiram depois de analisar 8 sistemas pivô-centrais à baixa pressão, com difusores, que é possível obter uma alta uniformidade com qualquer tipo de difusor, desde que os bocais sejam espaçados adequadamente. Entretanto, poderá ocorrer uma taxa de aplicação elevada resultando em escoamento superficial.

Analisando o tamanho de gotas produzidas por difusores de baixa pressão, SILVA (1989), afirma que, devido ao pequeno diâmetro dessas gotas, a uniformidade de distribuição de água sofre distorção causada pelo vento, ocorrendo possíveis perdas de água na trajetória entre o difusor e a superfície irrigada.

Avaliando a uniformidade de distribuição de três sistemas de irrigação do tipo pivô-central de baixa

pressão, para duas velocidades de deslocamento (60 e 100%) COTRIM (1988), encontrou coeficientes de uniformidade de Christiansen acima de 89% e coeficiente de uniformidade de distribuição sempre superior a 77%. SANTOS (1988), trabalhando com pivô-central de baixa pressão, determinou os coeficientes de uniformidade de Christiansen e de distribuição para três velocidades de deslocamento (20, 40 e 100%). Todos os valores encontrados foram superiores a 80%.

De acerde com as sugestões de MERRIAN et alii (1973), se o sistema pivô-central operar em terreno ondulado ou com declividade, e não for equipado com reguladores de pressão, a uniformidade de distribuição da água variará conforme a posição da linha. Esses autores afirmam que o valor da uniformidade de distribuição será praticamente constante em toda a área, desde que a diferença de elevação entre o ponto central e a extremidade não ultrapasse 20% da pressão no último aspersor.

EDLING (1979), analisando o uso de sistemas de irrigação por pivô-central, em terrenos inclinados concluiu que para terrenos em aclive, o aumento na pressão próximo ao ponto do pivô, resulta no acréscimo da vazão nesses pontos, sendo que, ao longo da linha lateral, a influência do aumento da pressão é gradualmente reduzida, devido à elevação do terreno. No final da lateral pode ocorrer um decréscimo na vazão.

O mesmo autor, através de modelo matemático, avaliou alguns sistemas de irrigação do tipo pivô-central. Estudando a influência das condições topográficas obteve, em média, decréscimo de 36% na vazão da bomba para os sistemas operando em aclive uniforme de 7%. Nesse caso, a vazão do último aspersor foi reduzida de 86% da vazão inicial, para aquela condição de trabalho.

Utilizando modelos matemáticos, JAMES & BLAIR (1984), analisaram diferentes tipos de aspersores usados em pivô-central, em diferentes condições topográficas, avaliando a uniformidade de distribuição por meio do coeficiente de uniformidade de Christiansen. Os resultados mostraram que em pivôs equipados com aspersores convencionais de baixa pressão, em terrenos planos, a uniformidade de distribuição aumentou à medida que o espaçamento entre aspersores variou de 1,5 a 12m. Substituindo os aspersores por difusores, a uniformidade de distribuição diminuiu à medida que o espaçamento variou no mesmo intervalo. Os melhores espaçamentos para aspersores e difusores de baixa pressão foram, respectivamente, 12 e 1,5m. Variando as condições topográficas do terreno, observaram que maior variação na uniformidade distribuição ocorreu quando os sistemas não possuiam reguladores de pressão, e ainda, sistemas com difusores e reguladores de pressão mostraram-se pouco influenciados pelas variações topográficas impostas.

Segundo GARCIA (1988), para aue 08 aspersores de um pivô-central operem na sua pressão de serviço ideal, na ausência de reguladores de pressão, é necessário, entre outros fatores, um conhecimento prévio da topografia do terreno. Os sistemas de baixa pressão são mais sensiveis às diferenças topográficas. Comenta o autor que atualmente se fabrica equipamentos capazes de trabalhar em terrenos com até 30% de declividade. No entanto, precipitações muito intensas podem ser produzidas e, sendo a velocidade de infiltração básica do solo inferior à intensidade de água aplicada, poderá ocorrer perdas por escoamento superficial e consequentemente erosão. Por esse motivo, o autor recomenda que a declividade do terreno não seja superior a 15%.

TOMAZELA (1991), analisando o desempenho hidráulico de pivô-central operando em condições de topografia variável concluiu que, considerando as posições de aclividade e declividade máximas da linha lateral do pivô na área irrigada, houve uma variação de 3,7% na vazão total do sistema (187m³/h e 194m³/h). Para estas condições, as vazões medidas diferem do valor adotado em projeto (182m³/h), respectivamente em 27% e 6,6%.

TOOYAMANI et alii (1987), afirmam que a uniformidade de aplicação no sistema pivô-central pode ser melhorada consideravelmente se a redistribuição da água no perfil do solo for considerada.

HART (1972), chegou à conclusão de que existe uma redistribuição horizontal na camada superficial da água aplicada ao solo, de tal maneira que ocorre um sensível acréscimo da uniformidade de umidade do solo. O autor dá exemplos de um coeficiente de uniformidade de 0,6 para a distribuição de água na superfície do solo, atingindo 0,76 e 0,86 depois da redistribuição no solo por um e dois dias, respectivamente.

PAIVA (1980), analisando o efeito da uniformidade da distribuição de água aplicada na superfície do solo pelo sistema de aspersão convencional, sobre a uniformidade de redistribuição de água no perfil do solo concluiu que:

- ao longo de tempo, após o fim da irrigação, houve um aumento nos coeficientes de uniformidade, em todas as profundidades estudadas;
- nas maiores profundidades a distribuição foi mais uniforme:
- mesmo nos ensaios onde a uniformidade de água aplicada na superficie foi muito baixa, em curtos espaços de tempo os coeficientes de uniformidade de umidade alcançaram altos valores;

PERRENS (1984), em trabalhos de pesquisa, concluiu que a intensidade de redistribuição da água no solo está inteiramente relacionada com a textura. Avaliando a uniformidade de umidade a 50cm de profundidade, durante

o processo de redistribuição da água no solo, para um período de dois dias, a uniformidade aumentou de 60% para 67% em um solo de textura arenosa e de 60% para 73% em um solo do tipo areno-siltoso.

2.5. Eficiência de irrigação

De acordo com SCALOPPI (1985), a quantidade total de água a ser aplicada por meio de um sistema de irrigação por aspersão depende da quantidade real de água requerida e da eficiência de aplicação. A quantidade real de água requerida, geralmente expressa como lâmina de irrigação, é determinada em função do déficit de água disponível no solo, até a profundidade definida pelo sistema radicular da cultura, e eventuais exigências de lixiviação para remoção do excesso de sais solúveis da zona radicular. Quanto à eficiência de aplicação, o autor afirma que tem havido controvérsias em relação ao valor a ser adotado para proporcionar quantidade e distribuição satisfatórias em toda a área irrigada.

JENSEN et alii (1967) afirmam que conhecendo-se o perfil de distribuição dos aspersores, pode-se avaliar a adequação de uma irrigação, ou mesmo ajustar a duração de uma irrigação através de um valor numérico, obtendo-se a lâmina desejada. Dividindo-se a lâmina média necessária pelo coeficiente de uniformidade de

distribuição garante-se que a área selecionada receba uma irrigação adequada. Por razões econômicas, parte da área pode ficar sub-irrigada e o restante irrigada adequadamente. A porcentagem da área sub-irrigada depende do valor econômico e da sensibilidade das plantas tanto ao déficit hídrico quanto ao excesso de água.

Para uma irrigação em particular, definindose a distribuição da água aplicada na área, torna-se possível determinar alguns parâmetros de desempenho do sistema de irrigação, como a eficiência de aplicação de água. Este indice, quando analisado com outros fatores, determina a adequação da irrigação (ELLIOT et alii, 1980).

A eficiência de aplicação de água é, segundo BERNARDO (1984), a estimativa da porcentagem do total de água aplicada pelo sistema que atinge a superfície do solo e/ou das plantas. Esta eficiência expressa as perdas de água por evaporação e pela deriva ocasionada pelo vento, sendo um parâmetro útil a nível de irrigação, permitindo relacionar a quantidade de água necessária à cultura com a quantidade de água a ser aplicada pelo sistema.

COTRIM (1988), avaliando sistemas de irrigação do tipo pivô-central de baixa pressão, estimou a eficiência, em potencial, de aplicação, quando a velocidade média do vento variou entre 0,0 a 0,95 m.s⁻¹, os valores de EPa encontrados variaram entre 77 e 90%.

SANTOS (1988) estimou a eficiência, em

potencial, de aplicação para um pivô de baixa pressão, operando em três diferentes velocidades de deslocamento. O autor observou que, para uma mesma velocidade operacional do sistema, quanto maior a temperatura e menor a umidade relativa do ar, maior foi a perda por evaporação e, conseqüentemente, menor foi a eficiência. A velocidade média do vento variou entre 0,6 e 2,2 m.s⁻¹, e a umidade relativa do ar entre 60 e 67%. Os valores de EPa encontrados variaram, para essas condições, de 66 a 78%. Analisando o conjunto de informações obtidas, o autor concluiu que uma menor velocidade de deslocamento do sistema, proporcionou maior eficiência e uniformidade de distribuição de água.

Conforme MERRIAN & KELLER (1979), a eficiência de aplicação em potencial de um sistema tipo pivô-central pode ser determinada pela equação:

$$EAP = 100 \times \frac{y_{25}}{L_{\odot}} \dots eq.5$$

em que:

EAP - eficiência de aplicação em potencial, %;

L - lâmina média aplicada por rotação, mm.

Se o pivô for equipado com um medidor de vazão, $m{L}$ pode ser determinado fazendo-se:

 $L = \frac{Q \times T}{10 \times A} \dots eq.6$

em que:

Q - vazão do sistema, m^3/h ;

T - tempo gasto para completar uma rotação, h;

A - área irrigada, ha.

EV - lâmina evaporada durante o teste, mm.

A área irrigada pode ser obtida usando-se a equação:

$$A = \frac{\pi r^2}{10.000} \dots eq.8$$

em que:

I - raio da área irrigada, m;

A - área irrigada, ha.

HART (1961), através de dados de vários testes de aspersores, conclui que o modelo de distribuição de água pode ser definido pela função de distribuição normal. Sendo conhecidos o desvio padrão (s), e a média dos

dados de precipitação do sistema de irrigação (y), HART & REYNOLDS (1965) afirmam que a forma da curva de distribuição normal pode ser estabelecida, permitindo determinar vários parâmetros relacionados à aplicação de água e fração de área molhada.

