**DESEMPENHO DE UM SISTEMA PIVÔ CENTRAL COM
DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE EMISSORES, AO LONGO
DO CICLO DE UMA CULTURA DE MILHO (*Zea mays* L.)**

PAULO CÉSAR SILVEIRA PESSOA
Engenheiro Agrônomo

Orientador : Prof. Dr. MARCOS VINÍCIUS FOLEGATTI

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

PIRACICABA
Estado de São Paulo - Brasil
AGOSTO - 1994

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

P475d Pessoa, Paulo César Silveira
Desempenho de um sistema pivô central com diferentes configurações de emissores, ao longo do ciclo de uma cultura de milho (*zea mays L.*). Piracicaba, 1994.
95p.

Diss. (Mestre) - ESALQ
Bibliografia.

1. Irrigação por pivô central - Desempenho 2.
Milho Irrigação I. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba.

CDD 631.7
633.15

**DESEMPENHO DE UM SISTEMA PIVÔ CENTRAL COM
DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE EMISSORES, AO LONGO
DO CICLO DE UMA CULTURA DE MILHO (*Zea mays* L.)**

PAULO CÉSAR SILVEIRA PESSOA

Aprovada em : 07 / 11 / 1994

Comissão julgadora :

Prof. Dr. Marcos Vinícius Folegatti

ESALQ / USP

Prof. Dr. José Antônio Frizzone

ESALQ / USP

Prof. Dr. Antônio Marciano da Silva

ESAL

Prof. Dr. Marcos Vinícius Folegatti

Orientador

- à Deus, que iluminou meus caminhos e me fez acreditar no meu trabalho e que o esforço vale a pena,
- aos meus pais, que me apoiaram,
- aos meus irmãos e irmãs,
- aos meus sobrinhos, André e Adriana,
- à minha namorada Karla Simone,

dedico.

Agradecimentos

- ao DER/ESALQ, pela oportunidade de realização do curso,
- ao meu orientador, Prof. Marcos Vinícius Folegatti, pela amizade, apoio, e principalmente, pela forma liberal como conduziu a orientação,
- aos professores do curso, pelos ensinamentos, dedicação e amizade,
- ao Prof. José Antônio Frizzzone, pela amizade no decorrer do curso e pelas valiosas sugestões durante a execução do trabalho,
- à coordenação do Curso de Pós Graduação, que me deu todas as condições materiais para realização do trabalho experimental,
- à CAPES, pela concessão da bolsa de estudos,
- à todos os funcionários do DER, pela amizade e acolhida (Hélio, Gilmar, Márcio, Renato, Zezinho, Roberta Helena e Marinez),
- aos que me auxiliaram na execução do trabalho de campo (funcionários Gilmar, Renato, Márcio e colegas Fernando e Selma), sem a ajuda dos quais seria impossível a realização deste,
- aos colegas de curso, pela convivência e amizade,
- à todas as pessoas com quem convivi durante a realização do curso e que me transmitiram coisas boas,
- às empresas CARBORUNDUM e FABRIMAR, pela doação de material utilizado no trabalho,
- à todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

Página

LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS	ix
RESUMO	x
SUMMARY	xii
1 INTRODUÇÃO	1
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 - Aspectos gerais	4
2.2 - Projeto do pivô central	5
2.3 - Configuração de emissores	8
2.4 - Utilização de energia	12
2.5 - Uniformidade de aplicação de água	14
2.6 - Desempenho do equipamento	15
2.7 - Problemas de manejo de solo e água	18
2.8 - Sistemas de cultivo	19
2.9 - Escoamento superficial	20
2.10 - Infiltração	23
2.11 - Presença do dossel vegetativo	26
3 - METODOLOGIA	28
3.1 - Caracterização da área e do sistema pivô central	28
3.2 - Dispositivos de coleta de lâmina aplicada e escoamento superficial	31

3.3 - Tratamento dos dados	36
3.4 - Caracterização dos emissores utilizados	37
3.5 - Teste de uniformidade de aplicação	39
3.6 - Condução da cultura irrigada	39
3.7 - Lâminas de irrigação e umidade do solo	40
3.8 - Execução dos ensaios de campo	40
3.9 - Determinação da curva de infiltração de água no solo	42
4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
4.1 - Uniformidade de aplicação	45
4.2 - Taxa de aplicação e escoamento ao longo do ciclo da cultura	47
4.3 - Lâminas de aplicação, escoamento e retenção foliar	57
4.4 - Determinação da curva de infiltração de água no solo	64
4.5 - Consumo de Energia	66
5 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	71
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73
APÊNDICE 1	82
APÊNDICE 2	93

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 01 - "Lay out" da localização da área experimental	30
Figura 02 - Curva de retenção de água do solo da área experimental	30
Figura 03 - Esquema construtivo das calhas coletoras de escoamento	32
Figura 04 - Esquema da instalação das calhas no campo e disposição das linhas de coletores e de milho	34
Figura 05 - Esquema da disposição das linhas de coletores em relação às linhas de plantio do milho	35
Figura 06 - Padrão molhado e diâmetro de alcance em função do tipo de emissor e de montagem	44
Figura 07 - Perfil de distribuição de água do pivô simulado	47
Figura 08 - Exemplos de curvas de valores acumulados de aplicação e escoamento, antes e após a utilização da média móvel	48
Figura 09 - Taxa e tempo de aplicação teóricos, segundo a equação (1), em função da lâmina aplicada e emissor utilizado	49
Figura 10 - Curvas de taxa de aplicação e de escoamento para milho 1 e lâmina 6 mm	51

Figura 11 -	Curvas de taxa de aplicação e de escoamento para milho 1 e lâmina 25 mm	52
Figura 12 -	Curvas de taxa de aplicação e de escoamento para milho 2 e lâmina 6 mm	53
Figura 13 -	Curvas de taxa de aplicação e de escoamento para milho 2 e lâmina 25 mm	55
Figura 14 -	Curvas de taxa de aplicação e de escoamento para milho 3 e lâmina 6 mm	56
Figura 15 -	Taxas de aplicação média e máxima determinadas nos ensaios	58
Figura 16 -	Valores de escoamento determinados nos ensaios	60
Figura 17 -	Valores de retenção foliar determinadas nos ensaios	61
Figura 18 -	Perdas somadas de escoamento e retenção foliar determinadas nos ensaios	63
Figura 19 -	Curvas de aplicação e escoamento acumulados dos testes de infiltração, antes e após a aplicação da média móvel	65
Figura 20 -	Curvas de taxa de aplicação, escoamento e infiltração, em função da umidade do solo	66
Figura 21 -	Necessidade de pressão relativa utilizando os emissores de baixa pressão e variando a declividade do terreno	69

LISTA DE TABELAS

Página

Tabela 01 - Tempo de aplicação de água para diferentes posições ao longo da lateral, configurações de emissores e velocidades de rotação de um pivô central	8
Tabela 02 - Faixas normais de pressão de operação e diâmetro de alcance associado para diferentes configurações de emissores mais utilizadas em pivô central	11
Tabela 03 - Pressão de operação no ponto do pivô e taxa máxima de aplicação para cinco tipos de emissores utilizados em pivô central	13
Tabela 04 - Posição em relação ao centro do pivô, vazão requerida e diâmetro dos bocais utilizados na simulação do pivô de 500 m de raio, na extremidade da lateral	38
Tabela 05 - Valores de lâmina d'água acumulados durante a execução do experimento, proveniente de chuva (C) ou irrigação (I)	43
Tabela 06 - Valores de intervalos de tempo utilizados nos ensaios, em função do emissor e lâmina aplicada	44
Tabela 07 - Caracterização das plantas de milho na data dos ensaios	45
Tabela 08 - Resultados do ensaio de uniformidade do pivô simulado, utilizando as três configurações de emissores	45
Tabela 09 - Dados de lâminas de aplicação, escoamento e retenção foliar obtidos nos ensaios	57

**DESEMPENHO DE UM SISTEMA PIVÔ CENTRAL COM DIFERENTES
CONFIGURAÇÕES DE EMISSORES AO LONGO DO CICLO DE UMA
CULTURA DE MILHO (*Zea mays*, L.)**

Autor : PAULO CÉSAR SILVEIRA PESSOA
Orientador : PROF. Dr. MARCOS VINICIUS FOLEGATTI

RESUMO

A seleção da configuração de emissores é a principal variável do projetista no dimensionamento de um sistema pivô central. A utilização de emissores de baixa pressão tem potencial para economizar energia, mas tende a agravar os problemas de manejo de água e solo, que podem anular os benefícios da economia energética. A presença da cultura e a dinâmica do meio agrícola são fatores que devem ser considerados num estudo da performance de um sistema de irrigação.

Estudou-se o desempenho de um sistema pivô central de 166 m de raio, modificado na extremidade da lateral para simular um equipamento de 500 m, em três tipos de configuração de emissores (aspersor de impacto de média pressão, sprays fixo de baixa pressão em pendural e spray rotativo de baixa pressão) em três fases do ciclo da cultura de milho (*Zea mays*, L.): estabelecimento, vegetação e granação, utilizando duas lâminas por irrigação (25 e 6 mm). Os aspectos abordados foram o escoamento superficial, taxa de aplicação, consumo de energia, eficiência e uniformidade de aplicação. Foi desenvolvida uma metodologia para estimativa da curva de infiltração de água no solo sob irrigação de pivô central, baseada na determinação da taxa de aplicação e de escoamento.

Os resultados mostram que o escoamento e a taxa de aplicação aumentaram com a utilização de emissores de baixa pressão, sendo maiores para o spray

fixo. O escoamento superficial, o perfil da taxa de aplicação e a eficiência de aplicação dos emissores foram alterados pela presença do dossel vegetativo. A retenção foliar variou para cada emissor e pode ser significativa quando se utilizam lâminas pequenas por irrigação. Estes resultados mostram que a presença da cultura deve ser considerada no desempenho do sistema de irrigação. A redução do consumo de energia pela utilização de emissores de baixa pressão pode chegar a 19 % e será mais significativa quanto maior a relação entre a pressão no ponto do pivô e a altura manométrica total. Os emissores de baixa pressão conseguiram uniformidade comparável ou superior aos de média pressão.

PERFORMANCE OF A CENTER PIVOT USING DIFFERENT SPRINKLER PACKAGES ON CORN CROP (*Zea mays* L.)

Author : PAULO CÉSAR SILVEIRA PESSOA
Adviser : PROF. Dr. MARCOS VINICIUS FOLEGATTI

SUMMARY

The sprinkler package selection is the main variable on center pivot systems design. The low pressure spray nozzles have proven to be most cost effective, but on the other hand the problem with water management can annul the benefit of saving energy. The dynamics of the irrigated crop, irrigation system and the soil have to be considered on irrigation system performance studies.

In this work was studied the performance of a center pivot of 166 m lenght, simulating a 500 m length center pivot. Three different sprinkler packages were used : medium pressure impact sprinklers, low pressure fixed sprays on drop tubes and the low pressure rotator sprays, during the corn crop development (emergence, effective full cover and maturation). The water depth of 25 and 6 mm were used. The main subjects studied were run off, application rate, energy input and efficiency and uniformity application. It was developed a methodology to measure the water infiltration rate in the soil irrigated by the center pivot, considering the application and runoff rate .

The run off and application rate increased with low pressure sprays and was higher when fixed sprays were used. The crop canopy affected the run off and the water application rate. The crop leaves retention varied for each sprinkler package and was higher for low water depth applied. Considering the results it is possible to conclude that the plant canopy has to be considered on irrigation system performance studies. The energy saved by low pressure sprinkler package can be 19 % and will be higher as the

relation of the pivot pressure and pressure head increases. Uniformity coefficient obtained with low pressure packages were comparable or higher than the medium pressure package.

1 - INTRODUÇÃO

O principal desafio da engenharia de irrigação é desenvolver técnicas e métodos para efetivar práticas que ao mesmo tempo, aumentem a produtividade, preservem o meio ambiente e economizem energia.

A invenção e o aperfeiçoamento do sistema pivô central foi um significativo avanço da agricultura irrigada no século XX. O equipamento teve grande aceitação pelos agricultores, devido ao seu alto padrão de desempenho e facilidade de operação. Entretanto, um equipamento de irrigação, mesmo sofisticado, só terá um desempenho satisfatório se estiver adequadamente dimensionado e manejado para as condições da área onde está operando.

No Brasil, na maioria das vezes, estes equipamentos são dimensionados sem se levar em conta as características do meio agrícola onde serão instalados, uma vez que, por se tratar de tecnologia importada, são comercializados como "pacotes fechados" pelas indústrias nacionais, sem os devidos ajustes ao local onde irão operar.

A principal variável que o projetista dispõe no dimensionamento do equipamento é a configuração de emissores (tipo, espaçamento, diâmetro de bocais e montagem), devendo fazer uma adequada combinação de parâmetros para que o pivô central tenha um desempenho satisfatório e preencha as expectativas do agricultor quando compra um equipamento sofisticado e caro.

Os objetivos da adequada seleção da configuração de emissores e o manejo correto do equipamento são conseguir uma boa uniformidade da irrigação, reduzir as perdas de água (escoamento superficial, deriva pelo vento, evaporação), aumentar a produtividade das culturas irrigadas, economizar energia, preservar o solo e o meio ambiente.

Devido à escassez e rápida elevação de custos da energia, procura-se racionalizar o seu uso em todas as atividades produtivas, principalmente naquelas onde ela representa uma parcela significativa do custo total da produção, como é o caso da irrigação. Nesta atividade, o consumo de energia está diretamente relacionado à pressão de operação dos equipamentos. Reduzir a necessidade de energia para pressurizar os sistemas de irrigação pivô central, e ao mesmo tempo, manter a eficiência e uniformidade de aplicação é de grande interesse para a agricultura irrigada.

O desenvolvimento de emissores de baixa pressão e sua utilização em sistemas pivô central provocaram mudanças nestes equipamentos. A principal vantagem destes dispositivos consiste no potencial para economizar energia, através da redução da pressão necessária no ponto do pivô. Entretanto, sua utilização tende a agravar problemas de manejo de solo e água, como aumento do escoamento superficial e das perdas pelo vento e por evaporação e redução da uniformidade, que muitas vezes podem anular os benefícios da economia energética.

No estudo do desempenho de um sistema pivô central, a presença da cultura e a dinâmica do meio agrícola devem ser consideradas, porque a condição de solo nu ocorre apenas nas irrigações iniciais e o grau de cobertura vegetal, condições do solo e características da planta variam ao longo do ciclo de uma cultura irrigada.

A capacidade de infiltração do solo é um importante parâmetro no projeto e manejo de um sistema pivô central. Para uma estimativa confiável, deve-se utilizar uma metodologia que represente as condições de irrigação típicas deste equipamento, ou seja,

taxa de aplicação variável e selamento superficial do solo. Atualmente, não existe uma metodologia definitiva e as existentes utilizam equipamentos caros e pouco práticos.

Neste trabalho objetivou-se estudar o desempenho de um sistema pivô central equipado com diferentes configurações de emissores, durante o ciclo de uma cultura de milho conduzida segundo as práticas adotadas em sistemas de produção comerciais irrigados. Os aspectos estudados foram a ocorrência de escoamento superficial, taxa de aplicação, consumo de energia e eficiência e uniformidade de aplicação. Adicionalmente, foi desenvolvida uma metodologia que utiliza equipamentos simples para estimativa da curva de infiltração de água no solo sob irrigação de pivô central.

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - Aspectos gerais

A mecanização das operações agrícolas, aliada ao aumento dos custos e escassez da mão de obra para deslocamento das tubulações e aspersores, resultaram no incremento da utilização de sistemas de irrigação mecanizados. Nestes sistemas, as tubulações e os aspersores permanecem continuamente conectados à adutora, enquanto realizam movimento contínuo e distribuição simultânea de água. Os três principais tipos de aspersão mecanizada são o autopropelido, a lateral com deslocamento linear (lateral móvel) ou radial (pivô central) .

O sistema pivô central foi inventado no Colorado, Estados Unidos, em 1952. Seu uso expandiu-se consideravelmente naquele país nas décadas de 1960 e 1970 e posteriormente em outros países, principalmente no Oriente Médio, Líbia, França, Hungria e Brasil. A área irrigada por este sistema no mundo, segundo KELLER & BLIESNER (1990), ultrapassa os 8 milhões de hectares, num total aproximado de 160.000 equipamentos. No Brasil, segundo a ABIMAQ/SINDIMAQ, em 1991 existiam aproximadamente 3.800 equipamentos instalados, irrigando uma área estimada de 275.000 ha.

O pivô central constitui-se num sistema mecanizado e automatizado de irrigação, sendo formado por uma linha lateral de emissores sustentada por torres

triangulares metálicas sobre rodas, que são movimentadas por energia elétrica ou hidráulica, permitindo o movimento rotacional em torno do ponto do pivô.

Como a lateral se movimenta em círculo, é necessário que a taxa de aplicação aumente ao longo do raio, para proporcionar uma distribuição uniforme de água. Considerando-se o escoamento superficial, pode-se dizer que o pivô central é mais adaptado aos solos de infiltração média para alta. A velocidade de deslocamento pode ser ajustada dentro de certos limites, proporcionando um certo controle da lâmina aplicada. A principal vantagem deste sistema refere-se à economia de mão de obra na irrigação de áreas extensas, além da economia de água pela alta eficiência e uniformidade do sistema, que chegam a atingir valores superiores a 90% . A principal desvantagem constitui-se no alto custo do equipamento, devido à sua sofisticação, além do fato de somente irrigar áreas circulares. Em campos retangulares, os cantos não serão utilizados, provocando uma perda de área de aproximadamente 20% , exceto no sistema "corner" pivô (OLITTA, 1987).

2.2 - Projeto do pivô central

A variável mais importante no projeto de distribuição de água do pivô central é a configuração de emissores (tipo, espaçamento, diâmetro de bocais e montagem). O primeiro passo na seleção da configuração de emissores consiste na determinação da lâmina necessária no período de máximo consumo pela cultura; também devem ser determinados a velocidade de infiltração de água no solo, a capacidade do solo de armazenamento superficial de água, a intensidade de aplicação, o consumo de energia, as perdas pelo vento e por evaporação, a susceptibilidade do solo ao selamento superficial (USDA, 1983).

De acordo com EVANS (1980), o principal objetivo do dimensionamento do equipamento pivô central é encontrar a mínima velocidade de rotação e a menor vazão, sem provocar escoamento superficial, e ainda satisfazer as necessidades de água das culturas a serem irrigadas.

HERMANN & HEIN (1968), seguindo as normas da ASAE, afirmam que o mínimo requerido para o projeto e instalação de um equipamento de aspersão é que a lâmina aplicada tenha distribuição uniforme e a intensidade de aplicação não cause escoamento superficial durante a operação normal do sistema.