Segundo KARMELI (1978), o modelo tendendo à distribuição normal, a curva de freqüência acumulada das lâminas de irrigação tem a forma de "S". O modelo pode ser bastante uniforme e a distribuição pode ocorrer em torno da média caso o coeficiente de variação (Cv), que é definido pela relação entre s e y, tiver um valor relativamente baixo. No entanto quando o modelo tende a ser menos uniforme, o Cv aumenta e a forma em "S" da curva de distribuição tenderá a uma reta.

WALKER (1979), discute o modelo normal de distribuição de frequência e mostra que esse modelo calcula os parâmetros tendo por base um diagrama de distribuição normal de frequência acumulada, o qual pode ser visto na Figura 1.

Os parâmetros do modelo de WALKER (1979), que estão representados no diagrama de distribuição de freqüência normal acumulada 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

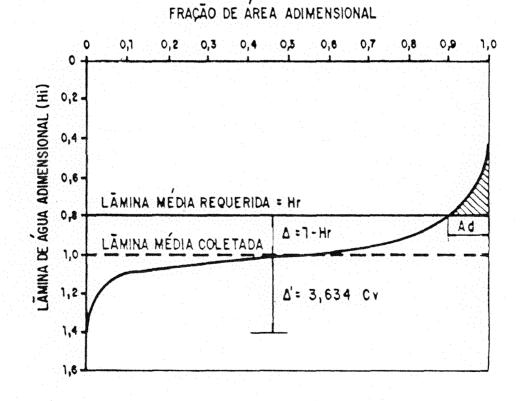


Figura 1 - Diagrama esquemático da distribuição normal acumulada.

Analisando a Figura 1, observa-se que o ponto onde Hi = 1 corresponde à lâmina média infiltrada, uma vez que nesse ponto a lâmina aplicada no coletor i, Di é igual a lâmina média ponderada, Dm. No entanto, se a lâmina média infiltrada no solo até a profundidade definida pelo sistema radicular da cultura, for igual à lâmina de água requerida, esse modelo considera que 50% da área irrigada receberá uma lâmina maior ou igual à lâmina média e os outros 50% da área uma lâmina inferior à lâmina média. Assim sendo, a área que recebe água em excesso, na qual ocorrerá percolação profunda, deve ser igual à área em déficit de água. A análise de diferentes áreas de excesso e de déficit representadas pela distribuição acumulada de água, conduz a diferentes valores de eficiência, possibilitando uma adequação nas condições de operação.

No modelo de WALKER (1979), o volume de déficit (VD), a eficiência de aplicação (Ea) e a eficiência de armazenamento (Es) são determinadas conforme as seguintes equações, respectivamente:

$$VD = 0.003 \times CV \times Ad^{1.2325}$$
 eq. 12
$$Ea = 100 \times [1 - CV (3.634 - 1.123Ad^{0.301} + 0.003Ad^{1.2325})] = 0.13$$

Es = 100 x
$$\frac{Ea}{[1 - CV (3,634 - 1,123Ad^{0,301})]}$$
.....eq.14

HART et alii (1979) propos alguns parâmetros para avaliação do desempenho da irrigação, ou seja, avaliar irrigação através de sua eficiência de aplicação (Ea), eficiência de armazenamento (Es), e perda por percolação profunda (Pp), a qual é estimada pela seguinte equação:

$$P_P = \frac{Vp}{Vt}$$
eq.15

em que:

Vt = volume total de água aplicada

Vp = volume de água percolada

Afirmações são feitas no sentido de que a utilização de somente um parâmetro não avalia o desempenho da irrigação. Em condições extremas de irrigação deficiente, a Ea pode chegar a 100%, enquanto em condições de aplicação excessiva a Es assume valores de até 100%.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Local

O estudo foi conduzido na área pertencente ao campus da Universidade Estadual de Maringá, no Centro Técnico de Irrigação, no município de Maringá, Paraná, localizada geograficamente a 23°25' de latitude sul e a 51°57' de longitude oeste, com altitude de 542 metros acima do nível do mar.

3.2. Clima

O clima, segundo a classificação de Köppen, é do tipo "Cfa", ou seja, clima mesotérmico úmido, que assegura chuvas abundantes no verão e inverno seco, com indice médio anual de precipitação igual a 1500mm, sendo que nos meses de dezembro e janeiro registram os maiores indices e os menores em julho e agosto. Quanto a temperatura, apresenta média anual de 16,7°C, sendo que a média das mínimas alcança 10,3°C e a média das máximas atinge 33,6°C. O valor médio da umidade relativa do ar é igual a 66%.

3.3. Solo

No laboratório de solos da Universidade Estadual de Maringá e também do laboratório de Física de Solos do Departamento de Engenharia Rural da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" da Universidade de São Paulo (ESALQ-U.S.P.), foram realizadas análises para obtenção de algumas características físicas do solo, sua classificação granulométrica e dados referentes a retenção de água.

3.3.1. Tipo

O Solo da área experimental foi classificado como Terra Roxa Estruturada, conforme boletim de pesquisa Nº 27 "Levantamento de Reconhecimento dos Solos do Estado do Paraná" do Instituto Agronômico do Paraná (EMBRAPA, 1984).

3.3.2. Análise física

A análise granulométrica e a densidade global foram determinadas com amostras de solo em três repetições, as quais representavam as camadas de 0-15; 15-30; 30-45cm, sendo que as mesmas foram retiradas em locais distintos dentro da área utilizada para a realização

dos ensaios. A densidade global foi determinada pelo método do anel volumétrico, com auxilio de anéis de alumínio de 5cm de diâmetro e 3cm de altura. Os resultados dessas análises são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 - Análise Granulométrica e Densidade Global

Camada	Argila	Silte	Areia	Dens.Global
(cm)	(%)	(%)	(%)	(g/cm³)
0-15	87	9	. *	1,23
15-30	85	1 1	4	1,28
30-45	78	16	6	1,34

3.3.3. Caracteristicas hidricas

Considerando-se a homogeneidade do solo, escolheram-se dois pontos dentro da área irrigada, para se determinar o teor de água no solo, o qual define a capacidade de campo. Nesses pontos, depois de saturado o solo durante dois dias, retiraram-se seis amostras de solo diariamente durante um período de 8 dias, sendo duas amostras à camada de 0 a 15cm, duas de 15 a 30cm e duas de 30 a 45cm.

Na obtenção da velocidade de infiltração básica (VIB), foram feitas medições em quatro pontos

aleatórios na área, utilizando o método do "Infiltrômetro de Anéis Concêntricos" (carga constante) e considerou-se como velocidade de infiltração básica do solo, a média aritmética dos valores obtidos nos quatro pontos amostrados.

Para a obtenção da curva de retenção de água, a qual é mostrada na Figura 2, trabalhou-se com amostras indeformadas, após a saturação dessas, determinaram-se pares de dados tensão versus teor de água, pelo método de "mesa de tensão" (LEAMER & SHAW, 1941) para as tensões de 0,0001; 0,001; 0,002; 0,004 e 0,007 MPascal, e pelo método da Câmara de Richards (RICHARDS, 1941) para as tensões de 0,01; 0,03; 0,05; 0,1; 0,5 e 1,5 MPascal.

O valor do volume de poros totais (VPT) foi utilizado para representar o teor de água no solo sob condição de saturação, ou seja, para tensão igual a zero.

Obtidos os pares de dados citados acima, ajustaram-se esses à equação proposta por VAN GENUCHTEN (1980), através de regressão não linear, empregando para isso um programa computacional baseado no programa ajuste de equações apresentado por BORATO (1984).

3.4. Sistema de irrigação

O sistema de irrigação utilizado neste trabalho foi do tipo Pivô-central. Esse equipamento opera

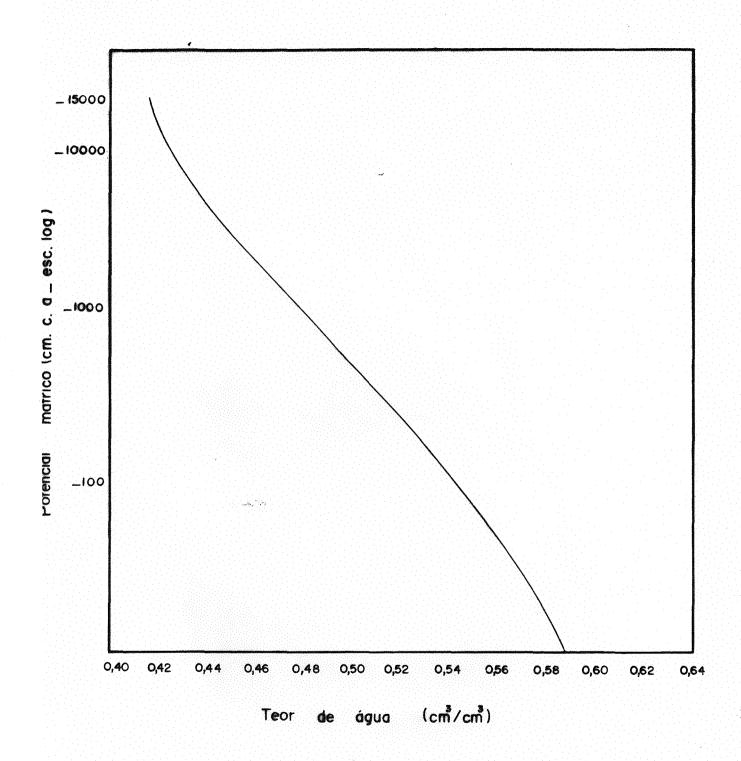


Figura 2 - Curva de retenção de água no solo.

em baixa pressão, utilizando difusores (Fabrimar), sendo que o diâmetro dos bocais são crescentes ao longo da linha lateral. O equipamento é constituído de reguladores de pressão tipo RP-2 (Fabrimar).

As características do sistema bem como do conjunto motobomba, são apresentados nas Tabelas 2 e 3 respectivamente.

3.5. Realização dos ensaios

O levantamento plani-altimétrico da área revelou uma topografia suave e uniforme, conforme se observa na Figura 3.