De acordo com DILLON *et al.* (1972), por tradição, os sistemas de irrigação por aspersão são projetados de maneira que a intensidade de aplicação média não exceda a velocidade de infiltração básica do solo. Sistemas de aspersão móveis aplicam água numa taxa que varia no tempo e no espaço, e é geralmente muito mais alta que a dos sistemas estacionários (HERMANN & KHOL, 1983). A extremidade da lateral de um sistema pivô central, em geral, aplica água numa taxa acima da curva de infiltração da maioria dos solos, porém apenas por um curto período de tempo, como salientam DILLON *et al.* (1972).

Segundo HERMANN & HEIN (1968), as características geométricas do pivô central determinam que a taxa de aplicação deve aumentar com a distância ao ponto do pivô, para se conseguir uma lâmina de irrigação uniforme. Isto porque a vazão e a velocidade de deslocamento do emissor deve aumentar na mesma proporção do aumento da área irrigada.

A taxa de aplicação depende do comprimento e vazão do equipamento, raio de alcance e espaçamento dos emissores, diâmetro dos bocais e pressão de operação do sistema. Assumindo um perfil elíptico de distribuição de água pelo emissor, pode ser calculada conforme GILLEY (1984):

$$TA(t) = \frac{T_m}{t_m} (2tt_m - t^2)^{1/2} \dots\dots\dots(1)$$

em que:

TA (t) - taxa de aplicação em algum ponto no tempo t (mm/h)

T_m - taxa de aplicação máxima (mm/h)

t_m - tempo para ocorrer a taxa de aplicação máxima (h)

t - tempo desde o começo da aplicação (h)

As taxas média e máxima em algum ponto sob a lateral podem ser calculadas conforme KELLER & BLIESNER (1990):

$$TA_m = \frac{2\pi r_i L_b}{We_i t_r} \dots\dots\dots(2)$$

$$T_m = \frac{4}{\pi} TA_m \dots\dots\dots(3)$$

em que :

TA_m - taxa de aplicação média em algum ponto durante a irrigação (mm/h)

r_i - distância do ponto até o início da lateral (m)

We_i - diâmetro de alcance do emissor utilizado (m)

L_b - lâmina bruta aplicada por revolução (mm)

t_r - tempo para uma revolução (h)

DILLON *et al.* (1972) desenvolveram um critério de projeto de sistema pivô central que considera as características de infiltração e armazenamento superficial do solo. A velocidade de deslocamento do equipamento (e portanto, lâmina aplicada) é ajustada em função do perfil elíptico de aplicação do emissor utilizado, para evitar escoamento superficial. MOHAMOUD *et al.* (1992) desenvolveram um critério de dimensionamento da configuração de emissores, através da determinação da pressão de operação mínima, diâmetro do bocal e diâmetro molhado do último emissor da lateral do pivô, para evitar o escoamento superficial. O critério considera modificações nas condições da superfície do solo, provocadas por sistemas de cultivo.

De acordo com ADDINK *et al.* (1983), a taxa de aplicação varia ao longo da lateral, devido ao tempo em que a água é aplicada. O tipo e espaçamento de emissores, a posição na lateral e a velocidade de rotação do equipamento determinam o tempo de aplicação necessário para se conseguir uma lâmina uniforme, como mostrado na Tabela 1.

Tabela 1 - Tempo de aplicação de água para diferentes posições ao longo da lateral, configurações de emissores e velocidades de rotação de um pivô central.

Tempo de Revolução (horas)	Distância ao Longo da Lateral do Pivô (metros)											
	50,3			100,6			201,2			402,3		
	Diâmetro Molhado do Emissor (metros)											
	9,1 ^a	27,4 ^b	24,4 ^c	9,1 ^a	27,4 ^b	27,4 ^c	9,1 ^a	27,4 ^b	39,6 ^c	9,1 ^a	27,4 ^b	53,3 ^c
	Tempo de Aplicação de Água (minutos)											
6	10	34	28	5	16	16	3	8	12	1	4	8
12	21	63	56	10	31	31	5	16	22	3	8	16
24	42	125	111	21	63	63	10	31	45	5	16	30
48	83	250	222	42	125	125	21	63	91	10	31	61
60	104	313	278	52	156	156	26	78	113	13	39	76

Fonte : ADDINK et al (1983)

^a spray

^b aspersor de impacto com espaçamento variável

^c aspersor de impacto com espaçamento constante

2.3 - Configuração de emissores

Segundo KELLER & BLIESNER (1990), a maior consideração quando se projeta a lateral de um pivô é a seleção da configuração de emissores; as principais variáveis são o tipo e o espaçamento entre emissores. As três mais típicas configurações de espaçamento utilizadas são :

- espaçamento uniforme, com vazão variável por emissor e aumentando proporcionalmente à distância do centro do pivô
- espaçamento semi uniforme, com vazão variável por emissor; os menores espaçamentos ocorrem no final da lateral.

- espaçamento variável, com vazão constante por emissor; o espaçamento ao longo da lateral é inversamente proporcional à distância do centro do pivô.

O espaçamento semi uniforme é o mais utilizado, para evitar a necessidade de grandes bocais na extremidade final da lateral. Por facilidade de fabricação, a tubulação da lateral é feita com espaçamento constante entre saídas, e o espaçamento semi uniforme entre emissores é conseguido vedando-se algumas saídas com "plugs".

De acordo com TEIXEIRA (1992), os emissores mais comumente utilizados em equipamentos pivô central estão divididos em duas classes principais: aspersores de impacto (com pressão superior 250 KPa) e difusores ou "sprays" (pressão inferior a 175 KPa), onde a água é aspergida continuamente em todas as direções radiais. Os "sprays" podem ser fixos ou giratórios.

A elevação dos custos com o bombeamento de água para irrigação e a previsão de escassez e racionamento de energia no futuro resultaram no desenvolvimento e utilização de emissores de baixa pressão. O emprego desses equipamentos, que podem operar a pressões inferiores a 150 KPa, fez com que várias modificações nos equipamentos tipo pivô central se fizessem necessárias. A utilização destes emissores necessita em torno de 60 % da energia requerida por pivôs equipados com aspersores convencionais de impacto, aplicando a mesma lâmina de água, com comparável uniformidade. Estes emissores produzem gotas consideravelmente menores que os aspersores convencionais, tendo assim uma menor energia cinética, provocando menor efeito destrutivo sobre a estrutura da superfície do solo. Por outro lado, possuem uma área molhada menor, estando associados a taxas de aplicação maiores. Por isso, a utilização desses emissores em solos com baixa capacidade de infiltração pode neutralizar a vantagem de se ter gotas menores (SILVA, 1989).

Segundo JAMES & BLAIR (1984), a utilização de emissores de baixa pressão e "sprays" tem resultado em severas modificações nos sistemas pivô central. A menor área molhada destes emissores requer menor espaçamento entre eles. Os "sprays" fixos podem ser montados "on top" na lateral ou em pendurais que podem ser estendidos abaixo da tubulação até poucos centímetros da cultura, para minimizar o efeito do vento. Estes pendurais devem ser montados alternadamente de cada lado da lateral, para aumentar a área molhada e diminuir a taxa de aplicação. Isto também pode ser conseguido pela montagem em "spray booms", que são tubos contendo vários "sprays" montados horizontalmente abaixo da lateral, em ângulo de 60° a 70° com o alinhamento da lateral, para aumentar a área molhada e a superposição. O spray fixo consiste de um bocal e uma placa defletora, que distribui o jato em círculo completo ou parcial. O bocal controla a vazão do "spray". A placa defletora pode ter a superfície lisa ou estriada, afetando o diâmetro de gotas; a forma pode ser côncava, convexa ou plana, afetando o alcance de gotas. A placa lisa produz gotas pequenas, enquanto a estriada produz gotas maiores. Na posição vertical, "sprays" com placa convexa produzem normalmente a maior área molhada, a placa côncava a menor e a plana é intermediária. Estes emissores operam normalmente em 140 KPa. Os aspersores de impacto de baixa pressão produzem gotas menores que os aspersores tradicionais que operam em 350 KPa, quando ambos operam em baixas pressões. Isto é conseguido pela passagem da água através de um ou mais bocais especiais não circulares que espalham o jato em forma de leque compacto e conseguem uma boa distribuição. Estes aspersores operam em 240 KPa, com diâmetro de alcance de 20 a 25 m.

Os fabricantes de aspersores e pivôs centrais tem desenvolvido novos tipos de emissores e equipamentos, muitos dos quais projetados para aplicar água desde o topo da lateral do pivô até próximo do dossel da cultura. Alguns destes equipamentos operam em baixa pressão, apresentando a placa difusora giratória ou vibratória, tendo um

diâmetro de alcance maior que os dispositivos com placa fixa (MARTIN *et al.*, 1993). Os "sprays" giratórios começaram a ser utilizados a partir de 1989, apresentando a placa difusora rotativa e estriada (4 ou 6 estrias). Conseguem com isso um aumento no raio de alcance e na superposição. Possuem um dispositivo de silicone fluido para controlar a velocidade de giro da placa, que pode ser rápida ou normal. Os modelos atualmente disponíveis operam com pressão mínima de 70 Kpa para o modelo "rotator" e 42 Kpa para o modelo "spinner". Podem ser montados "on top" diretamente na tubulação da lateral ou em pendural (NELSON IRRIGATION, 1992). Outros dispositivos que estão sendo utilizados são o LEPA (aplicação localizada de baixa energia) e LEDIC (aplicação de baixa energia abaixo do dossel vegetativo) (MARTIN *et al.*, 1993). As características de pressão e alcance das principais configurações de emissores utilizadas em pivô central são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Faixas normais de pressão de operação e diâmetro de alcance associado para diferentes configurações de emissores mais utilizadas em pivô central.

Tipo de Emissor e Espacamento	Pressão ^a (KPa)	Diâmetro de Alcance (m)
Spray de Baixa Pressão Fixo		
1 - em pendural	70 - 205	3 - 9
2 - na lateral "on top"	70 - 205	6 - 14
3 - em "boom" curto	70 - 140	12 - 18
4 - em "boom" longo	105 - 170	20 - 26
Spray de Baixa Pressão Giratório		
5 - "rotator" na lateral "on top"	70 - 345	15 - 21
6 - "rotator" em pendural	70 - 345	12 - 18
7 - "spinner" em pendural	40 - 140	10 - 14
Impacto de Baixa Pressão		
8 - espaçamento variável	140 - 240	18 - 23
9 - espaçamento semi-uniforme	205 - 275	21 - 24
Impacto de Média Pressão		
9 - espaçamento variável	275 - 345	27 - 34
10 - espaçamento semi-uniforme	275 - 380	30 - 37
Impacto de Alta Pressão		
11 - espaçamento uniforme	380 - 450	40 - 50

Adaptado de KELLER & BLIESNER (1990) e NELSON IRRIGATION (1992)

^a valores arredondados para múltiplos de 5 KPa

2.4 - Utilização de energia

Grande quantidade de energia é necessária para a operação de um pivô central de alta pressão. Splinter¹, citado por SCALOPPI & ALLEN (1993), declarou que a história pode recordar o desenvolvimento do pivô central como um dos mais significantes avanços na agricultura no século XX, ou como o maior desastre, dependendo do custo da energia em relação ao valor da cultura sob o sistema.

Segundo GILLEY & WATTS (1977), GILLEY & SUPALLA (1983), e GILLEY *et al.* (1990), a redução da pressão de operação é a maneira mais fácil e econômica de reduzir o consumo de energia dos sistemas pivô central. De acordo com GILLEY (1984), os pivôs centrais de baixa pressão estão se tornando comuns e muitos sistemas de alta pressão estão sendo redimensionados para operar em pressão reduzida. Utilizando aspersores de alta pressão, uma pressão de 410 - 590 KPa é requerida no ponto do pivô, enquanto que sistemas de baixa pressão requerem 130 - 200 KPa, resultando em considerável economia de energia, que pode ser de 20 a 40% (GILLEY *et al.*, 1983).

VON BERNUTH & GILLEY (1985) estimam que nos Estados Unidos, cerca de 90% dos equipamentos instalados em 1984 foram projetados para trabalhar a pressões inferiores a 240 KPa contra 80% projetados para pressões superiores a 450 KPa nos anos anteriores.

ROLLAND (1982) calcula que para um pivô central com vazão de 204 m³ /h e uma perda de carga mais desnível geométrico de 61 mca (598 KPa), a utilização de aspersores de alta pressão exige uma altura manométrica total de 117 mca (1148 KPa), e uma potência de 87,5 cv do conjunto motobomba. Com a utilização de "sprays", a altura manométrica total passa para 78,7 mca (772 KPa) e a potência necessária da motobomba diminui para 58,7 cv.

¹ SPLINTER, W. Address to a Meeting of the Society of Automotive Engineers. *Irrigation Journal*. 29 (5), p 42. 1979.

A Tabela 3 mostra a influência do tipo de emissor na pressão no ponto do pivô e na taxa de aplicação máxima no final da lateral, considerando um sistema capaz de irrigar 52,6 ha (410 m de comprimento) e vazão de 0,10 a 0,15 l/s/m de comprimento da lateral (148 - 221 m³/h).

Tabela 3 - Pressão aproximada no ponto do pivô e taxa máxima de aplicação para cinco tipos de emissores utilizados em pivô central .

Tipo de Emissor	Pressão Aproximada no Ponto do Pivô (KPa)	Taxa Máxima de Aplicação (mm/h)
Impacto de alta pressão	450 - 520	29
Impacto de média pressão	275 - 350	41
Impacto de baixa pressão	170 - 240	57
Spray 360°	170 - 240	115
Spray 180°	170 - 240	191

Fonte : GILLEY (1984)

A utilização de emissores de baixa pressão pode ser acompanhada das seguintes desvantagens:

- redução da área molhada, provocando aumento na taxa de aplicação, predispondo à ocorrência de escoamento superficial (VON BERNUTH & GILLEY, 1983; LONGLEY *et al.*, 1983; GILLEY *et al.*, 1983; SILVA, 1989)
- redução da uniformidade de aplicação de água devido à diminuição do raio de alcance e portanto, reduzindo a superposição (VON BERNUTH & GILLEY, 1983; SILVA, 1989)
- maior sensibilidade às variações de pressão em terrenos declivosos (FVANS, 1980; JAMES *et al.*, 1982; VON BERNUTH & GILLEY, 1983); sendo necessário reguladores de pressão para uniformizar a vazão.
- aumento do tamanho de gotas, devido ao decréscimo na pressão e aumento do diâmetro dos bocais (VON BERNUTH & GILLEY, 1983); isto exige a utilização de placas ou bocais difusores, para fracionamento das gotas.

- alteração do padrão triangular de distribuição por formas que acarretam taxas mais elevadas próximas à extremidade do jato, além de choque entre gotas de emissores adjacentes (VON BERNUTH & GILLEY, 1983; SILVA, 1989)
- aumento da sensibilidade às perdas pelo vento e evaporação (SILVA, 1989; KELLER & BLIESNER, 1990)
- necessidade de instalação de dispositivos para minimizar os problemas citados, elevando os custos (VON BERNUTH & GILLEY, 1983); estes dispositivos são os reguladores de pressão, os diferentes modelos de placa difusora, os "sprays" giratórios e o "spray boom".
- necessidade de instalação de bomba "booster" quando se utiliza canhão final, para elevar a pressão no final da lateral (GILLEY & WATTS, 1977; GILLEY & SUPALLA, 1983; GILLEY *et al.*, 1990).

2.5 - Uniformidade de aplicação de água

Segundo KINCAID *et al.* (1969), o sistema pivô central é capaz de aplicar água com alta uniformidade, utilizando-se bocais de tamanho adequado e operando na pressão recomendada. A limitação na disponibilidade de diâmetros de bocais pode limitar a uniformidade de alguns equipamentos (HEERMAN *et al.*, 1990).

De acordo com GILLEY & MIELKE (1980) e EVANS (1980), a alta uniformidade conseguida por emissores de alta pressão é devida ao alto grau de sobreposição; em emissores de baixa pressão, o reduzido raio de alcance reduz a sobreposição e cuidados especiais devem ser tomados na seleção do tamanho do bocal e espaçamento, para se conseguir uniformidades aceitáveis. Tooyamani *et al.*¹, citados por

¹ TOOYAMANI, K.P.; NORUM, D.I.; DUBETS, S. Application Rates and Uniformity under Center Pivot Sprinkler Irrigation Systems Using Spray Nozzles. *Canadian Agricultural Engineering*. 29: p 149. 1987

REZENDE (1992), após analisarem 8 sistemas pivô central de baixa pressão, concluíram que é possível obter uma alta uniformidade de aplicação, desde que os bocais sejam dimensionados e espaçados adequadamente.

GILLEY *et al.* (1983), utilizando um pivô central modificado para utilizar diferentes tipos de emissores (aspersor de impacto de alta e baixa pressão e "spray") concluíram que o movimento descontínuo das torres é um fator que afeta a uniformidade de água em sistemas de baixa pressão. O conceito de uniformidade circular pode ser importante em sistemas que utilizam "sprays" e aplicam pequenas lâminas por irrigação. A uniformidade radial não foi significativamente diferente para os emissores estudados.

Deve-se fazer uma adequada combinação de parâmetros (modo de montagem, modelo de placa difusora, tipo de "spray") para não ocorrer problemas de recobrimento, colisão entre gotas e instabilidade de aplicação devido às oscilações causadas pelo vento e pelo próprio movimento do pivô (SILVA, 1989)

REZENDE (1992), estudando a uniformidade de aplicação de um pivô central equipado com emissores tipo spray, operando em um solo tipo Terra Roxa Estruturada, concluiu que a redistribuição da água no perfil do solo deve ser considerada na análise da uniformidade de aplicação de água, que abaixo da superfície do solo depende pouco da uniformidade acima do solo, mesmo no caso onde acima do solo a uniformidade foi baixa.

2.6 - Desempenho do Equipamento

COTRIM (1988), analisando o desempenho de pivôs centrais de baixa pressão e comparando com os resultados obtidos por BRIDI (1984) em pivôs de alta pressão, concluiu que os valores de CUC (Coeficiente de Uniformidade de Christiansen)

foram muito próximos, enquanto a precipitação instantânea foi muito maior nos pivôs equipados com "sprays". Não houve diferença de pressão no ponto do pivô dos sistemas de alta e baixa pressão, e o autor concluiu que não estaria havendo diferença no consumo de energia para os pivôs estudados. Esta contradição pode ser explicada pela maior vazão por hectare irrigado nos equipamentos de baixa pressão, que segundo o autor, poderiam ter a pressão reduzida sem prejuízo de desempenho.

JAMES & BLAIR (1984), utilizando um modelo computacional para simular a operação de sistemas pivô central de baixa e alta pressão em diferentes topografias, concluíram que os sistemas com aspersores de impacto de baixa pressão e "sprays" consumiram respectivamente, 82 e 68 % da energia usado pelo sistema de aspersores convencionais de alta pressão. Todos os sistemas apresentaram CUC acima de 90 %. Sistemas de baixa pressão apresentaram taxas de aplicação média e máxima acima de 50 e 100 mm/h, respectivamente, enquanto o sistema de alta pressão apresentou taxas média e máxima abaixo de 20 e 50 mm/h, respectivamente.