Obtido o mapa com as cotas do terreno, foram definidas duas posições para ensaio do pivô, sendo uma delas com a linha lateral praticamente em nível e a outra com a linha lateral em aclive de 5,78%, posição esta em maior aclive da área.

Para a realização dos ensaios, durante o período compreendido entre julho e dezembro de 1991, manteve-se o solo sem cobertura vegetal, o que conseguiu-se fazendo previamente ao inicio dos ensaios um preparo de solo utilizando o método tradicional de aragem e gradagem.

Tabela 2 - Características do Sistema Pivô-central

PARAMETROS	DESCRIÇÃO
Fabrićante	Carborundum
Modelo	Carbomatic 620
No de Torres	Duas
Propulsão	Elétrica (motor de 1 CV)
Comprimento da tubulação	110,67 m
Diâmetro da tubulação	100,00 mm
Vão inicial	41,50 m
Segundo vão	41,20 m
Balanço	27,97 m
Raio da última torre	82,70 m

Tabela 3 - Características do Conjunto Motobomba

MOTOR	BOMBA
Marca WEG	Marca KSB
Nº de Fases . Três	ModeloETA-Bloc 32-125
Potência 7,5 Cv	Diâmetro do rotor 139 mm
RPM 3500	RPM3500
Freqüência 60 Hz	

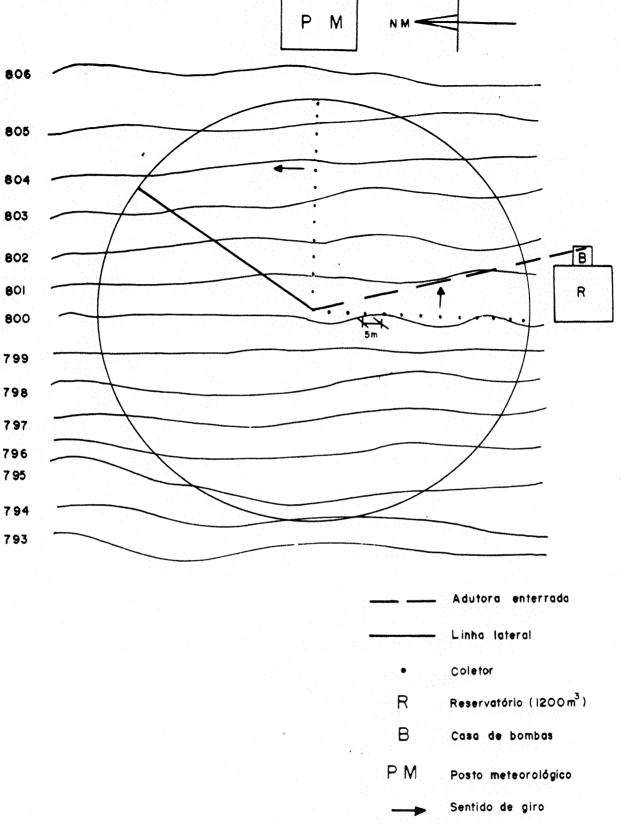


Figura 3 - Croqui da área em que foram realizados os ensaios.

3.5.1. Condições ambientais

Para verificar as possíveis influências do ambiente, foram caracterizadas as condições ambientais. Elementos climáticos como velocidade do vento, umidade relativa do ar e temperatura, foram obtidos próximo da área dos ensaios, no posto meteorológico do Centro Técnico de Irrigação.

A umidade relativa do ar foi obtida por meio de um termohigrógrafo. A velocidade do vento foi medida por meio de um anemômetro de concha totalizador, instalado a 2 metros de altura em relação à superfície do solo. As leituras desse instrumento foram feitas a cada 15 minutos durante a realização dos ensaios. Utilizando-se estas leituras obteve-se a média da velocidade do vento em Km/h para cada ensaio.

Foi também utilizado um par de termômetros, graduado a cada 0,2°C, com a finalidade de caracterizar as condições de temperatura.

3.5.2. Medicão de vazão

A determinação da vazão no pivô-central foi efetuada nas duas posições da linha lateral, através do método volumétrico, utilizando-se um recipiente com capacidade de 20 litros, efetuando-se três repetições.

Estas medições foram realizadas em cada difusor e para obter a vazão total procedeu-se a soma das vazões dos mesmos.

3.5.3. Medição de pressão

A pressão na saída do jato dos difusores foi obtida para cada uma das duas posições da linha lateral, efetuando-se três repetições. Para tanto utilizou-se tubo de pitot equipado com manômetro tipo Bourdon, marca Wika, escala de O a 140psi, com precisão de ± 0,5%, subdivisão de escala de 1psi (1psi = 6,895KPascal).

A ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) recomenda que as leituras de pressão na saída do jato, sejam feitas em um de cada dez emissores. Neste trabalho, foram feitas tomadas de pressão em todos os emissores ao longo da linha lateral, com o objetivo de melhor comparação entre os dados obtidos.

3.5.4. Distribuição superficial da água aplicada

A metodología de cálculos dos parâmetros estatísticos que caracterizam a distribuição de água do sistema de irrigação, baseou-se na proposição de MERRIAN et alii (1973). Tal metodología consiste em coletar as precipitações por meio de pluviômetros (coletores)

distribuídos de maneira equidistante, a partir do centro do pivô, numerados em ordem crescente, em dois raios perpendiculares entre si. Como o volume coletado por um pluviômetro de ordem i representa uma área menor que o de ordem i + 1, cada volume coletado deve ser multiplicado pela área que cada pluviômetro representa, com a finalidade de se fazer uma ponderação entre eles.

Utilizaram-se 23 pluviômetros em cada raio, com espaçamento de 5m entre si e seção de coleta de 75cm², a uma altura de 30cm entre a superfície do solo e a seção de captação.

Os volumes coletados em cada pluviômetro foram medidos no final de cada ensaio, usando-se uma proveta de vidro, graduada a cada 0,2ml.

Para determinar as perdas por evaporação, durante a realização dos ensaios, foram separados três recipientes com as mesmas características dos coletores e colocados em pontos aleatórios nas adjacências da área de ensaios. O volume evaporado durante um determinado ensaio foi somado ao volume coletado em cada pluviômetro.

O sistema foi ensaiado em três regulagens do relé percentual, 20, 40 e 60%. Para cada regulagem foram feitas quatro repetições, sendo que duas delas o equipamento estava em condições normais de funcionamento, isto é, operando com todos os seus difusores funcionando, condições estas para as quais esperava-se altos

coeficientes de uniformidade. Nas outras duas repetições eliminou-se 10 difusores em ordem alternada ao longo da linha lateral, buscando-se obter baixos coeficientes de uniformidade acima da superficie do solo. Tomou-se esta iniciativa com o objetivo de possibilitar comparações de altos e baixos coeficientes acima da superficie com aqueles obtidos abaixo da superficie do solo. Todos os ensaios foram realizados entre as três e seis horas da manhã, procurando-se minimizar as interferências de vento.

Para cada regulagem do relé percentual, foi medido o tempo gasto para o sistema completar uma volta de 360°. Para isto utilizou-se um cronômetro e colocou-se o sistema em operação marcando-se o tempo gasto na realização de uma revolução completa. Esta operação foi realizada em três repetições para cada regulagem percentual.

Foi medida também a largura da faixa molhada na extremidade da linha lateral. Para tanto o sistema foi colocado em operação com as unidades propulsoras desligadas, medindo em seguida a faixa molhada sobre a superfície do solo. Determinou-se ainda, o tempo durante o qual o último coletor permaneceu recebendo água, para as três regulagens do relé percentual.

Para se determinar a área irrigada pelo sistema, considerou-se o comprimento da linha lateral como igual ao raio da área útil irrigada, como feito no projeto do sistema. A partir deste valor usou-se a eq.8 para o

cálculo desta área.

O cálculo da intensidade máxima de aplicação de água foi feito usando-se a equação:

$$P_{\text{max}} = 75 \times \frac{y_p}{Tm}$$

em que:

Pmax - intensidade de aplicação máxima, mm/h;

Tm - tempo de molhamento na extremidade do pivô, min.

3.5.5. Umidade abaixo da superficie

A determinação da uniformidade de distribuição de água abaixo da superfície do solo foi realizada utilizando-se amostras de solo, coletadas a um raio de 30cm ao redor de cada pluviômetro, nas camadas de 0-15; 15-30; 30-45cm.

As amostras de solo foram coletadas antes da irrigação e em tempos de 0, 12, 24 e 36 horas após o seu final.

Os teores de água das amostras de solo, foram determinados pelo método gravimétrico.

3.5.6. Coeficiente de uniformidade

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. Neste trabalho, os coeficientes de uniformidade foram calculados para as distribuições superficial e subsuperficial, nas profundidades e tempos considerados.

Para o cálculo dos coeficientes de uniformidade de Christiansen (CUC), adotou-se o procedimento sugerido por HEERMANN & HEIN (1968), utilizando-se a eq.2 e para o coeficiente de uniformidade de distribuição utilizou-se a eq.4 proposta por DAVIS (1966).

3.5.7. Eficiência de irrigação

Para a determinação dos parâmetros de eficiência de irrigação foi usado o modelo normal proposto por WALKER (1979). Para a aplicação deste modelo, foram utilizadas as lâminas coletadas nos pluviômetros e também as lâminas armazenadas no solo, isto no caso das irrigações realizadas com o equipamento operando a 20% de velocidade. Assim foram obtidos os parâmetros de eficiência de irrigação tanto acima como abaixo da superfície do solo, possibilitando uma comparação entre eles.

Para as irrigações realizadas a 40 e 60% de velocidade, somente foram utilizadas as lâminas coletadas nos pluviômetros, isto é, não foram determinados os parâmetros de eficiência de irrigação com dados medidos abaixo da superfície do solo, devido às pequenas lâminas aplicadas pelo equipamento.

A lâmina requerida (Yr) para cada irrigação, foi a lâmina necessária para elevar a umidade atual do solo, determinada antes da irrigação, até a umidade na capacidade de campo, para tanto utilizou a seguinte equação:

 $y_x = (\theta cc - \theta a) Z$

em que:

- Occ umidade do solo na capacidade de campo, em cm¹/cm¹:
- θa umidade do solo no momento da irrigação em cm³/cm³:
- Z profundidade da camada de solo estudada, em cm.