TEIXEIRA (1992), estudando o efeito de diferentes tipos de emissores na performance de um pivô central de 166 m de raio, concluiu que o diâmetro molhado dos emissores tipo "rotator" foi superior ao do "spray" fixo para uma mesma vazão (12,1 e 8,5 m no início e 18,9 e 12,0 m no final da lateral), resultando numa taxa de aplicação menor (8 e 18 mm/h no início e 22 e 50 mm/h no final da lateral). Estudando também o modo de instalação do emissor, concluiu que a uniformidade de irrigação e a perda pelo vento diminuíram e a taxa de aplicação aumentou à medida que se aproximou os emissores do nível do solo através de pendurais. Para a condição estudada, recomendou a instalação dos emissores a 2,0 m do solo.

ABO-GHOBAR (1992) estudou as perdas por evaporação sob condições de clima desértico em três pivôs de baixa pressão, variando a altura do emissor; as perdas

foram de 15,6, 21,2 e 35,8 % para as alturas de respectivamente, 1,25, 1,75 e 2,50 m do solo.

O efeito de diferentes configurações de emissores na produção de culturas irrigadas tem sido estudado por vários autores. WILHELM *et al.* (1985) não encontraram diferenças na produção de milho durante quatro anos sucessivos de cultivo, para aspersores de impacto de alta e baixa pressão e "spray". GILLEY *et al.* (1986) não encontraram diferenças no desenvolvimento radicular e na produção de milho, utilizando os mesmos tipos de emissores. DEBOER *et al.* (1992) utilizaram aspersores de impacto de alta e média pressão e também não encontraram diferenças significativas na produção de milho. Entretanto, UNDERSANDER *et al.* (1985), estudando o desempenho de aspersores de alta pressão e "sprays", associado com 3 sistemas de cultivo do solo, concluíram que não houve diferença significativa entre as perdas por evaporação para os dois tipos de emissores. Não houve diferença de produção da cultura do sorgo, enquanto o milho produziu significativamente mais sob o aspersor de alta pressão. Os autores atribuíram esta diferença à sensibilidade do milho ao selamento superficial. O escoamento superficial foi maior no sistema de baixa pressão, sendo reduzido pelo cultivo mínimo e subsolagem e eliminado pela construção de diques entre as linhas de plantio.

VON BERNUTH & GILLEY (1985) desenvolveram um modelo para avaliar diferentes configurações de emissores operando em diferentes tipos de solos, considerando diferentes valores de armazenamento superficial. O efeito na redução da infiltração pelo impacto da gota d'água na superfície do solo foi estudado para cada configuração de emissores, considerando o tamanho e velocidade de gotas e a textura do solo. Um estudo econômico de cada tipo de emissor foi apresentado, em função do volume de escoamento superficial e consumo de energia. Concluíram que a escolha deve ser feita em função da vazão do equipamento, capacidade de armazenamento superficial e tipo de solo, em ordem decrescente de importância. Os sistemas equipados com "spray"

foram os mais recomendáveis na maioria das situações, principalmente em solos arenosos com algum armazenamento superficial.

2.7 - Problemas de manejo de solo e água

Segundo WILHELM *et al.* (1985) a utilização dos sistemas pivô central de baixa pressão deve aumentar com o desenvolvimento da agricultura irrigada; estes equipamentos tem potencial para economizar energia, mas também apresentam problemas de manejo de água e solo, como verificado por vários autores.

MICKELSON & SCHWEIZER (1987), estudando o efeito da redução de pressão e de sistemas de cultivo, concluiu que a conversão da pressão de um pivô central de 380 KPa para 138 KPa aumentou o volume de escoamento superficial de 30% em média, para os três sistemas de cultivo estudados, num solo com 3,8% de declive cultivado com milho.

A uniformidade da umidade no perfil do solo pode ser consideravelmente reduzida pelo escoamento superficial em solos com baixa capacidade de infiltração (KINCAID *et al.*, 1969).

O aumento do escoamento superficial pode ter também aspectos ambientais negativos. Dependendo da topografia e tipo de solo, o escoamento superficial aumenta as perdas de solo (GILLEY *et al.*, 1983). KOLUVEK *et al.* (1993) relatam perdas de até 33 t/ha de solo.

De acordo com WILMES *et al.* (1992), na maioria das decisões de projeto e manejo, a seleção da configuração de emissores envolve aspectos econômicos e ambientais. A seleção de emissores de baixa pressão irá diminuir os custos de bombeamento para um dado volume de água, mas pode também aumentar o escoamento

superficial, reduzindo a eficiência do sistema. O aumento do volume de água necessário para compensar o volume de escoamento superficial pode anular os benefícios da redução de pressão (GILLEY & MIELKE, 1980; WILMES *et al.*, 1992).

Os problemas associados ao manejo de solo e água quando se utiliza pivôs centrais de baixa pressão variam em função do tipo de solo, topografia, cultura e práticas culturais (GILLEY & MIELKE, 1980).

GILLEY *et al.* (1983) e GILLEY *et al.* (1986), estudando o efeito de diferentes configurações de emissores e vários sistemas de cultivo, concluíram que a chave para o sucesso na operação de sistemas pivô central de baixa pressão está na eliminação do escoamento superficial durante a aplicação de água.

2.8 - Sistemas de cultivo

A necessidade de desenvolver sistemas de cultivo em agricultura irrigada que possam controlar o escoamento superficial e permitir a utilização de sistemas de baixa pressão em diferentes tipos de solos e topografias é defendida por autores como GILLEY *et al.* (1983), GILLEY *et al.* (1986), HEERMANN *et al.* (1990) e KELLER & BLIESNER (1990).

Sistemas de cultivo reduzido que mantenham resíduos vegetais na superfície do solo, protegendo-o da erosão e aumentando o armazenamento superficial podem minimizar o problema do escoamento superficial (GILLEY *et al.*, 1983; WILHELM *et al.*, 1985; GILLEY *et al.*, 1986).

WILHELM *et al.* (1985), comparando sistemas de alta e baixa pressão associados com diferentes tipos de cultivo na produção de milho, concluíram que a

utilização de sistemas de pressão reduzida associados com cultivo mínimo pode reduzir os custos sem afetar a produção.

AARSTAD & MILLER (1973) concluíram que a construção de pequenas bacias entre as linhas de plantio reduziram o escoamento superficial de 40 para 1%, num solo com 7% de declive cultivado com batata e beterraba.

MOHAMOUD et al (1992), utilizando um modelo para dimensionamento de sistemas pivô central, concluíram que é necessário a utilização de aspersores de alta pressão para evitar escoamento superficial em solo sob sistema convencional de cultivo, enquanto o plantio direto permitiu a utilização de emissores de baixa pressão.

MARTIN *et al.* (1993) observaram que a utilização de equipamentos tipo LEPA sem sistema de cultivo para armazenar o excesso de aplicação pode resultar em substancial quantia de escoamento superficial. A utilização de "sprays" abaixo do dossel vegetativo na maioria dos casos provocou menos escoamento superficial que o sistema LEPA.

2.9 - Escoamento superficial

KELSO & GILLEY (1983) definem o escoamento superficial potencial como a água não infiltrada que se encontra em estado transitório, mais o armazenamento superficial temporário na superfície do solo. É função das características de aplicação de água do sistema de irrigação e condições do solo.

De acordo com KINCAID *et al.* (1969), o escoamento superficial potencial é definido como a porção de água que é aplicada numa taxa que excede a infiltração do solo, tornando-se disponível para escoamento. Pode ser calculado

teoricamente pela integração da área entre a curva de aplicação e a curva de infiltração, no intervalo de tempo em que a aplicação excede a infiltração.

HERMANN & HEIN (1968) calcularam o potencial de escoamento superficial de água no solo em sistemas pivô central assumindo uma única curva de infiltração em toda a área irrigada, e os resultados obtidos foram proporcionais à distância do centro do pivô.

Segundo JOHNSON *et al.* (1987) a vazão e tamanho do equipamento, taxa de aplicação dos emissores, lâmina aplicada e infiltração do solo afetam o volume de escoamento superficial durante uma irrigação por pivô central. Em geral, a taxa de escoamento superficial aumenta com a distância ao centro do pivô; entretanto, KINCAID *et al.* (1969) afirmam que o escoamento superficial pode ser importante perto do pivô, porque apesar da baixa taxa de aplicação, o tempo de aplicação é longo, e portanto o solo atinge baixas taxas de infiltração.

ADDINK *et al.* (1975) estudaram o efeito do perfil de aplicação dos emissores na ocorrência de escoamento superficial e concluíram que este efeito depende do tipo de solo. A utilização do perfil assimétrico com o jato dirigido no sentido do deslocamento do pivô reduziu o escoamento superficial em média 11 %, para todos os tipos de solos estudados.

Segundo GILLEY & MIELKE (1980), mesmo em sistemas de alta pressão pode ocorrer escoamento superficial; KINCAID *et al.* (1969) encontraram valores superiores a 22 % em pivô equipado com aspersores de impacto de alta pressão. GILLEY & MIELKE (1980) mediram o escoamento superficial em uma cultura de milho completamente desenvolvida e encontraram valores de 25, 9 e 28% para aspersores de alta pressão, aspersores de baixa pressão e "sprays". O menor escoamento ocorrido com o aspersor de baixa pressão foi atribuído ao maior "stand" da cultura.

WILMES *et al.* (1992) desenvolveram um modelo de análise de desempenho de diferentes configurações de emissores (alta , média e baixa pressão) que permite a previsão do desempenho do pivô (uniformidade de irrigação, consumo de energia e aspectos econômicos) e de ocorrência de escoamento superficial em diferentes locais e condições de solo, utilizando um mapa de solos digitalizado da área irrigada.

O escoamento superficial pode ser reduzido pelos seguintes procedimentos:

- reduzir a vazão do sistema (MERRIAM *et al.* ,1973; GILLEY & MIELKE ,1980); isto pode ser feito considerando as precipitações prováveis , capacidade de armazenamento do solo e consumo de água pelas culturas; entretanto, corre-se algum risco de redução de produção (GILLEY & MIELKE ,1980).
- aumento da velocidade de rotação do pivô (KINCAID *et al.* ,1969; DILLON *et al.*,1972; MERRIAM *et al.* ,1973; EVANS ,1980; GILLEY & MIELKE ,1980; ALENCAR ,1988; KELLER & BLIESNER ,1990; TROUT *et al.* ,1990); isto diminui a lâmina por irrigação, embora não altere a taxa máxima de aplicação; velocidades mais rápidas aumentam as perdas pelo vento e evaporação, diminuindo a eficiência, e requerem mais revoluções por ciclo da cultura, aumentando o desgaste e a energia para movimentação do equipamento e a compactação pelas rodas das torres (EVANS, 1980; GILLEY & MIELKE, 1980); os benefícios do aumento da velocidade (irrigações mais frequentes) são reduzidos porque, com o solo umedecido mais frequentemente, a curva de infiltração se encontrará mais à direita (KELLER & BLIESNER, 1990), e portanto o solo encontra-se com menor capacidade de infiltração.
- modificar o perfil de aplicação, através da seleção de emissores com taxas de aplicação mais próximas da capacidade de infiltração do solo (HEERMANN & HEIN, 1968; DILLON *et al.*, 1972; GILLEY & MIELKE, 1980; ALENCAR,1988; TROUT *et*

- al.*,1990; MOHAMOUD *et al.*, 1992) ou instalação de "spray boom" (TROUT *et al.*,1990; MOHAMOUD *et al.*, 1992).
- limitar o comprimento da lateral do pivô (HEERMANN & HEIN, 1968; ROLLAND, 1982); entretanto, este procedimento reduz a viabilidade econômica do equipamento, pelo aumento do custo por área irrigada (ROLLAND, 1982).
 - práticas culturais, utilizando sistemas de cultivo que aumentem a capacidade de infiltração e o armazenamento superficial, e protejam o solo contra o selamento superficial (EVANS,1980; GILLEY & MIELKE ,1980; ALENCAR,1988; KELLER & BLIESNER,1990; MOHAMOUD *et al.*,1992)
 - construção de bacias de armazenamento, utilizando implementos específicos que constroem diques e sulcos entre as linhas de plantio (TROUT *et al.*, 1990); entretanto, esta operação é cara e difícil, e é desfeita ao longo das irrigações (KELLER & BLIESNER, 1990).

2.10 - Infiltração

KELSO & GILLEY (1983) afirmam que existem poucos estudos sobre infiltração e escoamento superficial sob taxa de aplicação variável que ocorre no pivô central. Neste sistema, o perfil da taxa de aplicação depende da vazão, comprimento da lateral, velocidade de deslocamento e tipo de emissor utilizado. De acordo com SKAGGS *et al.* (1983) no período em que a capacidade de infiltração excede a taxa de aplicação , a água irá infiltrar-se tão rapidamente quanto é aplicada e a infiltração será controlada pela aplicação; entretanto, a capacidade de infiltração pode tornar-se com o tempo menor que a taxa de aplicação; então a superfície do solo ficará saturada e a água aplicada em excesso irá tornar-se disponível para o armazenamento ou escoamento superficial.

O armazenamento superficial nas macro e micro depressões do solo pode desempenhar um importante papel na minimização do escoamento superficial, especialmente quando a lâmina aplicada é pequena. Depende principalmente do declive, micro topografia e rugosidade da superfície do solo. Normalmente é igual a 12,5 mm quando o declive é zero, reduzindo 2,5 mm para cada 1 % de aumento do declive (KELLER & BLIESNER, 1990).

Os fatores que afetam a infiltração são as propriedades do solo (textura, estrutura), declividade, conteúdo inicial de água, taxa de aplicação, selamento e encrustamento superficial (SKAGGS, 1983).

O selamento superficial é causado pelo impacto das gotas d'água, que destroem a estrutura da camada superficial do solo e provocam a deposição de argila nos poros, formando uma camada compactada. Embora tenha pequena espessura, essa camada exerce grande influência nas características de infiltração do solo (MOORE & LARSON, 1980). O selamento superficial depende principalmente da energia das gotas, taxa de aplicação, textura e estrutura do solo. Como primeira aproximação, sugere-se uma redução entre 15 e 25% na infiltração pela utilização de aspersores de impacto de média e baixa pressão (GILLEY, 1984).

Segundo MOHAMOUD *et al.* (1992) as áreas irrigadas por pivô central podem receber uma variedade de sistemas de cultivo, que podem afetar a variabilidade espacial e temporal da capacidade de infiltração, através da formação ou prevenção de encrustamento superficial e camadas compactadas.

Segundo KELSO & GILLEY (1983) não existe uma técnica definitiva para medir infiltração em área irrigada por pivô central. KINCAID *et al.* (1969) desenvolveram uma técnica para modificar matematicamente a curva de infiltração obtida pelo infiltrômetro de anel, no intervalo de tempo em que a superfície do solo sob taxa de aplicação variável ainda não se encontra saturada; assumiram que a taxa de infiltração em

algum instante é função da lâmina infiltrada até aquele instante, melhorando a estimativa do escoamento superficial em relação à função não modificada.

DILLON *et al.* (1972) apresenta uma técnica alternativa para mensuração da infiltração utilizando o próprio equipamento pivô central, que deve permanecer estacionário, baseada no tempo de saturação da superfície do solo e taxa de aplicação ao longo do raio de alcance dos emissores.

De acordo com KELLER & BLIESNER (1990), o método de determinação da infiltração deve simular as condições de irrigação que ocorrem em áreas sob sistemas pivô central, e por isso o infiltrômetro de aspersor deve ser utilizado. Métodos para determinação de infiltração por aspersão em que a água é aplicada sob taxa constante foram desenvolvidos por Tovey & Pair¹, Dixon & Peterson², citados por SKAGGS *et al.* (1983), em que a infiltração é medida pela diferença entre aplicação e escoamento superficial; ou pelo tempo de saturação do solo, utilizando os infiltrômetros de Beggs³ e Reinders & Louw⁴, citados por KELLER & BLIESNER (1990).

KELSO & GILLEY (1983) desenvolveram um equipamento portátil eletrônico a partir do infiltrômetro de Purdue-Winsconsin para estimar a taxa de infiltração do solo sob pivô central, através da determinação da taxa de aplicação e do escoamento superficial. Esta metodologia foi aplicada em uma cultura de milho com diferentes sistemas de cultivo do solo, irrigada por pivô central equipado com aspersores de alta e baixa pressão e "sprays". Foram determinados a taxa de aplicação acima e abaixo do dossel vegetativo e o escoamento superficial e desenvolvido uma metodologia para obtenção e análise matemática dos dados.

¹ TOVEY, R.; PAIR, C.H. Measurement of Intake Rate for Sprinkler Irrigation Design. *Transactions of ASAE*. St. Joseph, 9 : 359 - 63. 1966

² DIXON, R.M.; PETERSON, A.E. Construction and Operation of a Modified Spray Infiltrometer and a Flow Infiltrometer. *Res. Rep. 17*. Esp. Sta., University of Wisconsin, Madison, 1964.

³ BEGGS, R.G. A *Portable Field Sprinkler Infiltrometer*. Logan, Utah State University. 1981 (MS Thesis)

⁴ REINDERS, F.B.; LOUW, A.A. The Measurement of a Infiltration as a Design Input for Mechanized Irrigation Systems. *S. A. Irrigation*. 7(1):9-21. 1985

KELLER & BLIESNER (1990) recomendam que os testes de infiltração devem ser feitos na região da periferia da área irrigada, onde a taxa de aplicação é maior. Para simular as condições de umidade e selamento típicos de solos irrigados por pivô central, deve-se molhar o solo previamente e esperar secar uma camada superficial de 10-20 mm, antes de iniciar o teste de infiltração.

Segundo PRUSKI *et al.* (1993) a capacidade de infiltração em um solo recém preparado é alta, em razão da quebra da estrutura da camada superficial, ocorrendo posteriormente a redução com o selamento superficial. Analizando o escoamento superficial em solo com e sem cobertura, concluíram que foi consideravelmente menor no solo coberto, aumentando ao longo das irrigações para o solo coberto e descoberto.

EVANS (1980) observa que o período de máximo consumo de água pelas culturas, e portanto de maior necessidade de irrigação, ocorre aproximadamente no meio do ciclo das culturas, quando o solo já apresenta menor capacidade de infiltração, devido ao selamento superficial. Nesta época espera-se maior ocorrência de escoamento superficial.

2.11 - Presença do dossel vegetativo

De acordo com HEERMAN & KOHL (1983), o projeto de sistemas de irrigação móveis deve considerar o armazenamento superficial e a interceptação foliar quando a taxa de aplicação excede a infiltração; a interceptação foliar geralmente não é considerada no projeto, porque os sistemas são projetados para irrigar solos nus.

Segundo STEINER *et al.* (1983), as perdas por evaporação e interceptação das plantas ocorrem na irrigação por aspersão e devem ser avaliadas quando se objetiva comparar a eficiência de aspersores e equipamentos. Observaram que numa

cultura de milho com o dossel vegetativo completamente desenvolvido, a maior parte da água que atinge o topo da cultura chega ao solo indiretamente, escoando pelas folhas e caule, não havendo diferença quando a água é aplicada por chuva ou irrigação. Essa interceptação depende da frequência e época de irrigação, lâmina aplicada e condições atmosféricas. O dossel vegetativo do milho é capaz de armazenar água; essa capacidade varia com o IAF (índice de área foliar), espaçamento entre plantas, e características varietais, sendo relativamente constante após o desenvolvimento completo. A percentagem de armazenamento varia com a lâmina aplicada. Estimaram um armazenamento foliar de 2,7 mm por aplicação de água, quando o IAF foi maior que 3.

AYARS et al (1991), testando vários níveis de uniformidade acima do dossel vegetativo de uma cultura de algodão irrigada por sistema lateral móvel, observaram que a uniformidade foi maior abaixo do dossel vegetativo, sendo afetada pela altura de plantas, IAF e distribuição das folhas. A uniformidade aumentou com o acréscimo da lâmina aplicada, sendo que quando foi alta acima do dossel vegetativo, foi alta abaixo, mesmo quando a lâmina aplicada foi pequena.

3 - METODOLOGIA

3.1 - Caracterização da área e do sistema pivô central

O trabalho experimental foi realizado utilizando-se o equipamento pivô central do Departamento de Engenharia Rural da ESALQ/USP, localizado na Fazenda Areão, Piracicaba, SP, cujas coordenadas geográficas são: latitude 22° 43' S, longitude 47° 38' W e altitude 560 m.

O pivô central possui as seguintes características:

modelo : DANMATIC MD400/BP 4TVC

comprimento da lateral : 166,4 m

número de torres : 04

comprimento dos vãos : inicial - 40,1 m

intermediários - 38,6 m

final (balanço) - 10,6 m

altura em relação ao solo : 3,45 m

diâmetro da lateral : 6 5/8" (163,8 mm)

propulsão : elétrica (motores de 1,0 cv, 480 V)

velocidade da última torre a 100% : 172 m/h

suprimento de água : motobomba diesel

área irrigada : com canhão final - 11,5 ha ; sem canhão final - 8,7 ha

Para a execução do trabalho, foi feita uma simulação na região do último vão e balanço final, dimensionando-se os bocais para as características do seguinte equipamento, que é representativo da média dos equipamentos em operação no Brasil:

comprimento da lateral : 500 m

área irrigada : 78,5 ha

raio da última torre : 489,4 m

velocidade da última torre a 100% : 172 m/h

tempo de revolução a 100% : 17,77 h

lâmina bruta : 8 mm em 24 h

vazão : 260,8 m³ /h

canhão final : ausente

A área onde está instalado o pivô possui solo classificado como Terra Roxa Estruturada (Alfisol), série Luiz de Queiroz, com declividade média variando de 2,5 % em aclive a 8,8 % em declive.

A parcela experimental consistiu de uma faixa de 250 x 10 m, localizada entre a última torre e a extremidade final da lateral (sob o balanço final), conforme Figura 1.

O solo da parcela apresentou as seguintes características, determinadas no laboratório de física do solo do DER/ESALQ:

composição textural : areia 21% ; silte 26% ; argila 53%

densidade aparente na camada de 0 - 30 cm : 1,31 g/cm³

curva de retenção na camada de 0 a 30 cm : Figura 2

A declividade da parcela foi de 5,5 % no sentido transversal e 0,5 % no sentido longitudinal.

Figura 1 - "Lay out" da localização da área experimental

Figura 2 - Curva de retenção de água do solo da área experimental

A equação de ajuste dos dados da curva de retenção ao modelo de Van Genuchten é:

$$\theta = 0.175 + \frac{0.395}{\left[1 + (0.538018|\psi_m|)^{1.240963}\right]^{0.194174}} \dots\dots\dots(4)$$

em que :

θ - umidade do solo (cm^3/cm^3)

ψ_m - tensão de água no solo (centímetros de coluna de água)

Ao longo da área experimental, foram instalados 12 pontos de medição de taxa de aplicação e escoamento superficial (Figura 1), espaçados entre si de 20 m, localizados no mesmo raio em relação ao centro do pivô, sob a metade do balanço final (a 161 m do centro do pivô existente, a 495 m do centro do pivô simulado). Esta localização foi escolhida para evitar problemas de uniformidade de aplicação de água próximo à última torre (excesso, devido aos respingos na estrutura da torre) e à extremidade da lateral (déficit, devido à pouca sobreposição).

3.2 - Dispositivos de coleta de lâmina aplicada e escoamento superficial

Para coletar a água do escoamento superficial, foi desenvolvido um dispositivo a partir do modelo utilizado por ALENCAR (1988), modificado para permitir a obtenção de dados de taxa de escoamento superficial. As calhas consistiram de chapas de ferro de 1,2 mm de espessura, com 20 cm de largura e comprimento conforme a Figura 3.

A calha possui forma pentagonal, área de $3,93 \text{ m}^2$, com os lados acopláveis, de modo a permitir a desmontagem e transporte no campo. As laterais são cravadas no solo numa profundidade de 10 cm, para evitar a entrada ou saída de água superficial, e unidas nas extremidades pelos encaixes. O escoamento coletado é conduzido

até um recipiente através de um tubo de PVC de 100 mm de diâmetro e 1,4 m de comprimento.

Figura 3 - Esquema construtivo das calhas coletoras de escoamento

O escoamento superficial foi coletado em baldes plásticos de 15 litros, com diâmetro de 29 cm. A cada intervalo de tempo, o balde foi trocado e o volume medido em recipiente de 13 litros, graduado de 200 ml. Para minimizar o erro devido ao volume de água aplicado pelo pivô diretamente no balde, foram instalados de cada lado deste, 2 coletores, que também foram substituídos e lidos a cada intervalo de tempo. O volume coletado foi corrigido pela razão entre a área dos dois coletores e a do balde e subtraído do volume coletado pelo balde em cada intervalo.

$$V_t = Vb_t - (3.8141Vc_t) \dots\dots\dots(5)$$

onde :

V_t - volume corrigido de escoamento no tempo t (cm^3)

Vb_t - volume coletado no balde no tempo t (cm^3)

Vc_t - volume dos dois coletores no tempo t (cm^3)

Para transformar o volume em lâmina, foi considerada a área da calha, através da fórmula:

$$L_t = \frac{V_t / 1000}{3.93} \dots\dots\dots(6)$$

em que :

L_t - lâmina de escoamento no tempo t (mm)

V_t - volume de escoamento no tempo t (cm³)

A lâmina de escoamento em cada intervalo foi transformada em lâmina acumulada. O tempo de ocorrência de escoamento foi contado a partir do início de aplicação de água na calha. Considerou-se para efeito de cálculo, o tempo médio de cada intervalo como o representativo do intervalo considerado.

Para determinação da taxa de aplicação, foram utilizadas linhas de coletores de alumínio de 10,5 cm de diâmetro e 12 cm altura, instalados em tripés a 30 cm do solo. O tempo de aplicação foi estimado dividindo-se o diâmetro de alcance do emissor em teste pela velocidade de deslocamento da última torre; o tempo estimado foi dividido em intervalos de 1 a 3 minutos, dependendo do emissor utilizado; foi adotado o limite mínimo de 1 min, por questão de operacionalidade. O número de coletores em cada linha foi calculado dividindo-se o tempo de aplicação pelo intervalo de tempo adotado. O número necessário estimado de coletores em cada linha foi acrescido de 4 unidades, para melhorar a estimativa da lâmina total coletada.

Os coletores foram numerados de acordo com o total de intervalos. Durante a aplicação, após cada intervalo, o coletor correspondente foi vedado por tampa plástica; a leitura do volume foi feita utilizando proveta de 250 cm³, graduada de 2 cm³, imediatamente após a passagem do pivô, para evitar perdas por evaporação. A leitura da proveta em volume foi transformada em lâmina pela equação (7) :

$$L_t = 10 \frac{V_{c_t}}{86.59} \dots\dots\dots(7)$$

em que :

L_t - lâmina do coletor correspondente ao tempo t (mm)

V_{c_t} - volume do coletor correspondente ao tempo t (cm³)

Para minimizar os erros devido à desuniformidade radial e circular do pivô e os efeitos do deslocamento da lateral sobre as calhas, foram utilizadas 2 linhas de coletores de cada lado da calha, numeradas em sentido contrário, conforme Figura 4. O cálculo do volume coletado em cada intervalo foi considerado como a média dos coletores respectivos das 4 linhas.

Figura 4 - Esquema da instalação das calhas no campo e disposição das linhas de coletores e de milho.

O tempo foi contado a partir do momento em que começou a aplicação de água dentro da calha. Novamente para efeito de cálculo, o tempo correspondente a cada intervalo foi considerado como o tempo médio daquele intervalo.

A taxa de aplicação sob o dossel da cultura foi determinada dispondo-se as linhas de coletores B e C no centro da entrelinha da cultura e as linhas A e D na posição intermediária entre a linha e o centro da entrelinha da cultura, como mostra a Figura 5.

Como as folhas do milho interceptam água e funcionam como coletores, observou-se que as linhas B e C, por estarem logo abaixo da extremidade das folhas, recebem mais água, provocando uma desuniformidade que superestimaria os valores de lâmina coletada. Para minimizar o problema, foi feita uma ponderação atribuindo peso 2 às linhas A e D. Desse modo, foi simulada uma terceira linha de coletores de cada lado da calha, situada na mesma posição que as linhas A e D em relação à linha de plantio da cultura.

Figura 5 - Esquema da disposição das linhas de coletores em relação às linhas de plantio do milho.

$$V = \frac{[2(V_a + V_d) + V_b + V_c]}{6} \dots\dots\dots(8)$$

em que :

V - volume ponderado das quatro linhas de coletores (cm³)

V_{a,b,c,d} - volume coletado nas linhas a, b, c, d (cm³)

3.3 - Tratamento dos dados

Devido à metodologia utilizada, os dados obtidos de lâmina aplicada e escoamento são acumulados e representativos de intervalos de tempo. É necessário um tratamento matemático para desenvolver as funções representativas das taxas de aplicação e escoamento. Foi utilizado o método da "média móvel" para suavizar a curva dos dados acumulados, como recomendado por KELSO & GILLEY (1983), de acordo com :

$$Xm_t = \frac{X_{t-1} + X_t + X_{t+1}}{3} \dots\dots\dots(9)$$

em que :

Xm_t - valores de lâmina ou escoamento acumulados no tempo t, após a utilização da média móvel

X - valores de lâmina ou escoamento acumulados iniciais, no tempo t-1, t e t+1

Através deste procedimento, o aspecto irregular da curva de dados acumulados foi eliminado. Este procedimento foi repetido 3 vezes, tomando-se o cuidado para não alterar o valor da lâmina total acumulada. O número de vezes em que a operação foi repetida foi denominado "fator de uniformização Fi", onde i é o número de repetições do procedimento.

Após os dados de lâmina acumulada serem submetidos ao tratamento da "média móvel", a taxa de aplicação em cada intervalo foi determinada através de diferenciação numérica:

$$TA_t = \frac{L_t - L_{t-1}}{\frac{\Delta t}{60}} \dots\dots\dots(10)$$

em que :

TA_t - taxa de aplicação no tempo t (mm/h)

L_t - lâmina aplicada acumulada no tempo t (mm)

Δt - intervalo de tempo utilizado na obtenção dos dados (min)

Os dados de escoamento superficial acumulado não foram processados pela média móvel, pelo fato da curva dos dados originais apresentar forma suave e para manter estritamente inalterados os tempos de início e fim do escoamento. A taxa de escoamento em cada intervalo foi obtida pela fórmula:

$$TE_t = \frac{L_t - L_{t-1}}{\frac{\Delta t}{60}} \dots\dots\dots(11)$$

em que :

TE_t - taxa de escoamento no tempo t (mm/h)

L_t - lâmina escoada acumulada no tempo t (mm)

Δt - intervalo de tempo utilizado na obtenção dos dados (min)

3.4 - Caracterização dos emissores utilizados

Na execução do trabalho, foram utilizadas as seguintes configurações de emissores :

- aspersor de impacto de média pressão FABRIMAR AO62¹, com ângulo de jato de 60°, 2 bocais, regulador de pressão de 280 KPa, montado "on top" diretamente na tubulação da lateral
- "spray" fixo de baixa pressão FABRIMAR AF2R¹, com placa difusora plana com 34 estrias, regulador de pressão de 140 KPa, montado em pendural de 3/4" (19 mm) a 2,5 m do solo, alternadamente de cada lado da lateral
- "spray" rotativo modelo "rotator" de baixa pressão NELSON R30 U4¹, com placa difusora de 4 estrias, regulador de pressão de 140 KPa, montado "on top" diretamente na tubulação da lateral

¹ A citação do fabricante tem como objetivo apenas informação, não significando sua recomendação pelo autor

A fórmula (12), apresentada por KELLER & BLIESNER (1990), foi utilizada para calcular a vazão necessária em cada saída :

$$q_i = \frac{2R_i d_i}{R_T^2} Q_t \dots\dots\dots(12)$$

em que :

- q_i - vazão requerida na saída i (m^3/h)
 R_i - distância da saída i ao centro do pivô (m)
 d_i - metade da distância entre as saídas i-1 e i+1 (m)
 R_T - comprimento total da lateral (m)
 Q_t - vazão total do equipamento (m^3/h)

O diâmetro dos bocais utilizados na simulação, dos emissores que aplicavam água sobre as calhas são mostrados na Tabela 4:

Tabela 4 - Posição em relação ao centro do pivô, vazão requerida e diâmetro dos bocais utilizados na simulação do pivô de 500 m de raio, na extremidade da lateral.

Posição da Saída (m)	Vazão Requerida (m^3/h)	Spray Fixo AF2R	Aspersor de Impacto A062	Spray Rotativo R30 U4
		Diâmetro dos Bocais Utilizados (mm)		
499,0	2,08	6,8	4,6x3,6	7,0
497,0	2,33	7,2	5,6x3,0	7,4
494,5	2,37	7,2	5,6x3,0	7,4
492,4	2,11	6,8	4,6x3,6	7,0
490,4	3,03	8,4	5,8x4,4	8,4
última torre				
486,4	3,55	8,8	6,6x4,4	8,8
483,4	2,52	7,4	5,6x3,4	7,6
481,4	2,06	6,8	4,4x3,6	7,0
479,3	2,05	6,8	4,4x3,6	7,0
477,3	1,99	6,6	4,6x3,4	6,8
475,3	1,98	6,6	4,6x3,4	6,6

3.5 - Teste de uniformidade de aplicação

A uniformidade de aplicação e o perfil de distribuição de água ao longo da lateral do pivô simulado foram avaliadas para cada configuração de emissores utilizada, seguindo-se as normas da ASAE (1991); o CUC foi calculado de acordo com HEERMANN & HEIN (1968) e o CWSD (Coeficiente de Desvio Padrão Ponderado) segundo MAREK *et al.* (1986). O espaçamento entre coletores foi de 2,0 m, com o pivô sendo operado na velocidade de 76,6 m/h.

3.6 - Condução da cultura irrigada

O preparo do solo utilizado foi o mais empregado em áreas irrigadas para produção de grãos e constituiu-se das seguintes operações:

- duas passadas de grade pesada (disco de 28")
- duas passadas de grade niveladora (disco de 22")

A cultura de milho foi conduzida de acordo com as recomendações de REZENDE *et al.* (1990) para áreas irrigadas. A cultivar utilizada foi o AG 303, híbrido duplo precoce. O plantio foi efetuado em 14/11/93, com plantadeira de sulcador de disco duplo, espaçamento entre linhas de 1,0 m, 8,0 sementes por metro linear, em linhas paralelas ao deslocamento da última torre (conforme figura 4). O fertilizante utilizado foi o 04-14-08 (570 Kg/ha). O controle de ervas daninhas foi feito através de herbicida de pré emergência (Atrazine, 2,5 Kg i.a/ha), para evitar a necessidade de cultivos mecânicos, e portanto, a movimentação do solo. A germinação ocorreu em 20/11/93 e foi feito um desbaste para se estabelecer um stand de 60.000 plantas/ha. A adubação com N em cobertura foi de 160 Kg/ha, parcelado em duas vezes.

3.7 - Lâminas de irrigação e umidade do solo

As lâminas brutas utilizadas nos testes foram de 6,5 e 27,3 mm, de acordo com a vazão e velocidade de deslocamento do equipamento; considerando uma eficiência potencial de aplicação de 90%, as lâminas líquidas seriam de 5,9 e 24,6 mm, aproximadamente; a primeira corresponde a uma lâmina de reposição diária, típica de pivô central. Considerando que diferentes lâminas por irrigação correspondem a diferentes umidades do solo no momento da irrigação, baseando-se na retenção de água pelo solo, calculou-se a umidade na qual as lâminas aplicadas elevariam o solo à capacidade de campo, assumindo que a profundidade do sistema radicular é de 0,30 m e a capacidade de campo ocorre na tensão de 0,33 atm (32 KPa):

$$L = (\theta_{cc} - \theta) Z_{ef} \dots\dots\dots(13)$$

$$\theta = \theta_{cc} - \frac{L}{Z_{ef}} \dots\dots\dots(14)$$

em que :

L - lâmina líquida a ser aplicada para elevar o solo à capacidade de campo (mm)

θ - umidade atual do solo (cm^3/cm^3)

θ_{cc} - umidade do solo na capacidade de campo ($0,3192 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$)

Z_{ef} - profundidade efetiva do sistema radicular (300 mm)

Nestas condições, para as lâminas de 5,9 e 24,6 mm, a umidade do solo no momento da irrigação seria de, respectivamente, 22,8 e 18,3 % em peso.

3.8 - Execução dos ensaios de campo

Os testes foram realizados de modo a representar as condições do meio agrícola (planta e solo) ao longo do ciclo da cultura do milho, que foi dividido em 3 estádios:

- 1 - inicial (estabelecimento da cultura) : M1
- 2 - intermediário (desenvolvimento vegetativo) : M2
- 3 - final (granação) : M3

No dia da realização dos ensaios, foi feita a determinação do IAF nos estádios 2 e 3, para caracterização da cobertura vegetal. Cuidados especiais foram tomados para manter as plantas de milho intactas e a superfície do solo sem movimentação na região das calhas. A umidade do solo foi monitorada na camada de 0 a 30 cm pelo método das pesagens, para fornecer o resultado imediato, e aferida pelo método da estufa. Um pluviômetro foi instalado próximo da área experimental, para medição da precipitação pluviométrica.