Para as irrigações realizadas a 20 e 40% de velocidade, considerou-se a camada de solo estudada (Z) igual a 30cm e para a irrigação a 60% de velocidade, esta camada foi considerada como sendo igual a 20cm.

Obtendo-se as lâminas médias (y), o desvio padrão (s) e o coeficiente de variação (Cv), de conjunto de dados e calculando-se os valores de Δ' , Δ , Ad por meio das equações 9, 10 e 11 respectivamente, possibilitou a

determinação da eficiência de aplicação (Ea) pela eq.13 e da eficiência de armazenamento (Es) pela eq.14.

A eficiência de aplicação em potencial, EAP, foi calculada segundo a equação proposta por MERRIAN & KELLER (1979), eq.5.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Distribuição de pressão

A Figura 4, representa as distribuições de pressão nos bocais dos difusores ao longo da lateral do pivô-central, para as duas posições de ensaio, obtidas pelos dados de pressão medidos no campo com manômetro de Bourdon.

O que pode ser observado quando se compara as distribuições de pressão ao longo da lateral do pivô nas duas posições de ensaio é que, na posição 2, na qual a linha lateral está em aclive, nos primeiros 2/3 do seu comprimento as pressões são ligeiramente superiores, com exceção em poucos difusores. No terço final do seu comprimento ocorre o inverso, isto é, as pressões se tornam ligeiramente inferiores. Isto vem confirmar a colocação de alguns autores (EDLING, 1979; JAMES & BLAIR, 1984): quando a linha lateral de um pivô opera em aclive no seu início há um pequeno acréscimo pressão em. relação na à linha em nivel.

Nas observações feitas durante os ensaios em campo foi possível constatar que as pressões no ponto do

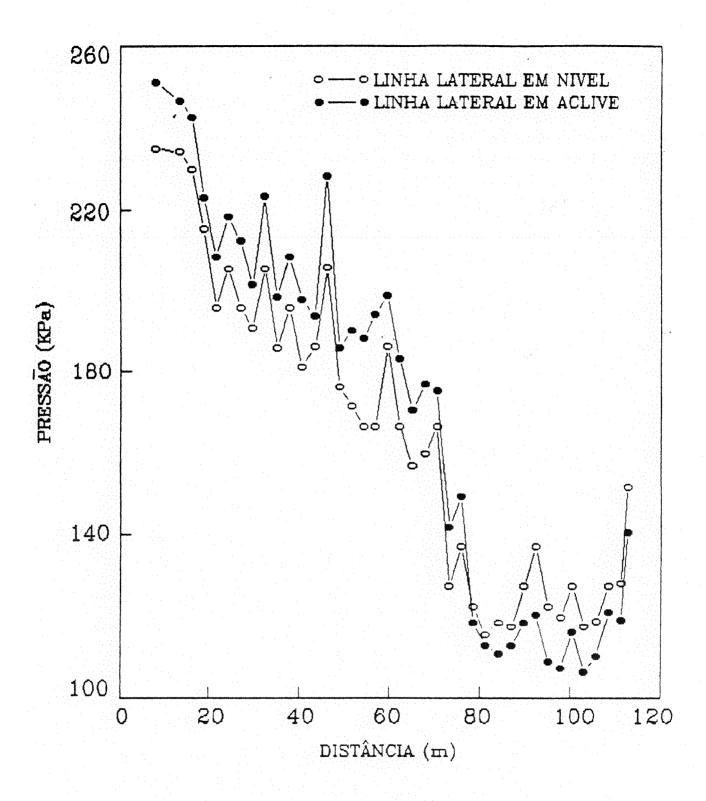


Figura 4 - Distribuição de pressão nos bocais dos difusores ao longo da linha lateral do pivô-central.

pivô não sofreram variações mantendo-se a 352,80 KPa tanto com a linha lateral em nível como em aclive, fato este que pode ser explicado devido ao pequeno aclive da área.

Na Figura 4 observa-se que em alguns difusores as pressões sofreram alterações em relação aos difusores mais próximos isso poderia ser atribuído devido à desuniformidade de operação dos reguladores de pressão.

4.2. Distribuição da vazão

Na Figura 5, são representadas as distribuições de vazão nas duas posições da linha lateral do pivô-central. Observa-se nessas figuras que a distribuição de vazão é praticamente igual para as duas posições. Entretanto constatou-se um pequeno acréscimo da vazão total do sistema na posição 1, na qual a linha lateral está em nível. Este acréscimo é da ordem de 2,34%, sendo as vazões totais nas posições 1 e 2 igual a 27,98 e 27,34 m³/h, respectivamente.

4.3. Uniformidade de distribuição de água acima da superfície do solo

Na Tabela 4 são apresentados os valores de coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC), coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD),

Figura 5 - Distribuição de vazão ao longo da linha lateral do pivô-central.

Tabela 4 - Valores do Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC), Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD), Velocidade do Vento, Temperatura e Umidade Relativa do Ar, para os ensaios realizados com equipamento em suas condições normais de funcionamento.

Regulaçõe de Reld (K)	Posição	Tempe- ratura (°C)	Veloc. Vento (m/s)	Umid. Rel. (%)	CUC	CUD (%)
20	1	29,15	0,5	53	85,98	77,98
	2	26,65	1,0	63	89,56	82,92
40	1	24,48	0,8	61	86,04	78,41
	2	22,53	1,2	63	89,13	82,99
60	1	28,93	1,4	55	86,79	79,20
	2	28,70	0,4	56	85,27	77,47

Posição 1 - Linha lateral em nivel.

Posição 2 - Linha lateral em aclive.

velocidade do vento, temperatura e umidade relativa do ar, para os ensaios realizados com equipamento em suas condições normais de funcionamento, ou seja, com todos os difusores em operação.

Uma primeira análise permite constatar que o coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD) foi sempre menor que o coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC). Este fato é inerente às variáveis das equações utilizadas para se determinar tais coeficientes, uma vez que para o cálculo do CUD são considerados apenas 25% da área que recebeu as menores lâminas.

Analisando os valores contidos na Tabela 4, verifica-se que os menores valores de CUC e também de CUD foram encontrados nos casos em que o sistema operou em nível, isso para os ensaios realizados com regulagem do relé percentual a 20 e 40%, tendo ocorrido o oposto com o relé regulado a 60%. Esse fato sofreu influência da intensidade do vento, que nos ensaios a 60%, na posição 1, foram realizados com velocidade do vento superior aos ensaios a 60% na posição 2.

Os menores coeficientes de uniformidade não foram obtidos na condição de maior velocidade de vento. Segundo JENSEN (1983), o efeito do vento em sistemas tipo pivô-central é reduzido pela constante variação em sua intensidade e direção e pelo contínuo movimento da linha lateral, que permite um número infinito de posições ao

longo de sua trajetória.

Conforme EDLING (1979), quando o pivô opera em aclive, ocorre uma diminuição da pressão à medida que se afasta do centro, devido às condições impostas pela topografia, além da perda de carga. A pressão na saída do jato diminui, produzindo gotas de maiores diâmetros e, portanto, menos sujeitas ao arrastamento pelo vento; logo, espera-se que os coeficientes de uniformidade distribuição sejam maiores para o pivô operando em aclive. Apesar das baixas velocidades de vento observadas durante os ensaios, os valores de CUC e CUD apresentados na Tabela mostraram uma pequena tendência de aumento para velocidades de vento relativamente maiores. Nesse caso, a redução da pressão em função do aclive do terreno, não foi suficiente para diminuir a vazão a um possibilitasse uma queda na uniformidade de distribuição,

Na Tabela 5, são apresentados os valores de coeficiente uniformidade de de Christiansen (CUC), coeficiente de uniformidade de distribuição velocidade do vento, temperatura e da umidade relativa do ar, para os ensaios realizados com equipamento tendo 10 difusores eliminados. Como era esperado, os coeficientes de uniformidade tiveram seus valores bem reduzidos, os quais estão abaixo do limite aceitável de acordo com os critérios de avaliação existentes. Critérios estes que afirmam que para um sistema de irrigação por aspersão ser aceito é

Tabela 5 - Valores do Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC), Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD), Velocidade do Vento, Temperatura e Umidade Relativa do Ar, para os ensaios realizados com equipamento tendo 10 difusores eliminados.

Regulaçõe de Rold (X)	Posição	Tempe- ratura (°C)	Veloc. Vento (m/s)	Umid. Rel. (%)	CUC (%)	CUD (%)
20	1	30,14	0,60	72,80	59,42	44,51
	2	28,40	0,70	69,43	68,08	62,87
40	1	25,16	0,80	74,51	65,49	57,85
	2	26,83	1,00	73,67	69,08	61,15
60	1	22,11	0,80	66,10	60,48	61,57
	2	23,54	0,60	62,25	63,75	51,68

Posição 1 - Linha lateral em nível.

Posição 2 - Linha lateral em aclive.

necessário que o mesmo tenha coeficientes de uniformidade superiores a 80%.

Analisando os valores contidos na *Tabela 5*, verifica-se também que os menores valores de CUC e CUD foram encontrados nos casos em que o sistema operou com a linha lateral em nível, com exceção do CUD na regulagem de 60% no relé temporizador.

Em relação à velocidade do vento, durante a realização dos ensaios, foram obtidos valores bem próximos e baixos, sendo que não houve casos com valores superiores a 1,0m/s, como mostra a *Tabela 5*. Contudo não foi possível a verificação do efeito deste fator sobre os coeficientes de uniformidade.

Na Tabela 6 são apresentados os valores de velocidade da última torre, tempo para uma volta completa, tempo de molhamento na extremidade, largura da faixa molhada, precipitação máxima, área irrigada e as lâminas médias coletadas, evaporadas e aplicadas.

Nessa tabela observa-se que os valores calculados de intensidade máxima de precipitação, apesar de menores que aqueles encontrados por COTRIM (1988), são ainda elevados. Era esperado que o uso de difusores no equipamento conduzisse a valores desta ordem de grandeza. Apesar desses valores elevados, não foi constatado ocorrência de escoamento superficial durante a realização

Tabela 6 - Valores dos principais parâmetros obtidos nos ensaios realizados com o equipamento em condições normais de funcionamento.

Parâmetros	Regulagem do Relé Percentual				
	60%	40%	20%		
Velocidade da 61916a Serre (a/h)	66,62	45,32	17,14		
Tenpo para una volta (h)	7,80	11,47	30,32		
Tespo de selhamente na extrenidade (ain)	7,54	11,08	29,30		
targura da faixa aothada (a)	11,15	11,15	11,15		
Procipitação názima (os/h)	44,31	48,00	57,02		
Área irrigada (ha)	3,85	3,85	3,85		
Lânina nédia colobada (no)	4,29	8,08	18,13		
Länins média byaporada (on)	0,20	0,25	0,38		
Länina addia aplicada (ps)	4,49	8,33	18,51		

dos ensaios. De fato, a alta VIB (da ordem de 45mm/h) • a pequena lâmina aplicada (Tabela 6) pelo sistema podem ter contribuido para evitar escoamento superficial.

Nas Figuras 6, 7 e 8, são mostrados os perfis da precipitação ao longo da linha lateral. As figuras correspondem, respectivamente, às regulagens de 20, 40 e 60% de velocidade, para quando o equipamento está em suas condições normais de funcionamento.

Os gráficos mostrados permitem a visualização da distribuição de água ao longo da linha lateral, podendo-se verificar o comportamento dos valores medidos em relação à média. Ainda, permitem a identificação de pontos onde ocorreu a aplicação de água em quantidade superior ou inferior à média, o que pode estar relacionado com problemas nos difusores ou nos reguladores de pressão. Essas dispersões em relação à lâmina média é responsável pela desuniformidade da distribuição da água na área.

Pelas Figuras 6, 7 e 8 verifica-se que na maior parte da área, correspondente à porção intermediária da linha lateral, as lâminas aplicadas tiveram melhor uniformidade. Entretanto, para todos os ensaios realizados, a extremidade inicial da linha lateral, correspondente à área de ação dos menores difusores, contribuiu para reduzir a uniformidade de distribuição da água.

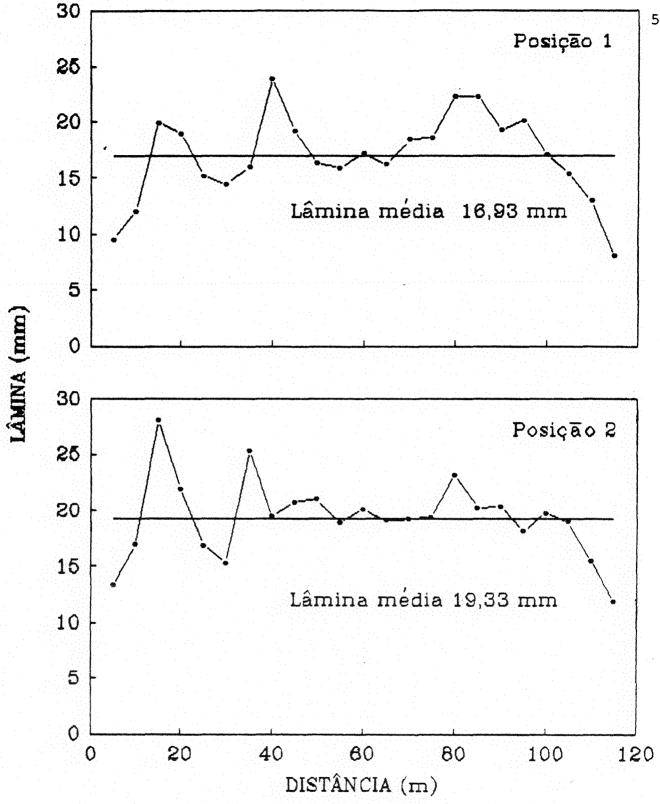


Figura 6 - Perfil da precipitação ao longo da linha lateral, para o pivô-central operando a 20% de velocidade em suas condições normais de funcionamento.

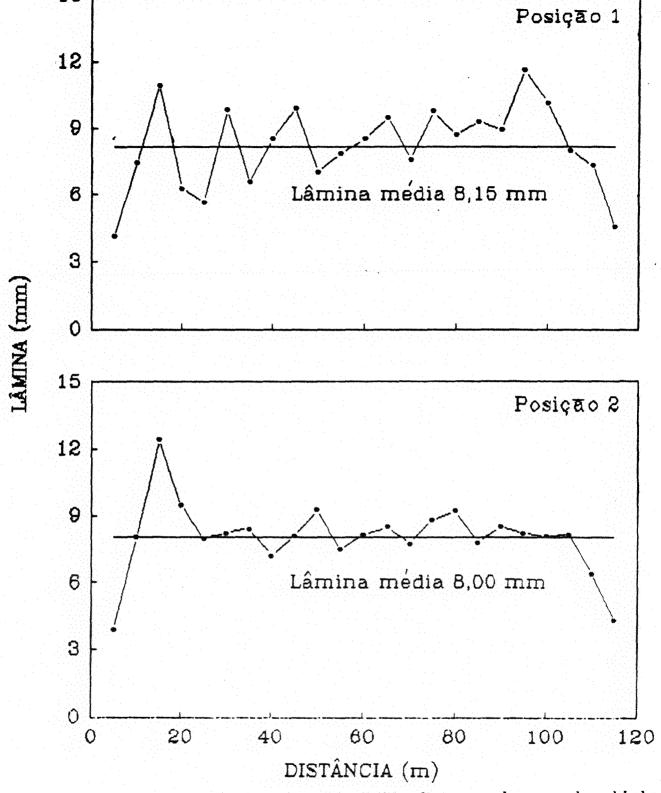


Figura 7 - Perfil da precipitação ao longo da linha lateral, para o pivô-central operando a 40% de velocidade em suas condições normais de funcionamento.

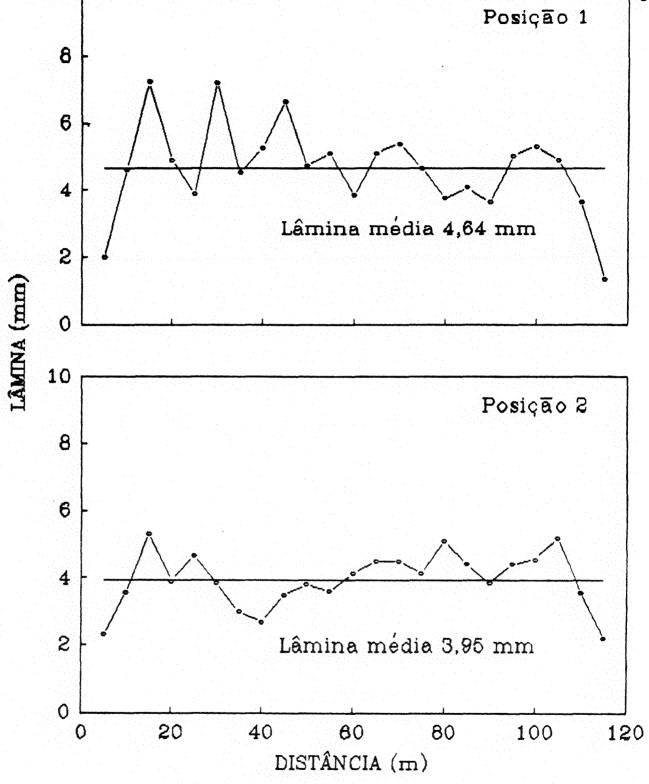


Figura 8 - Perfil da precipitação ao longo da linha lateral, para o pivô-central operando a 60% de velocidade em suas condições normais de funcionamento.

4.4. Uniformidade de distribuição de água abaixo da superfície do solo

Inicialmente constatou-se que, a distribuição de umidade abaixo da superfície do solo, mesmo antes de se realizarem as irrigações, tinha coeficientes de uniformidades bastante elevados em todas as profundidades estudadas, tanto no caso dos Coeficientes de Uniformidade de Christiansen (CUC), como também dos Coeficientes de Uniformidade de Distribuição (CUD). Antes das irrigações, tanto para a posição 1 como para a 2, os valores médios de CUC e CUD foram iguais a 95,68% com desvio padrão de 0,67 e 92,52% com desvio padrão de 0,57, respectivamente.

Nas Tabelas 7 e 8 para as posições 1 e 2, respectivamente, são apresentados os valores médios dos coeficientes de uniformidade de Christiansen (CUC), os quais foram obtidos através da umidade do solo, após irrigações realizadas com o equipamento em condições normais de funcionamento, em diferentes tempos e profundidades para as três velocidades estudadas.

Observou-se por meio dos valores apresentados nas *Tabelas 7 e 8* que quase não houve variações nos coeficientes, tendo os mesmos permanecido praticamente constantes durante o período de tempo estudado. Analisando os valores médio dos coeficientes de uniformidade no perfil de solo estudado (nas três

Tabela 7 - Valores médios dos Coeficientes de Uniformidade de Christiansen (CUC), obtidos através de umidade do solo, após irrigações realizadas com o equipamento em condições normais de funcionamento, em diferentes tempos e profundidades para as três velocidades estudadas, na posição i (linha lateral em nível).

		Velocidade			
Tempo/Prof	empo/Profundidade -		40%	60%	- Média
	7,5	96,10	95,92	92,88	94,97
	22,5	96,63	94,86	94,00	95,16
0	37,5	97,32	94,26	93,83	95,14
Média		96,68	95,01	93,57	95,09
	7,5	96,13	95,21	92,27	94,54
4.0	22,5	96,26	94,83	93,84	94,98
12	37,5	97,27	94,33	94,29	95,30
Média		96,55	94,79	93,47	94,94
	7,5	96,69	94,96	92,07	94,57
24	22,5	95,69	94,14	93,37	94,40
24	37,5	97,08	94,25	94,18	95,17
Média		96,49	94,45	93,21	94,72
	7,5	95,25	94,26	91,95	93,82
36	22,5	96,28	93,48	93,36	94,37
36	37,5	96,84	94,01	92,16	94,34
Média		96,12	93,92	92,49	94,18

Tabela 8 - Valores médios dos Coeficientes de Uniformidade de Christiansen (CUC), obtidos através de umidade do solo, após irrigações realizadas com o equipamento em condições normais de funcionamento, em diferentes tempos e profundidades para as três velocidades estudadas, na posição 2 (linha lateral em aclive).