A velocidade de deslocamento da última torre foi determinada nas regulagens de 100, 80, 60, 40 e 20% do relé percentual, sendo ajustada a seguinte função, que apresentou $r^2 = 0,999$:

$$V(R) = -6,717 + 1,308R + 1,613 \times 10^{-2} R^2 - 1,146 \times 10^{-4} R^3 \dots\dots\dots(15)$$

em que :

V - velocidade de deslocamento da última torre (m/h)

R - regulagem do relé percentual (%)

Os testes foram realizados nos três estádios do milho, com os três emissores, utilizando-se as duas lâminas de irrigação, com o solo na umidade de 18 ou 23 % em peso. O emissor "rotator" foi utilizado nos pontos 1 a 4, o "spray" nos pontos 5 a 8 e o aspersor de impacto nos pontos 9 a 12. Os dispositivos de coleta de lâmina e escoamento foram montados em cada conjunto de quatro pontos e o pivô, equipado com o tipo de emissor correspondente, foi operado nas velocidades de 158 e 38 m/h, para aplicar as lâminas aproximadas de 6 e 25 mm. Após a passagem sobre os quatro pontos, o pivô foi desligado, os emissores do último vão e balanço substituídos e os dispositivos de coleta de lâmina e escoamento montados nas quatro posições seguintes e o teste recommençado.

3.9 - Determinação da curva de infiltração de água no solo

O teste de infiltração foi realizado entre a primeira e segunda gradagem niveladora, utilizando-se como emissor o aspersor de impacto, que devido ao seu maior alcance, permite longo tempo de aplicação e, portanto, permite ao solo aproximar-se da velocidade de infiltração básica. Após o preparo, a superfície do solo foi uniformizada manualmente nos 12 pontos de medição, para minimizar o armazenamento superficial; a seguir, foi aplicada uma lâmina de irrigação de 90 mm, mais 72 mm de chuva, acumulando 162 mm, para provocar o selamento superficial e representar a condição de infiltração média do solo durante o ciclo da cultura.

A curva de infiltração foi determinada a partir da diferença entre taxa de aplicação e taxa de escoamento. Os dados de lâmina aplicada e escoamento acumulados foram submetidos ao processo da "média móvel" por três vezes (F3). Após este procedimento, os valores de taxa de aplicação e taxa de escoamento em cada intervalo de tempo foram obtidos por diferenciação numérica. Este procedimento foi utilizado por KELSO & GILLEY (1983). A taxa de infiltração em cada intervalo foi obtida por:

$$TI_t = TA_t - TE_t \dots\dots\dots(16)$$

em que :

$TI_{(t)}$ - taxa de infiltração no instante t (mm/h)

Foram realizados dois testes, com o solo nas umidades de 18 e 23 % em peso (correspondentes às lâminas de 25 e 6 mm, respectivamente), com a última torre do pivô sendo movimentada nas velocidades de, respectivamente, 25 e 64 m/h. Após os testes de infiltração, o solo foi gradeado (uma passada de grade niveladora) para quebrar o selamento superficial e efetuado o plantio do milho.

4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 5 mostra os valores de lâmina acumulada, proveniente de chuva e irrigação, durante a execução do experimento. Os dados são referentes ao período decorrido até a maturação fisiológica, que se deu aos 112 dias.

Tabela 5 - Valores de lâmina d'água acumulados durante a execução do experimento, proveniente de chuva (C) ou irrigação (I).

Dia	Lâmina mm	Chuva ou Irrigação	Acumulado mm
16/11	14	I	14
17/11	7	I	21
19/11	7	C	28
21/11	16	I	44
22/11	12	C	56
25/11	9	C	65
26/11	30	C	95
02/12	25	I ^a	120
04/12	17	C	137
09/12	6	I ^b	143
12/12	22	C	165
17/12	7	C	172
22/12	22	C	194
04/01	14	C	208
06/01	24	I ^c	232
09/01	48	C	280
13/01	4	I ^d	284

Dia	Lâmina mm	Chuva ou Irrigação	Acumulado mm
19/01	9	I	293
19/01	6	C	299
23/01	8	I	307
25/01	15	C	322
28/01	30	C	352
29/01	15	C	367
03/02	6	I ^e	373
06/02	30	C	403
09/02	29	C	432
12/02	15	C	447
13/02	10	C	459
15/02	5	C	462
20/02	6	C	468
22/02	14	C	482
03/03	19	C	501
04/03	9	C	510
07/03	2	C	512

^a ensaio com o milho no estádio 1 e lâmina de 25 mm

^b ensaio com o milho no estádio 1 e lâmina de 6 mm

^c ensaio com o milho no estádio 2 e lâmina de 25 mm

^d ensaio com o milho no estádio 2 e lâmina de 6 mm

^e ensaio com o milho no estádio 3 e lâmina de 6 mm

Pela tabela 5, observa-se que não foi realizado o ensaio com o milho no estádio 3 e lâmina de 25 mm, devido às condições climáticas. A precipitação pluviométrica manteve o solo sempre com umidade acima de 18 % até o final do ciclo do milho.

Os intervalos de tempo utilizados, em função da lâmina e do emissor, e o diâmetro de alcance medido no campo são apresentados na Tabela 6 :

Tabela 6 - Valores dos intervalos de tempo utilizados nos ensaios em função do emissor e lâmina aplicada.

EMISSION	LÂMINA (mm)	
	6	25
	Intervalo de	Tempo (min)
Impacto	1,5	3,0
Rotator	1,0	2,0
"spray"	1,0	1,5

A Figura 6 esquematiza o padrão molhado e diâmetro de alcance produzido pelas três configurações de emissores utilizadas.

Figura 6 - Padrão molhado e diâmetro de alcance em função do tipo de emissor e de montagem .

A caracterização das plantas de milho em função do estágio de desenvolvimento, na época da realização dos ensaios, encontra-se na Tabela 7 :

Tabela 7 - Caracterização das plantas de milho na data dos ensaios.

ESTÁDIO	IDADE dias	ALTURA m	IAF
Milho 1	15	0,25	-
Milho 2	50	1,80	3,95
Milho 3	75	2,45	4,09

4.1 - Uniformidade de aplicação

Os resultados do ensaio de uniformidade do pivô simulado encontram-se na Tabela 8 e o gráfico do perfil de distribuição de água na Figura 7. A velocidade da última torre durante o ensaio foi de 76,6 m/h, o que resultaria numa lâmina bruta teórica de 13,2 mm, calculada pela vazão de projeto de 260,8 m³/h. Como não foi feita a determinação da vazão do equipamento na região da simulação, a eficiência de aplicação potencial foi calculada teoricamente.

Tabela 8 - Resultados do ensaio de uniformidade do pivô simulado, utilizando as três configurações de emissores

EMISSION	CUC %	CUSW %	Lâmina Média	Eficiência %
aspersor de impacto	89,9	87,9	11,7	88,6
"spray" rotativo	94,4	92,7	12,0	90,9
"spray" fixo	88,4	84,6	11,6	87,9

Os valores de CUC e CUSW encontrados para os três emissores estão dentro da faixa de valores encontrados em equipamentos bem projetados e funcionando adequadamente. Os altos valores encontrados podem ser explicados pelo fato de se estar na extremidade da lateral (último vão e balanço final), com todas as saídas sendo

utilizadas, resultando numa pequena distância entre emissores, e portanto, aumentando a sobreposição. Outro fato que favorece esta alta uniformidade é por se estar próximo à torre guia, onde o efeito da desuniformidade de deslocamento é menor. HANSON et al. (1986) encontraram valores de CUC de 90 % na extremidade e 75 % na metade da lateral, num pivô equipado com "sprays". Os menores valores do "spray" fixo são devido à menor sobreposição, provocada pelo menor raio de alcance e por estar mais próximo do solo (montado em pendurais) e pelo fato do emissor ser o único que não apresenta movimento rotativo. Os maiores valores do "spray" rotativo se devem ao movimento giratório suave e constante da placa difusora, que ainda fraciona o fluxo em quatro jatos, permitindo grande superposição. Valores semelhantes foram encontrados pelo IPT (1993) e TEIXEIRA (1992) para este emissor. BRIDI (1984) e COTRIM (1988) encontraram valores de 86,6 e 86,7 %, para pivôs com aspersores de impacto e "sprays", respectivamente. Observa-se que os "sprays" de baixa pressão conseguem uniformidades comparáveis às dos aspersores de média e alta pressão, como afirmado por SILVA (1989) e Toyamani et al¹, citados por REZENDE (1992), chegando a ser superior no caso dos "sprays" giratórios ou "rotator".

Os menores valores do CUSW em relação ao CUC mostram que este coeficiente é menos sensível às variações da lâmina aplicada, como observado por TEIXEIRA (1992). Este autor encontrou CUC de 93,6 e 87,6 % e CUSW de 89,7 e 81,5 % para "spray" rotativo sobre a lateral e "spray" fixo em pendural a 2,0 m do solo, respectivamente.

No aspersor de impacto, observa-se um aumento acentuado da lâmina aplicada na distância aproximada de 490m, onde se localiza a última torre. Isto foi provocado pelo choque do jato do aspersor com a caixa elétrica de controle da última

¹ TOUYAMANI, K.P.; NORUM, D.I.; DUBETS, S. Application Rates and Uniformity under Center Pivot Sprinkler Irrigation Systems using Spray Nozzles. *Canadian Agricultural Engineering*, 29 : p. 149. 1987

torre, resultando numa maior precipitação nessa região. Para solucionar o problema, deve-se instalar os aspersores adjacentes às torres em tubos de subida de 0,5 m.

As diferenças de lâmina média ponderada e eficiência de aplicação podem ser explicadas pela diferença de vazão fornecida pelas configurações de emissores utilizadas, que não são exatamente iguais. A eficiência potencial de aplicação foi pouco influenciada pelo clima, porque os testes foram conduzidos em períodos de baixa demanda evaporativa da atmosfera e baixa velocidade do vento, conforme normas da ASAE (1991).

Figura 7 - Perfil de distribuição de água do pivô simulado.

4.2 - Taxa de aplicação e escoamento ao longo do ciclo da cultura

As curvas de aplicação e escoamento acumulados obtidos no campo, são exemplificadas na Figura 8, para o aspersor de impacto aplicando lâmina de 6 e 25 mm, com o milho no estágio 1. Observa-se o efeito da utilização da média móvel para suavizar a curva de aplicação acumulada. A curva de aplicação F0 representa os dados originais, tal

como foram obtidos no campo. Após a aplicação da média móvel por 3 vezes, foi obtida a curva de aplicação F3. A partir destas curvas de dados acumulados, foram obtidas as curvas de taxa de aplicação e escoamento, por diferenciação numérica.

Figura 8 - Exemplo de curva de dados acumulados de aplicação e escoamento, antes e após a utilização da média móvel.

A Figura 9 mostra as curvas teóricas de aplicação na extremidade do pivô simulado, para as lâminas de 6 e 25 mm, obtidas através da equação (1). Pela figura

pode-se observar que a taxa máxima de aplicação independe da lâmina aplicada, como afirmam KELLER & BLIESNER (1990).

Figura 9 - Taxa e tempo de aplicação teóricos segundo a equação (1) em função da lâmina aplicada e emissor utilizado.

A Figura 10 mostra os gráficos da taxa de aplicação e de escoamento, para os ensaios com o milho no estádio 1 e lâmina de 6 mm. Na figura 10-a, para o aspersor de impacto, a taxa de aplicação máxima se aproximou da teórica e a baixa taxa no final da aplicação é devido à neblina provocada pelo equipamento, prolongando o

tempo de aplicação teórico. Fenômeno semelhante foi observado por KELSO & GILLEY (1983). A figura 10-b, para o "rotator", mostra que a taxa máxima se aproximou da teórica e o tempo de aplicação foi superior ao teórico. A figura 10-c mostra que a taxa máxima para o "spray" fixo foi subestimada, provavelmente devido ao intervalo de tempo utilizado ser inadequado em relação ao tempo de aplicação, que é muito curto. O tempo de aplicação superou o teórico. A curva de aplicação do "spray" é semelhante a do rotator, porque o tempo de aplicação é pequeno em relação ao intervalo de tempo utilizado. O escoamento iniciou primeiro para o "spray", devido à sua maior taxa de aplicação.

A Figura 11 mostra o ensaio com o milho no estádio 1 e aplicação da lâmina de 25 mm. A taxa máxima e o tempo de aplicação para o aspersor de impacto aproximaram-se dos teóricos. Novamente observa-se uma assimetria provocada pela neblina. Na figura 11-b, para o "rotator", a taxa máxima e o tempo de aplicação aproximaram-se do teórico. A taxa máxima de aplicação para o "spray" fixo (fig 11-c) foi melhor estimada, porque o tempo de aplicação aumentou e o intervalo de tempo passou a ser mais adequado. Observa-se que ocorreu escoamento mesmo após o término da aplicação. O tempo de aplicação observado superou o teórico. Para os três emissores, observa-se uma depressão na taxa de aplicação, que é devido à passagem da lateral em velocidade lenta sobre os coletores. Comportamento semelhante foi observado por KELSO & GILLEY (1983). Quando a velocidade é rápida, este efeito não é perceptível, como mostra a figura 10,

A figura 12 mostra os ensaios com o milho no estádio 2 e lâmina de 6 mm. Observa-se que a presença do dossel vegetativo reduziu a taxa máxima de aplicação principalmente com o aspersor de impacto. Ocorreu escoamento superficial com o "spray", mesmo após o término da aplicação.

Figura 10 - Curvas de taxa de aplicação e escoamento para milho 1 e lâmina 6 mm

Figura 11 - Curvas de taxa de aplicação e escoamento para milho 1 e lâmina 25 mm

Figura 12 - Curvas de taxa de aplicação e escoamento para milho 2 e lâmina 6 mm

A figura 13 mostra os ensaios com o milho no estágio 2 e lâmina de 25 mm. Observa-se que, para os três emissores, a redução da taxa máxima foi menos significativa que no ensaio com lâmina de 6 mm. Isto provavelmente se deve à retenção foliar pelo dossel vegetativo, que passa a ser menos significativa. Observa-se pela figura 13-c, que no "spray" fixo, a taxa de escoamento chegou a ser maior que a taxa de aplicação por um período de aproximadamente 7 minutos.

A figura 14 mostra os ensaios para o milho no estágio 3 e lâmina de 6 mm. O comportamento da taxa de aplicação é bem semelhante aos ensaios no estágio anterior. As curvas de taxa de escoamento mostram que o volume escoado foi menor para os três emissores, em relação ao milho no estágio 2, contrariando as afirmações de autores com EVANS (1980) e PRUSKI et al (1993). Como a retenção foliar e o IAF foram praticamente os mesmos, provavelmente isto se deve a um aumento na capacidade de infiltração de água no solo, provocada pela decomposição de raízes, aumentando a porosidade, e/ou pela alteração na arquitetura da planta, mesmo apresentando praticamente o mesmo IAF. No estágio milho 2, a maior parte das folhas está na região basal da planta, que apresenta então um aspecto aproximadamente cônico. No estágio milho 3, o desenvolvimento da planta e o carreamento de nutrientes para a espiga provoca a morte das folhas da parte basal da planta e a maior parte das folhas passa a se localizar na metade até o ápice da planta, que apresenta então o aspecto de um cone invertido; a altura de plantas neste estágio também era maior em 0,65 m em relação ao milho 2. Esta mudança na arquitetura pode afetar a maneira como a água atinge o solo, embora isto não tenha sido detectado pela metodologia de determinação da curva da taxa de aplicação. Para detectar este fenômeno, provavelmente seria necessário determinar se houve alteração no fluxo de água que escorre pelo caule das plantas, e no volume da água retido pelas inserções das folhas no caule.

Figura 13 - Curvas de taxa de aplicação e escoamento para milho 2 e lâmina 25 mm

Figura 14 - Curvas de taxa de aplicação e escoamento para milho 3 e lâmina 6 mm

4.3 - Lâminas de aplicação, escoamento e retenção foliar

A Tabela 9 mostra os resultados de lâmina coletada, escoada e retida nas folhas, perdas por escoamento e retenção foliar, em mm e percentagem, e taxa de aplicação máxima, em função do tipo de emissor, estágio do milho e lâmina de irrigação aplicada. A percentagem de lâmina escoada foi calculada em relação à lâmina coletada no ensaio. A percentagem de retenção foliar foi calculada pela relação entre lâmina retida e lâmina coletada sem a presença do dossel vegetativo (milho no estágio 1). A perda em mm foi calculada pela soma das lâminas retida e escoada, e em percentagem, pela relação entre perdas em mm e lâmina coletada sem presença do dossel vegetativo (milho 1).

Tabela 9 - Dados de lâminas de aplicação, escoamento e retenção foliar obtidos nos ensaios.

Ensaio	Lâmina Coletada mm	Lâmina Escoada mm	Lâmina Escoada %	Taxa de Aplicação Máxima mm/h	Retenção Foliar mm	Retenção Foliar %	Perda mm	Perda %
M1-Impacto6	5,7	0,3	6	44	-	-	0,3	6
M1-Rotator6	5,8	0,2	4	62	-	-	0,2	4
M1-Spray6	5,6	0,3	6	65	-	-	0,3	6
M1-Impacto25	24,9	2,6	11	44	-	-	2,6	11
M1-Rotator25	25,2	6,5	26	65	-	-	6,5	26
M1-Spray25	26,0	8,8	34	88	-	-	8,8	34
M2-Impacto6	3,1	0,1	3	25	2,6	46	2,7	47
M2-Rotator6	3,8	0,6	15	56	2,0	34	2,6	44
M2-Spray6	4,4	0,7	16	55	1,2	21	1,9	34
M2-Impacto25	23,2	2,6	11	36	1,7	4	4,3	17
M2-Rotator25	23,4	6,4	27	61	1,8	7	8,2	33
M2-Spray25	24,9	11,9	48	86	1,1	4	13,0	50
M3-Impacto6	3,4	0,1	4	25	2,3	40	2,4	42
M3-Rotator6	3,9	0,2	4	41	1,9	33	2,1	35
M3-Spray6	4,4	0,3	4	64	1,2	21	1,5	26

A Figura 15 mostra os valores de taxa de aplicação média e máxima determinadas nos ensaios, em relação aos valores teóricos. Os valores encontrados para o aspersor de impacto foram os que mais se aproximaram dos teóricos, enquanto que para o

"spray", os valores foram os mais distantes. Isto provavelmente se deve a relação entre o tempo de aplicação e o intervalo de tempo adotado, que parece ter sido mais adequada para o aspersor de impacto. O "spray", por apresentar um tempo de aplicação curto, exigiria um intervalo de tempo bem pequeno, o que é inviável pela metodologia utilizada. A presença do dossel vegetativo reduziu a taxa de aplicação máxima, sendo que este efeito foi mais pronunciado quando se utilizou a lâmina de 6 mm, principalmente no aspersor de impacto. Os valores encontrados seriam mais próximos dos teóricos, se fosse considerada a eficiência de aplicação potencial.

Figura 15 - Taxas de aplicação média e máxima determinadas nos ensaios.

Na Figura 16 são apresentados os valores de escoamento em lâmina e percentagem em relação à lâmina coletada. Observa-se que o escoamento para o "spray" foi sempre maior e para o aspersor de impacto, sempre menor. Destaca-se o alto valor de escoamento para o "spray" aplicando lâmina de 25 mm, com o milho no estágio 2. Valores ainda superiores foram encontrados por ADDINK (1975), que determinou um escoamento de 65 % no final de um pivô de 400 m de raio equipado com "sprays". GILLEY et al. (1986) encontraram escoamento de 1,1, 1,6 e 8,1 % para aspersor de impacto de alta e baixa pressão e "sprays" (média de 4 anos), num solo com 3,5 % de declividade e lâmina de aplicação de 37,6 mm. GILLEY & MIELKE (1980) encontraram 25 e 28 % de escoamento para aspersor de impacto e "spray", num solo com 3,5 % de declividade e com uma cultura de milho já desenvolvida. DEBOER et al. (1992) encontraram escoamento de 20 e 10 % para "spray" e aspersor de impacto de média pressão. ALENCAR (1988) encontrou escoamento de 30,1 e 18,7 % para "spray" e aspersor de impacto. Entretanto, comparar estes valores é pouco válido, porque existe influência da lâmina aplicada, declividade, textura e teor de umidade do solo. A percentagem de escoamento aumentou com a lâmina aplicada, aumentando no meio do ciclo (milho no estágio 2), mesmo com a presença do dossel vegetativo. Isto pode ser explicado pelo selamento superficial e uniformização da superfície do solo, reduzindo a capacidade de infiltração e de armazenamento superficial.

A Figura 17 mostra os valores de retenção foliar pelo dossel vegetativo em mm e percentagem em relação à lâmina coletada sem presença do dossel (milho no estágio 1). Os valores de lâmina retida estão de acordo com STEINER et al. (1986), que encontrou valores médios de 2,7, variando de 0,8 a 7,0 mm, para um IAF superior a 3. A retenção foi maior para o aspersor de impacto e menor para o "spray", fato também observado por KELSO & GILLEY (1983), que encontraram 8,1 e 1,7 mm, respectivamente. O aspersor de impacto possui um espectro de diâmetro de gotas variando

de pequenas a grandes, favorecendo a retenção. O "spray", por possuir uma alta taxa de aplicação e gotas caindo mais verticalmente na altura do topo da cultura consegue maior penetração no dossel, e assim menor retenção. A retenção é relativamente constante em função da lâmina aplicada, porém passa a ser significativa quando se utiliza lâminas pequenas, como também observaram STEINER et al (1986) e AYARS et al (1991). Este aspecto é importante quando se realiza práticas de quimigação e o alvo é a planta (fungicidas, inseticidas, herbicidas de pós emergência). Como a lâmina retida é aproximadamente constante, neste caso deve-se utilizar a menor lâmina possível para

Figura 16 - Valores de escoamento determinados nos ensaios

Figura 17 - Valores de retenção foliar determinados nos ensaios

maximizar a retenção foliar. Quando o alvo for o solo (fertilizantes, herbicidas de pré emergência), deve-se utilizar lâminas maiores, desde que o escoamento não seja significativo, para minimizar a retenção foliar.

As lâminas de retenção foliar encontrados devem ser considerados como lâmina bruta, pois esta água retida não pode ser considerada como totalmente perdida. Segundo STEINER et al. (1986), a água retida contribui para reduzir a transpiração das plantas enquanto se evapora. Parte desta água que se estimou retida nas folhas pode ter escoado pelo tronco das plantas e atingido o solo. STEINER et al. (1986) estimou que 45 % da água que atinge o topo da cultura chega ao solo escoando pelo caule.

Entretanto, esta água escorrida contribuiu para molhar o espaço próximo a linha da cultura, onde a grande presença de folhas torna difícil a água atingir o solo diretamente.

A soma das perdas por escoamento e retenção foliar são mostradas na Figura 18, em mm e percentagem em relação à lâmina coletada sem a presença de dossel vegetativo (milho no estágio 1). Observa-se que quando se utiliza lâmina menor, a influência da retenção foliar é maior e as perdas maiores ocorrem no aspersor de impacto. No milho no estágio 1 e lâmina de 6 mm, as perdas são pequenas porque não há dossel vegetativo e o escoamento é pequeno. Quando se utiliza lâminas maiores, passa a existir escoamento significativo e as perdas são maiores para o "spray". As perdas tendem a aumentar ao longo do ciclo, como observado por PRUSKI *et al* (1993), porque ocorre redução na capacidade de infiltração de água no solo e passa a existir o fenômeno da retenção foliar.

Portanto, como sugestão de manejo, deve-se utilizar lâminas pequenas quando a cultura do milho estiver no estágio inicial. Após o estabelecimento do dossel vegetativo, utilizar lâminas intermediárias, de modo que ocorra pouco escoamento e a retenção foliar, embora presente, seja pouco significativa.

Observa-se que, ao analisar o desempenho de um sistema de irrigação, é necessário considerar a sua interação com o solo e a cultura. Este estudo deve ser feito ao longo do ciclo da cultura irrigada, porque o meio agrícola é dinâmico, com as características do solo e da planta mudando no decorrer do ciclo.

Observou-se que a água proveniente do escoamento nos ensaios com o milho no estágio 1 era de cor escura, contendo muitas partículas de solo em suspensão, ao passo que nos estágios posteriores, era bem mais clara. Isto indica que as perdas de solo devido ao escoamento ocorrem principalmente no início do ciclo da cultura. Isto se deve pelo fato do solo estar movimentado pelo seu preparo e porque as gotas de água atingem a sua superfície diretamente. Posteriormente, ocorre uma ligeira compactação que reduz o

arrastamento de solo pelo escoamento e o dossel vegetativo passa a oferecer uma proteção contra o impacto das gotas d'água, através da redução da sua energia cinética.

Figura 18 - Perdas somadas de escoamento e retenção foliar determinadas nos ensaios

4.4 - Determinação da curva de infiltração de água no solo

As curvas de aplicação e escoamento acumulados, originais (F0) e após a aplicação da média móvel por 3 vezes (F3), relativas aos testes de infiltração, estão na Figura 19.

As curvas de taxa de aplicação, escoamento e infiltração obtidas a partir dos dados acumulados estão na Figura 20. Como no início a taxa de infiltração é controlada pela taxa de aplicação, como afirmam SKAGGS *et al* (1983), a curva de infiltração não pode ser determinada pela metodologia utilizada e foi representada por uma linha reta horizontal.

Como o tempo de aplicação de água pelo pivô é relativamente curto, o solo não atingiu a velocidade de infiltração básica do solo (VIB), que entretanto, pela tendência da curva de infiltração, situa-se na faixa dos 10 - 12 mm/h.

Observa-se também a importância de se considerar o teor de umidade do solo no momento de se fazer o teste de infiltração. No solo mais úmido (23 % em peso), a infiltração começou a se estabilizar após 20 minutos, aproximadamente, enquanto que com o solo mais seco (18 % em peso), após 60 minutos, aproximadamente.

a - Umidade = 23 %

--- Aplicação F0 -●- Aplicação F3 -- Escoamento F0 -■- Escoamento F3

b - Umidade = 18 %

--- Aplicação F0 -●- Aplicação F3 -■- Escoamento F0 -- Escoamento F3

Figura 19 - Curvas de aplicação e escoamento acumulados dos testes de infiltração, antes e após a aplicação da média móvel.

Figura 20 - Curvas de taxa de aplicação, escoamento e infiltração obtidas em função da umidade do solo.

4.5 - Consumo de energia

Para analisar o efeito da utilização dos emissores em estudo na economia de energia, foi feita uma simulação da pressão no ponto do pivô e altura manométrica total

do sistema, na situação mais comum para as condições brasileiras, em que a fonte de água está localizada fora da área irrigada, sendo necessária uma adutora para conduzir água até o ponto do pivô. Para o pivô simulado, assumiu-se que:

- a fonte de água está a 550 m do ponto do pivô; a adutora é de ferro fundido (C - coeficiente de atrito de Hazen-Williams igual a 135), diâmetro de 8" (203,2 mm)
- o desnível geométrico mais perda de carga na sucção é de 5 mca (49 KPa)
- a lateral do pivô possui diâmetro de 6 5/8" (168,3 mm), C = 125
- o fator f de redução de perda de carga para múltiplas saídas, para o pivô central é 0,555 (KELLER & BLIESNER, 1990)
- a altura do pivô ao solo é 3,5 m
- o pendural utilizado é de PVC (C=130), diâmetro 3/4" (19 mm), 1 m de comprimento, vazão do último emissor igual a 2,37 m³ /h
- é necessária uma pressão adicional 5 mca (49 KPa) no último emissor, para compensar a perda de carga no regulador de pressão

A pressão necessária no ponto do pivô pode ser calculada por:

$$P_p = H + h_f L + P_s + h_{fRP} + h_{fP} + \Delta_z \dots\dots\dots(17)$$

em que :

P_p - pressão necessária no ponto do pivô (mca)

H - altura do pivô ao solo (m)

h_{fL} - perda de carga na tubulação da lateral (mca)

P_s - pressão de serviço do emissor utilizado (mca)

h_{fRP} - perda de carga no regulador de pressão (mca)

h_{fP} - perda de carga no pendural (m)

Δ_z - desnível geométrico entre o ponto do pivô e a maior cota da área irrigada

A altura manométrica total pode ser calculada por

$$H_m = P_p + \Delta_z P + h_{fA} + h_{fS} + \Delta_{zs} \dots\dots\dots(18)$$

em que :

H_m - altura manométrica total do sistema (mca)

$\Delta_z P$ - desnível geométrico entre a cota da motobomba e a cota do ponto do pivô (m)

h_{fA} - perda de carga na adutora (mca)

h_{fS} - perda de carga na sucção (mca)

$\Delta_z s$ - desnível geométrico entre a motobomba e a fonte de água

Nestas condições, utilizando-se a equação de Hazen-Williams, a perda de carga na adutora é de 12,0 mca (118 KPa), no pendural é de 0,6 mca (6 KPa) e na lateral do pivô de 17,5 mca (172 KPa), assumindo essa ser igual para os três emissores.

Simulando situações de declividade uniforme numa faixa comum em áreas irrigadas (0 a 10 %), a Figura 21 mostra a necessidade percentual de pressão dos "sprays" fixo e rotativo em relação ao aspersor de impacto, no ponto do pivô e altura manométrica total.

O efeito do tipo de emissor é mais acentuado no ponto do pivô em relação à altura manométrica total. O efeito será menos acentuado a medida que se aumenta a perda de carga na lateral (por redução do diâmetro, aumento do comprimento ou da vazão), ou como mostrado na figura 21, pelo aumento do desnível entre o ponto do pivô e o ponto mais alto da área irrigada.

Na altura manométrica total, o efeito do tipo de emissor é menos pronunciado, porque passam a existir componentes que independem do emissor utilizado. Este efeito será menos pronunciado a medida que diminui a relação P_p / H_m , que pode ser por aumento do desnível geométrico entre a motobomba e o pivô (como mostrado na figura 21), ou da perda de carga na adutora (por redução do diâmetro ou aumento do comprimento ou da vazão).

Em ambos os casos, a pequena diferença entre o "spray" fixo e o rotativo se deve a instalação do "spray" fixo em pendural, onde apesar de haver perda de carga, a redução da altura ao solo permite um ganho de energia.

Figura 21 - Necessidade de pressão relativa utilizando os emissores de baixa pressão e variando a declividade do terreno

O efeito no consumo de energia é diretamente proporcional à altura manométrica total, podendo ser calculada por:

$$N = \gamma \frac{QH_m}{75\eta} \dots\dots\dots(19)$$

em que :

- N - potência absorvida na bomba (cv)
- γ - peso específico da água (kg/m^3)
- Q - vazão necessária (m^3/s)
- H_m - altura manométrica (m)
- η - rendimento da bomba

Utilizando motor elétrico e assumindo para os valores de altura manométrica e vazão considerados, η da bomba igual a 0,80 (AZEVEDO NETTO &

ALVAREZ, 1991), a potência absorvida varia de 88 a 212 CV para o aspersor de impacto e de 71 a 195 CV para os "sprays" fixo e giratório, variando a declividade de 0 a 10 %. Como a potência absorvida é diretamente proporcional à altura manométrica, sua curva percentual é a mesma da altura manométrica total. Portanto, a motobomba de um pivô central equipado com "sprays" de baixa pressão consome, nas condições simuladas, 81 a 92 % da energia utilizada pelo mesmo pivô central, se for equipado com o aspersor de impacto de média pressão.

Observa-se portanto que a economia de energia pela utilização de emissores de baixa pressão é mais significativa quanto maior a relação P_p / H_m . Nas condições brasileiras, a concepção original do projeto do pivô central para captar água subterrânea diretamente no ponto do pivô foi modificada pela necessidade de captação de água fora da área irrigada, exigindo a utilização de uma adutora para conduzir água até o ponto do pivô. Portanto, a vantagem em termos de consumo de energia pela utilização de emissores de baixa pressão fica reduzida nestas condições, pois existe influência do emissor apenas na pressão no ponto do pivô, sendo que na altura manométrica total passam a existir componentes que independem do tipo de emissor utilizado. Outro fator que contribui para reduzir a economia energética, mesmo no ponto do pivô, consiste no fato de que no Brasil, a área irrigada por equipamento é grande, exigindo laterais de grande comprimento, aumentando desse modo a importância da componente perda de carga na lateral. Portanto, economias de energia de 20 a 40 % (GILLEY et al., 1983) e até 40 % (JAMES & BLAIR, 1984), dificilmente serão conseguidas nas nossas condições.

5 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os resultados obtidos nas condições em que foi realizado o trabalho permitem as seguintes conclusões e recomendações :

- o "spray" fixo provocou os maiores valores de escoamento superficial e taxa de aplicação e o aspersor de impacto os maiores valores de retenção foliar, com o "spray" rotativo apresentando comportamento intermediário.
- o aumento da lâmina de irrigação aumenta as perdas por escoamento superficial, enquanto que sua redução aumenta importância relativa da retenção foliar; essas perdas podem comprometer a eficiência de irrigação do sistema.
- o manejo da irrigação na cultura do milho deve ser feito aplicando-se lâminas pequenas durante o estágio de estabelecimento; após o desenvolvimento vegetativo, deve-se utilizar lâminas intermediárias entre aquelas utilizadas, para reduzir o escoamento superficial e minimizar a importância da retenção foliar.
- os emissores de baixa pressão proporcionaram uniformidade de aplicação de água comparável ao de média pressão, chegando a ser superior no caso do "spray" rotativo.
- a utilização de emissores de baixa pressão permite a redução da pressão de operação do pivô e a economia de energia em relação aos emissores de média pressão será proporcional à relação pressão no ponto do pivô / altura manométrica total, variando com as condições topográficas, tamanho, diâmetro e vazão da lateral.

- a metodologia utilizada para determinação das taxas de aplicação e escoamento, dentro da sua filosofia de utilizar equipamentos simples, mostrou-se satisfatória, devendo-se desenvolver procedimentos que permitam a obtenção de dados em intervalos de tempo menores, para melhorar a precisão.
- a metodologia permite estimar satisfatoriamente a curva de infiltração de solos sob irrigação a taxa variável, como no sistema pivô central; a escolha do emissor para o teste de infiltração deve levar em conta o tempo de aplicação, para que seja aproximado o valor da VIB, além de se considerar a umidade inicial do solo.
- é aconselhável realizar o trabalho em outras condições de cultura, solo, sistema de cultivo, configuração de emissores e tamanho do equipamento, para permitir conclusões mais seguras e abrangentes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AARSTAD, J.S & MILLER, D. Soil management to reduce runoff under center-pivot sprinkler systems. *Journal of Soil and Water Conservation*, Ankeny , 28: 171-3, Jul./Aug. 1973.

ABO-GHOBAR, H.M. Losses from low-pressure center pivot irrigation systems in a desert climate as affected by nozzle height. *Agricultural Water Management* , Phoenix, 21 : 23-32, Jun. 1992.

ADDINK, J.W. Runoff potential of spray-nozzle and sprinkler center-pivot. St. Joseph, ASAE, 1975. 19 p. (ASAE Paper 75-2086)

ADDINK, J.W.; MILES, D.L.; SKOGERBOE, G.V. Water intake under center pivot from time varying application rates. *Transactions of ASAE* , St. Joseph, 18 (3): 523-8, May./Jun. 1975.

ADDINK, J.W.; KELLER, J.; SNEED, R.E.; WOLF, J.W. Design and operation of sprinkler systems. In: JESSEN, M.E., ed. *Design and operation of farm irrigation systems*. St. Joseph, ASAE, 1983. p. 621-58 (ASAE Monograph, 3)

ALENCAR, C. A. B. Intensidade de aplicação e escoamento superficial em irrigação com pivôs centrais de baixa e média pressão. Viçosa, 1988. 87p. (M.S.- Universidade Federal de Viçosa)

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. Test Procedure for determining the uniformity of water distribution of center pivot, corner pivot, and moving lateral irrigation machines equipped with spray or sprinkler nozzles. St. Joseph, 1991. p.643-53. (ASAE Standard, S436)

AYARS, J.E.; HUTMACHER, R.B.; SCHONEMAN, R.A.; DETTINGER, D.R. Influence of cotton canopy on sprinkler irrigation uniformity. Transactions of ASAE, St. Joseph, 34(3): 890-6. May./Jun. 1991.

AZEVEDO NETTO, J.M.& ALVAREZ, G.A. Manual de hidráulica. São Paulo, Edigar Blucher, 1991. v. 1, 335p.

BRIDL, S. Análise da uniformidade de distribuição de água em sistema de irrigação pivô central. Viçosa, 1984. 87p. (M.S. - Universidade Federal de Viçosa)

COTRIM, C. E. Análise da uniformidade de aplicação de água, em sistema de irrigação do tipo pivô central de baixa pressão. Viçosa, 1988. 114 p. (M.S. - Universidade Federal de Viçosa)

DEBOER, D.W.; BECK, D.L.; BENDER, A.R. A field evaluation of low, medium and high pressure sprinklers. Transactions of ASAE, St. Joseph, 35(4): 1185-9, Jul./Aug. 1992.

DILLON, R.C; HILER, E.A; VITTETOE, G. Center-pivot sprinkler design based on intake characteristics. *Transactions of ASAE*, St. Joseph, 15(5): 996-1001, Sep./Oct. 1972.