	Velocidade empo/Profundidade 20% 40% 60%				
Tempo/Prof			40%	60%	- M édia
	7,5	96,69	94,15	94,09	94,98
•	22,5	97,24	95,57	94,73	95,85
0	37,5	97,38	95,26	96,23	96,29
Média		97,10	94,99	95,02	95,70
	7,5	96,80	93,40	93,68	94,63
• •	22,5	97,37	95,90	94,90	96,06
12	37,5	97,41	94,73	95,58	95,91
Média		97,19	94,68	94,72	95,53
	7,5	97,17	93,40	93,25	94,61
0.4	22,5	97,45	95,36	94,49	95,77
24	37,5	97,79	95,00	95,91	96,23
Média		97,47	94,59	94,55	95,54
	7,5	96,22	93,13	92,92	94,09
36	22,5	96,43	95,46	94,26	95,35
30	37,5	97,57	95,46	95,98	96,34
Média		96,74	94,68	94,35	95,26

profundidades), para as três velocidades, pode-se verificar que a maior variação do CUC, em relação à média dos coeficientes antes das irrigações é de 3,33%, estando seus valores médios após as irrigações no intervalo de 92,49 a 97,47%. Esta maior variação ocorreu entre a média de 95,68% antes das irrigações e a média de 92,49% no tempo de 36 horas para a velocidade de 60%, quando a linha lateral estava em nível (posição 1). Fato esse que pode ser explicado em função da pequena lâmina aplicada pelo equipamento quando operando na velocidade de 60%.

Comparando também o valor médio de CUC antes das irrigações com os valores médios para todo o perfil estudado nas três velocidades, observa-se que, para a velocidade de 20% ocorreu um ligeiro acréscimo e para as velocidades de 40 e 60% ocorreu pequeno decréscimo nos valores de CUC, sendo de maneira geral esses decréscimos mais acentuados para a velocidade de 60%.

De maneira geral nota-se nos valores médios de cada profundidade nas três velocidades estudadas, que houve pequenos acréscimos nos valores dos CUC para as camadas mais profundas de solo.

Nas Tabelas 9 e 10 para as posições 1 e 2, respectivamente, são apresentados os valores médios dos Coeficientes de Uniformidade de Distribuição (CUD), os quais foram obtidos também através de umidade do solo, após irrigações realizadas com o equipamento em condições

Tabela 9 - Valores médios dos Coeficientes de Uniformidade de Distribuição (CUD), obtidos através de umidade do solo, após irrigações realizadas com o equipamento em condições normais de funcionamento, em diferentes tempos e profundidades para as três velocidades testadas, na posição 1 (linha lateral em nível).

	Velocidade				
Tempo/Proi	po/Profundidade -		40%	60%	- Média
	7,5	93,39	94,37	90,89	92,88
•	22,5	95,62	90,99	89,69	92,10
0	37,5	96,77	90,25	89,47	92,16
Média		95,26	91,87	90,02	92,38
	7,5	93,43	93,95	90,27	92,55
	22,5	94,84	91,77	89,59	92,07
12	37,5	95,46	90,36	90,73	92,18
Média		94,58	92,03	90,20	92,27
	7,5	95,39	93,53	89,87	92,93
0.4	22,5	93,95	89,35	89,83	91,04
24	37,5	94,41	90,26	90,25	91,64
Média		94,58	91,05	89,98	91,87
	7,5	92,09	91,96	89,72	91,26
36	22,5	94,85	89,03	89,78	91,22
30	37,5	94,49	89,96	86,66	90,37
Média		93,81	90,32	88,72	90,95

Tabela 10 - Valores médios dos Coeficientes de Uniformidade de Distribuição (CUD), obtidos através de umidade do solo, após irrigações realizadas com o equipamento em condições normais de funcionamento, em diferentes tempos e profundidades para as três velocidades testadas, na posição 2 (linha lateral em aclive).

			Velocidade		
Tempo/Profundidade -		20%	40%	60%	- Média
	7,5	93,78	91,26	91,88	92,31
	22,5	95,13	91,66	91,75	92,85
0	37,5	95,16	92,50	93,26	93,64
Média		94,69	91,81	92,30	92,93
	7,5	93,96	89,91	91,54	91,80
12	22,5	95,96	92,91	91,90	93,59
de des	37,5	95,63	90,68	92,43	93,25
Média		95,18	91,17	91,96	92,77
	7,5	94,67	89,71	90,11	91,50
24	22,5	95,93	92,36	91,47	93,25
24	37,5	95,77	90,34	92,94	93,02
Média		95,46	90,80	91,51	92,59
	7,5	92,45	89,28	90,55	90,76
36	22,5	91,75	92,94	90,91	91,87
30	37,5	95,94	92,95	93,13	94,01
Média		93,38	91,72	91,53	92,21

normais de funcionamento, em diferentes tempos e profundidades para as três velocidades estudadas.

Analisando os valores médios de todo o perfil, apresentados nas *Tabelas 9 e 10*, observa-se que a maior variação em relação à média dos coeficientes antes das irrigações é de 4,11%, estando seus valores médios após as irrigações no intervalo de 88,72 a 95,46%. Observa-se também que as tendências dos valores de CUD são iguais às ocorridas para os valores de CUC, tendo um ligeiro acréscimo para a velocidade de 20% e decréscimos nas velocidades de 40 e 60%.

Nas Tabelas 11 e 12 para as posições 1 e 2, respectivamente, são apresentados os valores médios dos coeficientes de uniformidade de Christiansen (CUC), os quais foram obtidos através de umidade do solo, após irrigações realizadas com o equipamento tendo 10 difusores eliminados, em diferentes tempos e profundidades para as três velocidades estudadas, na posição 1.

Analisando os valores de CUC nas tabelas acima citadas, observa-se que as variações são maiores quando comparadas com os valores contidos nas Tabelas 7 e 8. Esse fato se deve à desuniformidade da distribuição superficial da água aplicada, a qual provocou uma diminuição na uniformidade de distribuição abaixo da superfície do solo.

Comparando a média dos valores de CUC antes

Tabela 11 - Valores médios dos Coeficientes de Uniformidade

de Christiansen (CUC), obtidos através de

umidade do solo, após irrigações realizadas com

o equipamento tendo 10 difusores eliminados, em

diferentes tempos e profundidades para as três

velocidades estudadas, na posição 1.

			Velocidade		
Tempo/Profundidade —		20%	40%	60%	- M édia
	7,5	87,72	85,32	83,74	85,59
0	22,5	82,25	83,65	81,23	82,38
<u> </u>	37,5	95,16	95,10	95,08	95,11
Média		88,38	88,02	86,68	87,69
	7,5	89,14	88,23	86,87	88,08
40	22,5	88,20	88,00	85,38	87,19
12	37,5	95,26	94,88	95,91	95,35
Média		90,87	90,37	89,39	90,21
	7,5	94,83	93,10	89,16	92,36
24	22,5	93,20	92,83	88,76	91,60
	37,5	95,68	96,90	96,14	96,24
Média		94,57	94,28	91,35	93,40
	7,5	95,83	95,14	94,33	95,10
36	22,5	94,27	94,23	97,00	95,17
36	37,5	97,88	97,10	96,74	97,24
Média		95,99	95,49	96,02	95,83

Tabela 12 - Valores médios dos Coeficientes de Uniformidade de Christiansen (CUC), obtidos através de umidade do solo, após irrigações realizadas com o equipamento tendo 10 difusores eliminados, em diferentes tempos e profundidades para as três velocidades estudadas, na posição 2.

	Velocidade				
Gempo/Profundidade -		20%	40%	60%	- Média
	7,5	88,62	87,25	81,32	85,73
0	22,5	85,96	81,50	80,40	82,62
	37,5	93,97	95,28	96,03	95,09
Média		89,52	88,01	85,92	87,82
	7,5	95,04	88,14	84,35	89,18
12	22,5	94,28	84,23	83,21	87,24
	37,5	94,38	96,78	95,64	95,60
Média		94,57	89,72	87,73	90,67
	7,5	96,06	89,53	88,54	91,38
24	22,5	94,22	88,84	87,32	90,13
Chara T	37,5	94,88	97,08	96,23	96,06
Média		95,05	91,82	90,70	92,52
	7,5	95,95	95,12	92,13	94,40
36	22,5	96,34	96,74	95,24	96,11
	37,5	95,92	97,81	97,18	96,97
Média		96,07	96,56	94,85	95,83

das irrigações e os valores médios para todo o perfil estudado, nas três velocidades, pode ser verificado que a maior variação ocorrida é de 10,20%, estando seus valores médios após as irrigações no intervalo de 85,92 a 96,56%. Esta maior variação ocorreu entre a média de 95,68% antes das irrigações e a média de 85,92% no tempo de zero horas na velocidade de 60% quando a linha lateral estava em aclive (posição 2).

Observou-se também, por meio dos valores médios para as três profundidades estudadas, que os maiores valores de CUC sempre ocorreram para a velocidade de 20%. Fato esse, que pode ter ocorrido em função de que a 20% de velocidade, o equipamento aplica maior lâmina em relação às outras velocidades.

Os maiores valores dos CUC foram alcançados no tempo de 36 horas após a irrigação, para todas as profundidades, sendo que houve um acréscimo ao longo do tempo, chegando a valores próximos aos valores antes das irrigações.

Todos os valores dos CUC obtidos por meio da umidade do solo, encontram-se acima dos valores fixados pelos critérios de avaliação existentes para os coeficientes de uniformidade superficiais, para que um sistema de irrigação por aspersão seja considerado aceitável.

Nas Tabelas 13 e 14 para as posições 1 e 2 respectivamente, são apresentados os valores médios dos Coeficientes de Uniformidade de Distribuição (CUD), os quais foram obtidos também através de umidade do solo, após irrigações realizadas com o equipamento tendo 10 emissores eliminados, em diferentes tempos e profundidades para as três velocidades estudadas.

Analisando os valores médios apresentados nas tabelas acima citadas, observa-se que a maior variação em relação à média dos coeficientes antes das irrigações é de 9,32%, estando seus valores médios após as irrigações no intervalo de 83,90 a 94,59%. Observa-se também que as tendências dos valores de CUD são iguais às ocorridas para os valores de CUC.

Na Tabela 15 são apresentados valores dos coeficientes de uniformidade obtidos acima e abaixo da superfície do solo. Os valores apresentados nesta tabela no caso dos coeficientes acima da superfície foram obtidos fazendo-se a média para as três velocidades e também para as duas posições de ensaio, utilizando os valores das Tabelas 4 e 5. Para os coeficientes abaixo da superfície do solo utilizou-se os valores médios das três velocidades e das três profundidades estudadas, fazendo-se a média para as duas posições de ensaio, para tanto utilizou-se os valores das tabelas de número 7 a 14.

Analisando os valores apresentados na Tabela

15, considerando que a distribuição de umidade abaixo da superfície do solo encontrava—se antes das irrigações com coeficientes de uniformidade bastante elevados (CUC=95,68%; CUD=92,52%), observa que para valores mais altos de coeficiente de uniformidade acima da superfície, os valores abaixo da superfície permaneceram praticamente constantes durante o período de tempo estudado. Para valores menores de coeficiente de uniformidade acima da superfície, isto é uma desuniformidade de distribuição superfícial, ocorreu uma diminuição na uniformidade de distribuição abaixo da superfície do solo, isso logo após as irrigações. Mas no entanto em curto espaço de tempo (36 horas) esta uniformidade tendeu a voltar a aproximadamente o que era antes das irrigações.

Observa-se também pela Tabela 15 que todos os coeficientes de uniformidade abaixo da superficie do solo encontram-se acima dos valores fixados pelos critérios existentes para os coeficientes de uniformidade, para que um sistema de irrigação por aspersão seja considerado aceitável. Portanto, se os mesmos critérios puderem ser aplicados para as distribuições subsuperficiais a uniformidade de distribuição superficial necessariamente não precisa ser alta.

Tabela 13 - Valores médios dos Coeficientes de

Uniformidade de Distribuição (CUD), obtidos

através de umidade do solo, após irrigações

realizadas com o equipamento tendo 10 difusores

eliminados, em diferentes tempos e

profundidades para as três velocidades

estudadas, na posição 1.

			Velocidade		
empo/Profundidade -		20%	40%	60%	- Média
	7,5	85,23	82,16	81,87	83,09
•	22,5	80,12	81,10	79,18	80,13
0	37,5	94,14	92,24	93,47	93,28
Média		86,50	85,17	84,84	85,50
	7,5	87,21	86,00	84,53	85,91
4.0	22,5	85,72	86,14	82,47	84,78
12	37,5	94,20	93,17	92,35	93,24
Média		89,04	88,44	86,45	87,98
	7,5	92,70	91,16	87,23	90,36
0.4	22,5	91,43	90,47	85,84	89,25
24	37,5	92,54	94,32	94,30	93,72
Média		92,22	91,98	89,12	91,11
	7,5	93,21	92,23	92,17	92,54
36	22,5	92,54	92,01	93,71	92,75
36	37,5	95,27	95,65	94,25	95,06
Média		93,67	93,30	93,38	93,45

Tabela 14 - Valores médios dos Coeficientes de Uniformidade de Distribuição (CUD), obtidos através de umidade do solo, após irrigações realizadas com o equipamento tendo 10 difusores eliminados, em diferentes tempos e profundidades para as três velocidades estudadas, na posição 2.

Tempo/Profundidade —		Velocidade			
		20%	40%	60%	- Média
	7,5	86,45	85,16	79,25	83,62
•	22,5	83,90	79,28	78,16	80,45
O	37,5	91,16	92,33	94,28	92,59
Média		87,17	85,59	83,90	85,55
	7,5	93,10	85,40	83,00	87,17
12	22,5	91,83	81,23	81,87	84,98
12	37,5	91,96	93,54	92,75	92,75
Média		92,30	86,72	85,87	88,30
erannen erretaria (filosoficiale) erretaria (filosoficiale) erretaria (filosoficiale) erretaria (filosoficiale)	7,5	94,77	87,42	85,73	89,31
24	22,5	91,88	86,34	84,38	87,53
	37,5	92,96	95,25	94,25	94,15
Média		93,20	89,67	88,12	90,33
	7,5	93,47	93,40	90,17	92,35
36	22,5	94,16	94,63	94,83	94,54
	37,5	94,57	95,73	95,39	95,23
Média		94,07	94,59	93,46	94,04

Tabela 15 - Comparação entre valores dos Coeficientes de Uniformidade obtidos acima e abaixo da superfície do solo.

	equip. em sua normais de fu		equip. tendo 10 emissores eliminados		
tempo (horas)	CUC	CUD	CUC	CUD	
	87,13*	79,83*	64,38*	56,61*	
0**	95,40	92,66	87,76	85,53	
12	95,24	92,52	90,44	88,14	
24	95,13	92,23	92,96	90,72	
36	94,72	91,58	95,83	93,75	

^{*} Coeficientes acima da superficie.

^{**} Tempo logo após a irrigação.

4.5. Eficiência de irrigação

Com o objetivo de analisar as irrigações em função de suas eficiências, somente trabalhou-se com os dados das irrigações nas quais os equipamento operou em suas condições normais de funcionamento.

Durante a realização do trabalho observou-se que houve pequena variação na umidade do solo nas camadas mais profundas, fato este observado principalmente para as irrigações realizadas a 40 e 60% de velocidade.

Um outro fator a considerar é que o sistema pivô-central, objeto de estudo desse trabalho é um equipamento projetado para praticar irrigações leves e frequentes e no caso específico deste equipamento utilizado, as lâminas são muito pequenas, mesmo quando o equipamento opera em baixas velocidades. Dessa forma, as análises do desempenho do sistema de irrigação foram feitas considerando a profundidade da camada de solo estudada (Z) igual a 30cm para as irrigações realizadas a 20 e 40% de velocidade e 20cm para a irrigação a 60% de velocidade.

Os valores de lâmina média (\overline{y}) , lâmina requerida (y_i) e os parâmetros para avaliação propostos por WALKER (1979), são apresentados na **Tabela 16** para a irrigação realizada a 20% de velocidade.

Observa-se na **Tabela 16**, que tanto utilizando dados medidos acima da superfície e dados

superficie abaixo da do solo. deficientemente irrigadas e consequentemente os volumes deficientes foram muito baixos. lsso ocorreu devido à aplicação de uma lâmina maior do que a necessária para elevar a umidade do solo na camada considerada à capacidade de campo. Com isto o volume aplicado em excesso é grande, implicando em baixas eficiências aplicação e em elevados valores de perda por percolação profunda. A eficiência de armazenamento neste caso foi elevada, aproximadamente 100%, indicando que o requerimento de água foi totalmente satisfeito.

Comparando-se os parâmetros, observa-se que com os dados medidos acima da superfície a eficiência de aplicação foi bem menor em relação aos dados medidos abaixo da superfície, ocorrendo o oposto quando se compara as perdas por percolação profunda. Entretanto isto se explica em função da grande diferença entre as duas lâminas médias, uma vez que a lâmina média coleta é 74,55% maior que a lâmina média armazenada.

Os valores de lâmina média (Y), lâmina requerida (Yr) e os parâmetros para avaliação propostos por WALKER (1979), para as irrigações realizadas a 40 e 60% de velocidade, são apresentados na Tabela 17.

Na irrigação realizada à velocidade de 40%, foi aplicada uma lâmina média 12,56% menor que a requerida, resultando num alto valor de área deficientemente irrigada.

Tabela 16 - Lâmina média (Y), em mm, Lâmina requerida (Yr), em mm, Área Deficientemente Irrigada (AD), Volume Deficiente (VD), Eficiência de Aplicação (Ea), Eficiência de Armazenamento (Es), e Perda por Percolação Profunda (Pp), para a irrigação realizada a 20% de velocidade.

	Valores dos Parâmetros				
Parâmetros	acima da superfície	abaixo da superficie			
Y (mm)	17,42*	9,98**			
Yr (mm)	6,39	6,39			
AD (%)	0,06	0,87			
VD (adm)	1,83×10 ⁻¹	4×10-4			
Ea (%)	37,00	63,99			
Es (%)	100,00	99,94			
Pp (%)	63,00	36,01			

^{*} Lâmina média coletada

^{**} Lâmina média armazenada

Do volume total aplicado, 98,15% ficou armazenado na camada de solo de O a 30cm, satisfazendo 89,22% do requerimento.

Na irrigação realizada à velocidade de 60% foi aplicada uma lâmina média 40,71% menor que a requerida; portanto uma diferença maior e, conseqüentemente, uma área deficientemente irrigada superior quando comparada com a irrigação à velocidade de 40%. Do total aplicado, 100% ficou armazenado na camada de solo de 0 a 20cm, satisfazendo apenas 85,36% do requerimento.

Usando as duas repetições realizadas, para cada posição da linha lateral, obteve-se um único valor de eficiência, em potencial de aplicação para cada posição.

A Tabela 18 mostra os valores de eficiência, em potencial de aplicação (EPa), velocidade média do vento, umidade relativa e temperatura média do ar, para cada posição.

Pode-se verificar pelos dados da Tabela 18 que os valores da eficiência em potencial de aplicação (EPa) foram altos, superiores àqueles encontrados por COTRIM (1988). Os altos valores obtidos são explicados em função dos ensaios ter sido realizados durante as madrugadas, com isto as lâminas evaporadas foram desprezíveis, sendo as lâminas coletadas equivalentes às aplicadas (Tabela 6). Observa-se também nessa tabela, que, quanto maior a temperatura e menor a umidade relativa do ar, menor foi a eficiência em potencial de aplicação.

Tabela 17 - Lâmina média (Y), em mm, Lâmina requerida

(Yr), em mm, Área Deficientemente Irrigada

(AD), Volume Deficiente (VD), Eficiência de

Aplicação (Ea), Eficiência de Armazenamento

(Es), e Perda por Percolação Profunda (Pp),

para as irrigações realizadas a 40% e 60% de

velocidade.