EVANS, R.G. Low pressure center-pivot sprinkler systems. Fort Collins, Colorado State University Extension Service, 1980. 3p. (Bulletin Service in Action, 4.711)

GILLEY, J.R. Suitability of reduced pressure center-pivots. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, New York, 110(1): 22-34, May. 1984.

GILLEY, J.R & MIELKE, L.N. Conserving energy with low-pressure center pivots. *Journal of Irrigation and Drainage Division*, New York, 106(1R1): 49-59, Mar. 1980.

GILLEY, J.R & SUPALLA, R.J. Economic analysis of energy savings in irrigation. *Transactions of ASAE*, St. Joseph, 26(6): 1784-92, Nov./Dec. 1983.

GILLEY, J.R & WATTS, D.G. Possible energy savings in irrigation. *Journal of Irrigation and Drainage Division*, New York, 103(1R4): 445-57, Dec. 1977.

GILLEY, J.R; MIELKE, L.N; WILHELM, W.W. An experimental center-pivot irrigation system for reduced energy crop production studies. *Transactions of ASAE* . St. Joseph, 26(5): 1375-85, Sep./Oct. 1983.

GILLEY, J.R.; SUPALLA, D.R.; LARUE, J.L. Low pressure sprinkler packages for moving irrigation systems. St. Joseph, ASAE, 1986. 19 p. (ASAE Paper, 86-2088)

GILLEY, J.R; HACKBART, C.A; STETSON, L.E; FEYEN, J. Energy management. In: HOFFMAN, G.J; HOWEL, T.A; SOLOMON, K.N., ed. Management of farm irrigation systems, St. Joseph, ASAE, 1990. p. 719-46.

HANSON, B.R. & WALLENDER, W.W. Bidirecional uniformity of water applied by continuous-move sprinkler machine. Transactions of ASAE, St. Joseph, 29(4): 1047-53, Jul./Aug. 1986.

HEERMANN, D.F & HEIN, P.R. Performance characteristics of self-propelled center-pivot irrigation system. Transactions of ASAE, St. Joseph, 11(1): 11-5, Nov./Dec. 1968.

HEERMANN, D.F.& KOHL, R.A. Fluid dinamics of sprinkler systems. In : JESEN, M.E., ed. Design and operation of farm irrigation systems. St. Joseph, ASAE, 1983. p. 583 - 614 (ASAE Monograph, 3)

HEERMANN, D.F; WALENDER, W.W; BOS, M.G. Irrigation efficiency and uniformity. In: HOFFMAN, G.J; HOWEL, T.A; SOLOMON, K.N., ed. Management of farm irrigation systems. St. Joseph, ASAE, 1990. p.125-49.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. Apoio técnico ao programa de crédito rural para lavouras irrigadas nas regiões de Guaira e São João da Boa Vista - SP. São Paulo, 1993. 9 p. (IPT Relatório , 31.397-3)

JAMES, L.G & BLAIR, S.K. Performance of low pressure center pivot systems. Transactions of ASAE, St. Joseph, 27(6): 1753-62. Nov./Dec. 1984.

JONHSON, G.C; ROCHESTER, E.W; HATCH, L.U; CURTIS, L.M; YOO, K.H. Analisis of center pivot irrigation systems operating in a humid-area environment. Transactions of ASAE, St. Joseph, 30(6): 1720-25, Nov./Dec. 1987.

KELLER, J. & BLIESNER, R.D. Sprinkle and trickle irrigation. New York, Avibook, 1990. 652p.

KELSO, G.L & GILLEY, J.R. A system for measuring infiltration rates under center pivot irrigation systems. Chicago, ASAE, 1983. 25 p. (ASAE Paper, 83-2517).

KINCAID, D.C; HEERMANN, D.F; KRUSE, E.G. Application rates and runoff in center-pivot sprinkler irrigation. Transactions of ASAE, St. Joseph, 12(6): 790-7, Nov./Dec. 1969.

KOLUVEK, P.K; TANJL, K.K; TROUT, T.J. Overview of soil erosion from irrigation. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, New York, 119(6): 929-46, Nov./Dec. 1993.

KREYSZIG, E. **Advanced engineering mathematics.** New York , John Wiley , 1993.

1389p.

LONGLEY, T.S; GARVIN, P.C; STARK, J.C. **Wind drift effects on evapotranspiration under low pressure sprinklers.** St. Joseph, ASAE, 1983. 12p.

(ASAE Paper, 83-2590)

MAREK, T.H; UNDERSANDER, D.J; EBELING, L.L. **An aeral-weighted uniformity coefficient for center pivot system.** Transactions of ASAE, St. Joseph, 29(6): 1665-

7, Nov./Dec. 1986.

MARTIN, D.L; YONTS, C.D; STETSON. L.E. **Performance of in-canopy sprinkler irrigation devices-field results.** St. Joseph, ASAE, 1993. 18 p. (ASAE Paper,

93-2055).

MERRIAM, J.L.; KELLER,J.; ALFARO,J. **Irrigation systems evaluation and improvement.** Logan, Utah State University, 1973. 221 p.

MICKELSON, R.H & SCHWEIZER, E.E. **Till-plant systems for reducing runoff under low-pressure, center-pivot irrigation.** Journal of Soil and Water Conservation,

Ankeny, 11 : 107-11, Mar./Apr. 1987.

MOHAMOUD, Y; McCARTY, T.R; EWING, L.K. **Optimum center-pivot irrigation system design with tillage effects.** Journal of Irrigation and Drainage Engineering,

New York, 118(2): 291-305, Mar./Apr. 1992.

MOORE, I.D. & LARSON, C.L. An infiltration-runoff model for cultivated soils.

Transaction of Asae, St. Joseph, 23 . 1460-7, Nov./Dec. 1980.

NELSON IRRIGATION CORPORATION. Nelson 300 series modular sprinkler for

pivots. Walla Walla, 1992. 12p.

OLITTA, A.F.L. Os métodos de irrigação. São Paulo, Nobel, 1987. 267 p.

PRUSKI, F.F; FURUKAWA, C; COSTA, L.M; FONTES, L.E.F; NETTO, A.M.

Análise do escoamento superficial, sob condições de irrigação, em solos com e sem cobertura. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 22., Ilhéus, SBEA, 1993. Anais . v.4 : p.2352-8.

REZENDE, M; FRANÇA, G.E; ALVES, V.M.C. Considerações técnicas sobre a

cultura do milho irrigado. Sete Lagoas, EMBRAPA/CNPMS, 1990. 24 p.
(EMBRAPA/CNPMS. Documentos, 7)

REZENDE, R. Desempenho de um sistema pivô central quanto a uniformidade de

aplicação e eficiência de uso da água, abaixo e acima do solo. Piracicaba, 1992. 86p.
(Mestrado - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/ USP)

ROLLAND, L. Mecanized sprinkler irrigation. Rome, FAO, 1982. 409 p. (FAO

Irrigation and Drainage Paper, 35)

SCALLOPI, E.J & ALLEN, R.G. Hydraulics of center-pivot laterals. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, New York, 119 (3) : 554-67, May./Jun. 1993.

SILVA, W.L.C. Considerações sobre o uso de sprays de baixa pressão em pivô central. *ITEM - Irrigação e Tecnologia Moderna*, Brasília, 39: 26 - 7, Dez. 1989.

SKAGGS, R. W.; MILLER, D. E.; BROOKS, R. H. Soil water - properties. In: JENSEN, M. E., ed. *Design and operation of farm irrigation systems*. St. Joseph, ASAE, 1983. p. 77-136. (ASAE. Monograph 3).

STEINER, J.L; KANEMASU, E.T; CLARK, R.N. Spray losses and partitioning of water under a center pivot sprinkler system. *Transactions of ASAE*, St. Joseph, 26(4): 1128-34, Jul./Aug. 1983.

TEIXEIRA, A. S. Estudo do efeito de diferentes tipos de emissores na performance de um sistema de irrigação por aspersão pivô central. Piracicaba, 1992. 89 p. (Mestrado - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" / USP)

TROUT, T.J; SOJKA, R.E; OKAFOR, L.I. Soil management. In : HOFFMAN, G.J; HOWEL, T.A; SOLOMON, K.N., ed. *Management of farm irrigation systems*. St. Joseph, ASAE, 1990. p. 873-96.

UNDERSANDER, D.J; MAREK, T.H; CLARK, R.N. Effect of nozzle type on runoff and yield of corn and sorghum under center pivot irrigation systems. *Irrigation Science*, New York, 6: 107-16, Jun. 1985.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. Irrigation ; sprinkle irrigation. New York, 1983. 121 p.

VON BERNUTH, R.D & GILLEY, J.R. Evaluation of center pivot application packages considering droplet induced infiltration reduction. Transactions of ASAE, St. Joseph, 28(6): 1940-6, Nov./Dec. 1985.

WILHELM, W.W; MIELKE, L.N; GILLEY, J.R. Tillage and low-pressure center-pivot irrigation effects on corn yield. Agronomy Journal, Madson, 77: 258-63, Mar./Apr. 1985.

WILMES, G.J; MARTIN, D.L; SUPALLA, R.J. Decision support systems for design of center pivot irrigation systems. St. Joseph, ASAE, 1992. 24 p. (ASAE Paper, MC92-105)

APÊNDICE 1

Planilhas dos ensaios de taxa de aplicação e de escoamento durante o ciclo da cultura do milho, utilizando os três emissores e duas lâminas por irrigação :

- Tempo : tempo médio do intervalo

- Aplicação :

- Acumulada :

ml : volume de aplicação coletado após cada intervalo, resultante da média de quatro calhas e quatro linhas de coletores por calha

mm : volume de aplicação coletado transformado em lâmina

F1 : lâmina de aplicação após a utilização da média móvel por uma vez

F2 : lâmina de aplicação após a utilização da média móvel por duas vezes

F3 : lâmina de aplicação após a utilização da média móvel por três vezes

- Taxa : taxa de aplicação em cada intervalo de tempo obtida por diferenciação numérica da coluna F3

- Escoamento :

- Acumulado

ml : volume de escoamento acumulado após cada intervalo, resultante da média de 4 calhas

mm : volume de escoamento transformado em lâmina

- Taxa : taxa de escoamento em cada intervalo obtida por diferenciação numérica da coluna mm

1 - Milho no estádio 1, lâmina de 6 mm, aspersor de impacto, 09/12/93

Tempo	Aplicação						Escoamento		
	Acumulada					Taxa	Acumulado		Taxa
min	ml	mm	F1	F2	F3	mm/h	ml	mm	mm/h
0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0	0	0.00	0.0
0.5	6.1	0.64	0.64	0.67	0.71	42.6	0	0.00	0.0
1.5	12.1	0.37	1.37	1.42	1.44	43.9	0	0.00	0.0
2.5	18.9	2.25	2.25	2.21	2.19	44.8	0	0.00	0.0
3.5	26.3	3.00	3.00	2.95	2.93	44.6	68	0.01	0.7
4.5	30.8	3.62	3.62	3.64	3.64	42.5	207	0.05	2.2
5.5	36.9	4.31	4.31	4.39	4.29	38.9	474	0.13	5.1
6.5	44.1	5.23	5.23	4.93	4.81	31.4	576	0.24	6.2
7.5	45.2	5.24	5.24	5.32	5.19	22.6	696	0.31	4.2
8.5	48.1	5.50	5.50	5.43	5.40	13.1	0	0.31	0.0
9.5	48.0	5.56	5.56	5.58	5.53	7.6	0	0.31	0.0
10.5	49.0	5.68	5.68	5.60	5.60	4.0	0	0.31	0.0
11.5	48.1	5.55	5.65	5.64	5.66	3.6	0	0.31	0.0
12.5	49.2	5.71	5.71	5.70	5.72	3.9	0	0.31	0.0
13.5	51.0	5.86	5.85	5.80	5.75	1.7	0	0.31	0.0

2 - Milho no estádio 1, lâmina de 6 mm, spray giratório ("rotator"), 09/12/93

Tempo	Aplicação						Escoamento		
	Acumulada					Taxa	Acumulado		Taxa
min	ml	mm	F1	F2	F3	mm/h	ml	mm	mm/h
0.0	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0	0	0.00	0.0
0.5	14.4	0.64	0.64	0.69	0.75	44.7	0	0.00	0.0
1.5	22.7	1.43	1.43	1.55	1.61	51.9	0	0.00	0.0
2.5	33.6	2.58	2.58	2.59	2.62	60.8	0	0.00	0.0
3.5	43.6	3.77	3.77	3.73	3.66	62.2	0	0.00	0.0
4.5	53.2	4.84	4.84	4.66	4.56	54.1	381	0.10	5.8
5.5	60.3	5.37	5.37	5.30	5.19	37.6	803	0.20	6.5
6.5	63.4	5.68	5.68	5.61	5.56	22.1	933	0.24	2.0
7.5	66.2	5.84	5.77	5.77	5.73	10.4	933	0.24	0.0
8.5	66.2	5.84	5.84	5.82	5.79	1.3	933	0.24	0.0

3 - Milho no estádio 1, lâmina de 6 mm, spray fixo, 09/12/93.

Tempo	Aplicação						Escoamento		
	Acumulada					Taxa	Acumulado		Taxa
min	ml	mm	F1	F2	F3	mm/h	ml	mm	mm/h
0.0	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.0
0.5	12.1	0.28	0.46	0.56	0.63	37.6	0	0.00	0.0
1.5	21.8	1.11	1.21	1.32	1.41	47.3	0	0.00	0.0
2.5	31.8	2.23	2.29	2.36	2.39	58.7	0	0.00	0.0
3.5	42.4	3.55	3.58	3.49	3.45	63.3	407	0.05	3.1
4.5	50.8	4.98	4.59	4.49	4.37	55.2	1460	0.19	8.0
5.5	53.3	5.23	5.29	5.12	5.02	39.5	2141	0.27	5.2
6.5	57.6	5.65	5.49	5.47	5.39	21.7	2416	0.31	2.1
7.5	57.9	5.68	5.65	5.57	5.55	9.7	2416	0.31	0.0
8.5	58.3	5.71	5.68	5.62	5.58	1.5	2416	0.31	0.0

4 - Milho no estádio 1, lâmina de 25 mm, aspersor de impacto, 02/12/93.

Tempo	Aplicação						Escoamento		
	Acumulada					Taxa	Acumulado		Taxa
min	ml	mm	F1	F2	F3	mm/h	ml	mm	mm/h
0	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0	0	0.00	0.0
1.5	10.0	0.85	1.53	1.77	1.89	37.8	0	0.00	0.0
4.5	49.6	3.73	3.78	3.91	3.98	41.8	0	0.00	0.0
7.5	58.5	6.76	6.41	6.27	6.18	44.0	0	0.00	0.0
10.5	75.8	8.76	8.63	8.37	8.26	41.5	0	0.00	0.0
13.5	89.8	10.36	10.08	10.13	10.06	35.9	0	0.00	0.0
16.5	96.4	11.13	11.68	11.66	11.78	34.4	284	0.07	1.4
19.5	117.6	13.58	13.21	13.53	13.62	36.9	458	0.12	0.9
22.5	129.3	14.93	15.70	15.67	15.77	43.0	1615	0.41	5.9
25.5	160.9	18.58	18.10	18.11	18.00	44.6	3593	0.91	10.1
28.5	180.1	20.79	20.54	20.23	20.09	41.6	6779	1.72	16.2
31.5	192.6	22.25	22.05	21.91	21.73	33.0	9126	2.32	11.9
34.5	200.1	23.11	23.15	23.06	22.95	24.4	10325	2.63	6.1
37.5	208.6	24.09	23.98	23.98	23.80	16.9	10325	2.63	0.0
40.5	214.1	24.73	24.54	24.45	24.35	10.9	10325	2.63	0.0
43.5	221.8	24.80	24.82	24.70	24.64	5.8	10325	2.63	0.0
46.5	215.9	24.93	24.85	24.76	24.73	1.8	10325	2.63	0.0
49.5	215.3	24.91	24.92	24.82	24.82	0.0	10325	2.63	0.0
52.5	215.0	24.83	24.90	24.90	24.85	0.0	10325	2.63	0.0

5 - Milho no estágio 1, lâmina de 25 mm, spray giratório ("rotator"), 02/12/93

Tempo	Aplicação						Escoamento		
	Acumulada					Taxa	Acumulado		Taxa
min	ml	mm	F1	F2	F3	mm/h	ml	mm	mm/h
0.0	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0	0	0.00	0.0
1.0	19.0	2.19	1.80	2.00	2.10	63.1	0	0.00	0.0
3.0	46.8	5.41	4.21	4.31	4.30	65.8	0	0.00	0.0
5.0	62.5	7.22	6.91	6.58	6.49	65.8	50	0.01	0.4
7.0	70.1	8.09	8.62	8.58	8.47	59.4	133	0.03	0.6
9.0	91.3	10.54	10.22	10.24	10.21	52.2	525	0.13	3.0
11.0	104.2	12.03	11.90	11.80	11.78	47.1	1421	0.36	6.8
13.0	113.6	13.12	13.27	13.29	13.31	45.9	2898	0.74	11.3
15.0	126.9	14.66	14.71	14.83	14.91	48.3	4201	1.07	9.9
17.0	141.7	16.36	16.51	16.62	16.69	53.2	6739	1.71	19.4
19.0	160.3	18.51	18.64	18.61	18.64	58.6	10895	2.77	31.7
21.0	182.1	21.03	20.68	20.69	20.61	59.1	15558	3.96	35.6
23.0	194.9	22.51	22.74	22.53	22.41	40.9	19610	4.99	30.9
25.0	213.7	24.68	24.16	24.02	23.77	24.7	22744	5.79	23.9
27.0	218.9	25.29	25.16	24.77	24.60	12.1	25053	6.37	17.6
29.0	220.9	25.51	25.40	25.10	25.00	1.1	25388	6.46	2.6
31.0	220.9	25.51	25.00	25.15	25.15	0.0	25388	6.46	0.0

6 - Milho no estádio 1, lâmina de 25 mm, spray fixo, 02/12/93

Tempo	Aplicação						Escoamento		
	Acumulada					Taxa	Acumulado		Taxa
min	ml	mm	F1	F2	F3	mm/h	ml	mm	mm/h
0.0	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0	0	0.00	0.0
0.75	11.0	1.85	2.15	2.01	2.06	82.5	0	0.00	0.0
2.25	28.4	4.60	3.89	4.18	4.15	83.4	0	0.00	0.0
3.75	45.1	5.21	6.50	6.25	3.32	86.7	38	0.01	0.38
5.25	83.8	9.68	8.37	8.52	8.41	83.8	123	0.03	0.87
6.75	88.6	10.23	10.68	10.46	10.44	81.2	208	0.05	0.86
8.25	105.2	12.15	12.32	12.34	12.25	72.5	547	0.14	3.45
9.75	126.4	14.60	14.01	13.96	13.88	65.3	1618	0.41	10.9
11.25	132.4	15.29	15.53	15.36	15.28	55.7	3090	0.79	15.0
12.75	144.8	16.72	16.52	16.52	16.52	49.9	4844	1.23	17.9
14.25	156.0	17.56	17.49	17.70	17.83	52.4	6842	1.74	20.3
15.75	182.7	18.20	19.09	19.28	19.44	64.4	9401	2.39	26.0
17.25	186.3	21.50	21.27	21.35	21.34	75.7	12537	3.19	31.9
18.75	205.1	24.12	23.68	23.38	23.22	75.5	16630	4.23	41.7
20.25	220.1	25.42	25.17	24.95	24.72	59.9	21597	5.50	50.6
21.75	225.0	25.98	25.99	25.84	25.64	36.6	27616	7.03	61.3
23.25	230.0	26.56	26.37	26.12	25.79	14.0	32114	8.17	45.8
24.75	231.0	26.67	26.30	26.18	25.90	3.5	34122	8.68	20.4
26.25	230.0	26.56	26.00	26.05	26.03	0.0	34547	8.79	2.3

7 - Milho no estádio 2, lâmina de 6 mm, aspersor de impacto, 13/01/94.