Parâmetros	Veloc	idade
	40%	60%
<u> </u>	8,84	4,98
Yr (mm)	10,11	8,40
AD (%)	79,39	99,96
VD (adm)	0,12	0,17
Ea (%)	98,15	100,00
Es (%)	89,22	85,36
Pp (%)	0,00	0,00

Tabela 18 - Eficiência, em Potencial de Aplicação (EPa),

Velocidade média do vento, umidade relativa

média e temperatura média do ar, para os

ensaios em cada posição da linha lateral.

	facultoes	Posicio	Velecidade		7	
			do vonto (o/o)	relativa addia (%)	••••• •° C :	
	20	1	0,5	53	29,15	96,11
		2	1,0	63	26,65	98,23
	40	1	0,8	61	24,48	96,45
		2	1,2	63	22,53	97,86
	60	1	1,4	55	28,95	97,33
l		2	0,4	56	28,70	98,17

5. CONCLUSÕES

Os resultados da análise do desempenho operacional do pivô-central estudado, operando sobre solo classificado como Terra Roxa Estrutura, permitem concluir o seguinte:

- Considerando as posições em nível e aclive máximo da linha lateral do pivô-central na área irrigada, houve uma variação de 2,34% na vazão entre as duas posições, $(27,98 \text{ m}^3/\text{h} \text{ e} 27,34 \text{ m}^3/\text{h})$;
- A maior variação da lâmina coletada ocorreu na extremidade inicial da linha lateral;
- Para maior temperatura e menor umidade relativa do ar, menor foi a eficiência em potencial de aplicação;
- Em todas as profundidades os coeficientes de uniformidade foram superiores aos obtidos acima da superficie do solo;
- Os valores dos coeficientes de uniformidade abaixo da superfície do solo aumentaram com o tempo, em todas as profundidades estudadas;
- Os altos valores alcançados pelos coeficientes de uniformidade abaixo da superfície do solo,

em pequeno espaço de tempo, mesmo nos ensaios em que a uniformidade da água aplicada na superfície foi baixa, mostram que a uniformidade subsuperfícial depende pouco, da uniformidade acima da superfície.

Como sugestão, salienta-se a necessidade de se efetuarem ensaios de desempenho em todos os sistemas do tipo pivô-central instalados, na expectativa de detectar e solucionar os problemas, possibilitando assim um adequado manejo da irrigação. E também a necessidade de dar continuidade ao trabalho, buscando repostas conduzindo culturas irrigadas utilizando o mesmo sistema de irrigação com diferentes coeficientes de uniformidade.

Para o caso específico do equipamento ensaiado, melhor desempenho do sistema seria provavelmente alcançado se o fabricante diminuisse a velocidade de deslocamento da última torre. Menor velocidade permitiria a aplicação de lâminas maiores a cada volta, o que possivelmente conduziria a maior eficiência de aplicação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Sistema de irrigação por aspersão pivô-central, caracterização de desempenho método de ensaio; 1º Projeto de Normas. Rio de Janeiro, 1985. 22p. (PN 12:02.08.005)
- AZEVEDO NETO, J.M. & ALVAREZ, G.A. Manual de hidráulica.
 6.ed. São Paulo, Edgard Blücher, 1977. 2v.
- BERNARDO, S. Manual de irrigação. 3.ed. Viçosa, Imprensa Universitária. 1984. 463p.
- BORATO, F. Basic para engenheiros e cientistas. 2.ed.
 Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos, 1984.
 120p.
- BRIDI, S. Análise de uniformidade da distribuição de água em sistema de irrigação por pivô-central. Viçosa, 1984.

 87p. (M.S. Universidade Federal de Viçosa).
- CHRISTIANSEN, E.J. Irrigation by sprinkling. Berkeley, University of California, 1942. 142p. (Bulletin, 670).

- COTRIM, C.E. Análise de uniformidade de aplicação de água em sistema de irrigação do tipo pivô-central de baixa pressão. Viçosa, 1988. 114p. (M.S. Universidade Federal de Viçosa).
- DAVIS, J.R. Measuring water distribution from sprinklers.

 Transactions of the ASAE, St. Joseph, 9(1): 94-7, 1966.
- EDLING, R.J. Variation of center-pivot operation with field slope. Transaction of the ASAE, St. Joseph, 22(5): 1039-43, 1979.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do Paraná. Curitiba, EMBRAPA/SNLCS/SUDESUL/IAPAR, Boletim Técnico 57, 1984. 791p.
- ELLIOT, R.L.; NELSON, J.D.; LOFTIS, F.C.; HART, W.E.A Comparison of sprinkler uniformity models. Journal of the Irrigation and Drainage Division. ASCE, New York, 106(IR4): 321-32. Dec. 1980.
- FROST, K.R. Factors affecting evapotranspiration losses during sprinkling. Transactions of the ASAE, St. Joseph, $\underline{6}(4)$: 282-283, 287, 1963.

- FURUKAWA, C. Avaliação da irrigação por pivô-central na região de Rio Verde-GO. Viçosa, 1991. 69p. (M.S. Universidade Federal de Viçosa).
- GARCIA, J.L. Programa nacional de regadios del Brasil.

 (PRONI). ICI, 1988. 167p.
- GILL, A.B. Power plant performance. London, Butterworth, 1984. 638p.
- GILLEY, J.R.; MIELK, L.N.; WILHELM, W.W. An experimental center-pivot irrigation system for reduce energy crop production estudies. Transactions of the ASAE, St. Joseph, 26(5): 1375-9, 1385, 1983.
- HART, W.E. Overhead irrigation pattern parameters.

 Agricultural Engineers, St. Joseph, 42(7): 354-5, 1961.
- HART, W.E. Subsurface distribution of monuniformly applied surface waters. Transactions of the ASAE, St. Joseph 15(4): 656-61, 666, 1972.
- HART, W.E. & REYNOLDS, W.N. Analytical design of sprinkler systems. Transactions of the ASAE, St. Joseph, 8(10): 83-9, 1965.

- HART, W.E.; PERI, G.; SKOGERBOE, G.V. Irrigation performance: an evaluation. Journal of Irrigation and Drainage Division. ASCE, New York, 105(1R3): 275-88, Sept. 1979.
- HEERMANN, D.F. & HEIN, P.R. Performance characteristics of self-propeled center-pivot sprinkler irrigation system.

 Transactions of the ASAE, St. Joseph, 11(1): 11-5, 1968.
- JAMES, L.G. & BLAIR, S.K. Performance of low pressure center-pivot systems. Transations of the ASAE, St. Joseph, 27(6): 1753-7, 1762, 1984.
- JENSEN, M.E. Design and operation of farm irrigation systems. St. Joseph, ASAE, 1983. 839p.
- JENSEN, M.E.; SWARNER, L.R.; PHELAN, J.T. Improving
 irrigation efficiences. In: HAGAN, R.M. Irrigation of
 agriculture lands. St. Joseph, ASAE, 1967. cap.61,
 p.1120-42. (Agronomy, 11).
- KARMELI, D. Estimating sprinkler distribution patterns using linear regression. Transactions of the ASAE, St. Joseph, 21: 682-6, 1978.

- KELLER. J. Sprinkler irrigation. Logan, Utah State University, 1984. 621p.
- KINCAID, D.C. & HEERMANN, D.F. Pressure distribution on a center-pivot sprinkler irrigation systems. **Transactions**of the ASAE, St. Joseph, 13(11): 556-8, 1970.
- LEAMER, R.W. & SHAW, B. A simple apparatus for measuring noncappilary porosity in extensive scale, Journal of American Society of Agronomy, Washington, 33(11): 1003-8, Nov., 1941.
- LINSLEY, R.K. & FRANZINI, J.B. Engenharia de recursos hidricos. São Paulo, McGraw Hill do Brasil, EDUSP, 1978. 768p.
- LOPEZ, E.M. Riego por aspersion. Centro de Treinamento em Irrigação. Petrolina, SUDENE/MINTER-IICA, 1975.
- MERRIAN, J. L. & KELLER, J. Farm irrigation system evaluation; a guide for management. 2.ed. Logan, Utah State University, 1979. 271p.
- MERRIAN, J.L.; KELLER, J.; ALFARO, J. Irrigation; system evaluation and improvement. Logan, Utah State University, 1973. n.p.

- OLITTA, A.F.L. Os métodos de irrigação. São Paulo, Nobel, 1987. 267p.
- 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).
- PERI, G.; HART, W.E.; NORUM, D.J. Optimal irrigation dephts a method of analysis. Journal of the Irrigation and Drainage Division. ASCE, New York, 105(IR4): 341-55, Dec. 1979.
- PERRENS, S.J. Numerical analysis of soil water uniformity under sprinkler irrigation. Journal Agricultural engineering Research, Cambridge, 30: 23-7, 1984.
- RICHARDS, L.A. A pressure-membrane extraction apparatus for soil solution. Soil Science, Baltimore, 51:377-86, Jan.-June, 1941.
- RING, L. & HEERMANN, D.F. Determining center-pivot sprinkler uniformities. Logan, USDA, 1978. n.p. (USDA. Paper, 78-2001).

- ROLLAND, L. Mechanized sprinkler irrigation. Rome, FAO, 1982. 409p. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 35).
- RUSSEL, G.E. Flow through pipes. In: _____ Hydraulics.

 5.ed. New York, Henry Holt, 1942. cap.8, p.180-266.
- SANTOS, N.C. dos. Uniformidade de distribuição e a eficiência potencial de aplicação de água em um sistema de irrigação do tipo pivô-central, em condições de cerrado. Viçosa, 1988. 80p. (M.S. Universidade Federal de Viçosa).
- SCALOPPI, E.J. Exigência de energia para irrigação.

 Irrigação e Tecnologia Moderna, Brasilia, 21: 13-7,

 1985.
- SILVA, W.L.C. Considerações sobre o uso de "sprays" de baixa pressão em pivô-central. Irrigação e Tecnologia Moderna, Brasilia, 39(12): 26-7, 1989.
- SOLOMON, K. Variability of sprinkler coefficient of uniformity test results. Transactions of the ASAE, St. Joseph, 22(5): 1078-80, 1086, 1979.

- SPINK, L.J. Principles and practice of flow meter engineering. 9.ed. Foxboro, The Foxboro Co., 1967. 575p.
- STREETER. V.L. & WYLIE, E.B. Mecânica dos fluidos. 7.ed. São Paulo, McGraw-Hill, 1982. 585p.
- TOMAZELA, C. Desempenho hidráulico de um pivô-central de baixa pressão em terreno com topografia variável.

 Piracicaba, 1991. 98p. (Mestrado Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz / USP).
- TOOYAMANI, K.P.; NORUM, D.I.; DUBETZ, S. Application rates and uniformity under center-pivot sprinkler irrigation systems using spray nozzles. Canadian Agricultural Engineering, Ottawa, 29(2): 149-54, 1987.
- VAN GENUCHTEN, M.Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Science Society of American Journal, Madison, 44(5): 892-8, Sept./Oct. 1980
- WALKER, W.R. Explicit sprinkler irrigation uniformity: efficiency model. Journal of the Irrigation and Drainage Division. ASCE, New York, 105(IR2): 129-36, June 1979.