Tempo	Aplicação						Escoamento		
	Acumulada					Taxa	Acumulado		Taxa
min	ml	mm	F1	F2	F3	mm/h	ml	mm	mm/h
0.00	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0	0	0.00	0.0
0.75	4.4	0.51	0.56	0.55	0.58	23.1	0	0.00	0.0
2.25	10.1	1.17	1.10	1.18	1.19	24.4	0	0.00	0.0
3.75	14.1	1.62	1.89	1.83	1.82	25.3	0	0.00	0.0
5.25	25.0	2.89	2.49	2.45	2.37	21.9	0	0.00	0.0
6.75	25.7	2.97	2.97	2.82	2.76	15.6	201	0.05	2.1
8.25	26.4	3.05	3.01	2.99	2.96	8.0	324	0.08	1.3
9.75	26.1	3.01	3.01	3.05	3.05	3.9	324	0.08	0.0
11.25	25.9	2.96	3.14	3.11	3.11	2.4	324	0.08	0.0
12.75	29.8	3.45	3.20	3.18	3.16	1.8	324	0.08	0.0
14.25	27.7	3.19	3.19	3.19	3.18	0.8	324	0.08	0.0

8 - Milho no estádio 2, lâmina de 6 mm, spray giratório ("rotator"), 13/01/94

Tempo	Aplicação						Escoamento		
	Acumulada					Taxa	Acumulado		Taxa
min	ml	mm	F1	F2	F3	mm/h	ml	mm	mm/h
0.0	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0	0	0.00	0.0
0.5	2.4	0.26	0.48	0.64	0.71	42.6	0	0.00	0.0
1.5	10.0	1.15	1.43	1.50	1.54	49.9	15	0.00	0.2
2.5	24.8	2.86	2.58	2.50	2.43	53.3	294	0.07	4.3
3.5	32.2	3.71	3.48	3.30	3.15	43.2	673	0.17	5.8
4.5	33.5	3.87	3.85	3.66	3.55	24.1	1404	0.36	11.2
5.5	34.4	3.97	3.64	3.70	3.64	5.0	1890	0.48	7.4
6.5	26.7	3.08	3.61	3.65	3.62	1.2	2208	0.56	4.9
7.5	32.7	3.77	3.41	3.59	3.64	0.0	2208	0.56	0.0
8.5	29.3	3.38	3.75	3.76	3.75	0.0	2208	0.56	0.0

9 - Milho no estádio 2, lâmina de 6 mm, spray fixo, 13/01/94.

Tempo	Aplicação						Escoamento		
	Acumulada					Taxa	Acumulado		Taxa
min	ml	mm	F1	F2	F3	mm/h	ml	mm	mm/h
0.0	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0	0	0.00	0.0
0.5	5.6	0.65	0.70	0.79	0.84	50.2	0	0.00	0.0
1.5	12.6	1.45	1.68	1.72	1.76	55.7	154	0.04	2.4
2.5	25.4	2.94	2.77	2.78	2.71	56.8	668	0.17	7.9
3.5	34.0	3.93	3.90	3.63	3.52	48.7	1566	0.40	13.7
4.5	32.8	3.79	4.02	4.15	4.01	29.4	2301	0.59	11.2
5.5	33.9	3.92	4.14	4.25	4.23	13.4	2839	0.72	8.2
6.5	36.9	4.26	4.32	4.30	4.34	3.4	2839	0.72	0.0
7.5	38.3	4.42	4.41	4.39	4.38	0.93	2839	0.72	0.0

10 - Milho no estádio 2, lâmina de 25 mm, aspersor de impacto, 06/01/94.

Tempo	Aplicação						Escoamento		
	Acumulada					Taxa	Acumulado		Taxa
min	ml	mm	F1	F2	F3	mm/h	ml	mm	mm/h
0.0	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0	0	0.00	0.0
1.5	36.7	0.91	1.05	1.10	1.17	23.5	0	0.00	0.0
4.5	45.3	2.25	2.24	2.42	2.52	27.0	0	0.00	0.0
7.5	46.8	3.58	3.97	4.05	4.16	32.6	0	0.00	0.0
10.5	82.1	6.10	5.95	5.99	5.95	35.9	0	0.00	0.0
13.5	85.3	8.20	8.05	7.81	7.72	35.4	0	0.00	0.0
16.5	93.4	9.85	9.42	9.36	9.26	30.9	1027	0.26	5.2
19.5	95.0	10.20	10.62	10.62	10.62	27.2	2578	0.66	7.9
22.5	116.9	11.81	11.84	11.89	11.91	25.7	5004	1.27	12.4
25.5	162.4	13.50	13.20	13.21	13.22	26.3	7544	1.92	12.9
28.5	123.8	14.30	14.60	14.57	14.57	27.0	9595	2.44	10.4
31.5	138.0	16.00	15.90	15.93	15.98	28.2	10162	2.59	2.9
34.5	151.0	17.40	17.29	17.44	17.51	30.6	10295	2.62	0.7
37.5	160.0	18.48	19.13	19.16	19.19	22.5	10311	2.62	0.1
40.5	186.2	21.50	21.06	20.95	20.82	32.7	10311	2.62	0.0
43.5	200.9	23.20	22.66	22.34	22.15	26.6	10311	2.62	0.0
46.5	201.5	23.27	23.31	23.15	23.03	17.7	10311	2.62	0.0
49.5	202.3	23.36	23.36	23.25	23.19	11.1	10311	2.62	0.0
52.5	202.4	23.38	23.37	23.27	23.24	1.5	10311	2.62	0.0

11 - Milho no estádio 2, lâmina de 25 mm, spray giratório ("rotator"), 06/01/94.

Tempo	Aplicação						Escoamento		
	Acumulada					Taxa	Acumulado		Taxa
min	ml	mm	F1	F2	F3	mm/h	ml	mm	mm/h
0.0	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0	0	0.00	0.0
1.0	5.0	0.58	0.90	1.18	1.34	40.2	0	0.00	0.0
3.0	18.5	2.14	2.63	2.84	2.97	48.9	0	0.00	0.0
5.0	44.9	5.19	4.97	4.89	4.91	58.1	0	0.00	0.0
7.0	65.7	7.59	7.06	6.99	6.87	58.9	0	0.00	0.0
9.0	72.8	8.40	8.95	8.73	8.61	52.3	1070	0.27	8.2
11.0	94.0	10.86	10.17	10.12	10.02	42.1	3714	0.94	20.2
13.0	94.4	11.25	11.23	11.20	11.19	35.1	6870	1.75	24.1
15.0	100.4	11.59	12.20	12.23	12.24	31.6	8470	2.16	12.2
17.0	119.2	13.76	13.26	13.28	13.33	32.7	10945	2.79	18.9
19.0	125.0	14.44	14.37	14.47	14.55	36.6	14293	3.64	25.6
21.0	129.0	14.90	15.79	15.89	15.95	42.1	17387	4.42	23.6
23.0	156.2	18.04	17.52	17.48	17.52	46.9	20493	5.21	23.7
25.0	170.1	19.64	19.14	19.17	19.12	48.1	23563	6.00	23.4
27.0	181.0	19.75	20.84	20.70	20.81	50.7	24931	6.34	10.4
29.0	200.4	23.14	22.11	22.55	22.36	26.7	25145	6.40	1.6
31.0	203.0	23.44	23.41	23.38	23.35	2.2	24145	6.40	0.0

12 - Milho no estádio 2, lâmina de 25 mm, spray fixo, 06/01/94.

Tempo	Aplicação						Escoamento		
	Acumulada					Taxa	Acumulado		Taxa
min	ml	mm	F1	F2	F3	mm/h	ml	mm	mm/h
0.00	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0	0	0.00	0.0
0.75	18.3	1.88	1.72	1.80	1.87	74.7	0	0.00	0.0
2.25	37.2	3.29	3.67	3.80	3.86	79.9	0	0.00	0.0
3.75	59.7	5.85	6.01	5.99	6.00	85.5	454	0.09	3.5
5.25	76.9	8.88	8.29	8.21	8.12	84.8	1537	0.29	8.3
6.75	96.7	10.15	10.34	10.16	10.05	77.3	3994	0.76	18.8
8.25	103.9	12.00	11.85	11.79	11.67	64.6	8020	1.53	30.8
9.75	116.0	13.40	13.17	13.06	12.98	52.5	12783	2.44	36.4
11.25	122.1	14.10	14.17	14.10	14.04	42.1	17771	3.39	38.1
12.75	129.9	15.00	14.97	14.95	14.60	34.6	24738	4.72	53.2
14.25	136.8	15.80	14.70	15.66	15.76	34.2	32959	6.29	62.8
15.75	141.1	16.30	16.30	16.66	16.79	41.3	41497	7.92	65.2
17.25	145.5	16.80	18.00	18.04	18.24	58.1	49883	9.52	64.0
18.75	180.9	20.89	19.83	20.01	19.97	69.3	57480	10.97	58.0
20.25	188.7	21.79	22.21	21.86	21.82	73.9	61338	11.71	29.5
21.75	207.3	23.94	23.54	23.58	23.78	36.5	62497	11.93	8.9
23.25	215.6	24.90	24.88	24.86	24.85	2.4	62559	11.94	0.5
24.75	216.1	24.93	24.90	24.89	24.87	0.0	62559	11.94	0.0

13 - Milho no estádio 3, lâmina de 6 mm, aspersor de impacto, 03/02/94.

Tempo	Aplicação						Escoamento		
	Acumulada					Taxa	Acumulado		Taxa
min	ml	mm	F1	F2	F3	mm/h	ml	mm	mm/h
0.00	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0	0	0.00	0.0
0.75	1.3	0.15	0.30	0.40	0.46	18.6	0	0.00	0.0
2.25	6.5	0.75	0.91	0.99	1.02	22.3	0	0.00	0.0
3.75	15.8	1.82	1.75	1.67	1.64	24.9	53	0.01	0.5
5.25	21.9	2.54	2.35	2.27	2.21	22.5	89	0.02	0.4
6.75	23.5	2.69	2.71	2.68	2.66	18.0	420	0.10	3.2
8.25	25.1	2.90	2.99	3.02	3.00	13.6	523	0.13	1.0
9.75	30.5	3.52	3.37	3.29	3.24	9.9	523	0.13	0.0
11.25	31.9	3.69	3.50	3.42	3.35	4.4	523	0.13	0.0
12.75	28.6	3.30	3.38	3.38	3.39	1.5	523	0.13	0.0
14.25	28.3	3.27	3.32	3.36	3.38	0.0	523	0.13	0.0

14 - Milho no estádio 3, lâmina de 6 mm, spray giratório ("rotator"), 03/02/94.

Tempo	Aplicação						Escoamento		
	Acumulada					Taxa	Acumulado		Taxa
min	ml	mm	F1	F2	F3	mm/h	ml	mm	mm/h
0.0	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0	0	0.00	0.0
0.5	4.1	0.47	0.63	0.64	0.66	39.7	0	0.00	0.0
1.5	12.3	1.42	1.28	1.35	1.34	40.8	0	0.00	0.0
2.5	17.0	1.96	2.13	2.04	2.03	41.2	39	0.01	0.3
3.5	26.0	3.01	2.70	2.70	2.65	37.0	157	0.04	2.1
4.5	27.2	3.14	3.27	3.20	3.17	31.3	393	0.10	3.6
5.5	31.7	3.66	3.63	3.60	3.55	22.9	511	0.13	1.8
6.5	35.4	4.09	3.91	3.84	3.78	14.0	589	0.15	1.2
7.5	34.6	3.99	3.97	3.95	3.93	1.1	589	0.15	0.0

15 - Milho no estágio 3, lâmina de 6 mm, spray fixo, 03/02/94.

Tempo	Aplicação						Escoamento		
	Acumulada					Taxa	Acumulado		Taxa
min	ml	mm	F1	F2	F3	mm/h	ml	mm	mm/h
0.0	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0	0	0.00	0.0
0.5	2.3	0.27	0.60	0.71	0.82	49.0	0	0.00	0.0
1.5	13.2	1.52	1.54	1.74	1.78	57.2	8	0.00	0.1
2.5	24.6	2.84	3.07	2.88	2.85	64.4	118	0.03	1.7
3.5	31.8	3.37	4.02	3.94	3.73	53.0	314	0.08	3.0
4.5	37.9	4.37	4.72	4.39	4.29	33.3	550	0.14	3.6
5.5	38.5	4.45	4.42	4.44	4.36	10.6	825	0.21	4.2
6.5	37.1	4.28	4.48	4.46	4.42	2.3	943	0.24	1.8
7.5	38.7	4.47	4.45	4.45	4.44	0.0	1022	0.26	1.2
8.5	38.7	4.47	4.45	4.45	4.44	0.0	1022	0.26	0.0

APÊNDICE 2

Planilhas dos dados de taxa de aplicação e de escoamento dos testes de infiltração

- Tempo : tempo médio do intervalo
- Aplicação :
 - Acumulada :
 - ml : volume de aplicação coletado após cada intervalo, resultante da média de 6 calhas e quatro linhas de coletores por calha
 - mm : volume de aplicação coletado transformado em lâmina
 - F1 : lâmina de aplicação após a utilização da média móvel por uma vez
 - F2 : lâmina de aplicação após a utilização da média móvel por duas vezes
 - F3 : lâmina de aplicação após a utilização da média móvel por três vezes
 - Taxa : taxa de aplicação em cada intervalo de tempo obtida por diferenciação numérica da coluna F3
- Escoamento :
 - Acumulado
 - ml : volume de escoamento acumulado após cada intervalo, resultante da média de 6 calhas
 - mm : volume de escoamento transformado em lâmina
 - F1 : lâmina de escoamento após a utilização da média móvel por uma vez
 - F2 : lâmina de escoamento após a utilização da média móvel por duas vezes
 - F3 : lâmina de escoamento após a utilização da média móvel por três vezes
 - Taxa : taxa de escoamento em cada intervalo obtida por diferenciação numérica da coluna F3
- Taxa de infiltração : diferença entre a taxa de aplicação e de escoamento em cada intervalo de tempo

1 - Umidade do solo de 22 % em peso, 09/11/93

Tempo	Aplicação						Escoamento						Taxa de Infiltração	
	Acumulada						Acumulada							Taxa
	ml	mm	F1	F2	F3	Taxa	ml	mm	F1	F2	F3	mm/h		
min	ml	mm	F1	F2	F3	mm/h	ml	mm	F1	F2	F3	mm/h	mm/h	
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
1	6.81	0.79	0.97	1.09	1.17	35.02	0	0.00	0.00	0.00	0.02	0.74	34.29	
3	18.38	2.12	2.31	2.41	2.51	40.32	0	0.00	0.01	0.07	0.13	3.05	37.27	
5	34.94	4.03	3.94	4.03	4.12	48.34	137	0.03	0.20	0.31	0.41	8.44	39.90	
7	49.00	5.66	5.84	5.93	5.99	56.01	2198	0.56	0.71	0.85	0.95	16.30	39.71	
9	67.81	7.83	8.00	8.01	8.02	61.06	5982	1.52	1.64	1.70	1.76	24.41	36.64	
11	91.13	10.52	10.18	10.14	10.08	61.74	11141	2.84	2.76	2.75	2.75	29.54	32.19	
13	105.50	12.18	12.23	12.10	12.02	58.26	15377	3.91	3.84	3.80	3.78	30.81	27.45	
15	121.00	13.97	13.90	13.83	13.75	51.74	18800	4.78	4.80	4.78	4.76	29.48	22.26	
17	134.56	15.54	15.38	15.31	15.24	44.71	22468	5.72	5.70	5.69	5.67	27.39	17.32	
19	143.88	16.62	16.66	16.57	16.53	38.84	25878	6.59	6.58	6.54	6.51	25.16	13.68	
21	154.25	17.81	17.69	17.72	17.66	33.90	29270	7.45	7.34	7.30	7.25	22.07	11.83	
23	161.31	18.63	18.81	18.70	18.67	30.20	31414	7.99	7.97	7.90	7.85	18.07	12.13	
25	173.13	19.99	19.60	19.59	19.50	24.60	33026	8.46	8.40	8.35	8.29	13.35	11.45	

2 - Umidade do solo de 18,5 % em peso, 14/11/93

Tempo	Aplicação						Escoamento						Taxa de Infiltração
	Acumulado						Acumulado						
	mm	F1	F2	F3	mm/h	Taxa	ml	mm	F1	F2	F3	mm/h	
min	ml	mm	F1	F2	F3	mm/h	ml	mm	F1	F2	F3	mm/h	mm/h
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	13.50	1.56	1.63	1.72	1.79	26.83	0	0.00	0.00	0.00	0.02	0.31	26.62
6	28.75	3.32	3.53	3.65	3.75	29.42	0	0.00	0.00	0.05	0.11	1.42	28.81
10	49.50	5.72	5.78	5.88	5.95	32.93	0	0.00	0.16	0.27	0.36	3.81	29.06
14	72.00	8.32	8.33	8.31	8.34	35.93	1908	0.49	0.65	0.77	0.88	7.81	28.23
18	95.00	10.97	10.80	10.83	10.85	37.66	5803	1.48	1.49	1.61	1.71	12.42	25.26
22	113.50	13.11	13.37	13.42	13.46	39.09	9864	2.51	2.69	2.74	2.82	16.68	22.37
26	138.53	16.03	16.08	16.12	16.19	40.96	16007	4.07	4.05	4.11	4.16	20.08	20.87
30	165.33	19.09	18.92	19.03	19.04	42.82	21879	5.57	5.60	5.63	5.67	22.67	20.17
34	187.33	21.63	22.08	21.98	21.99	44.19	28139	7.16	7.23	7.27	7.31	24.50	19.66
38	220.83	25.50	24.94	24.96	24.93	44.19	35278	8.98	8.99	9.01	9.02	25.81	18.40
42	239.75	27.69	27.86	27.86	27.88	44.16	42730	10.82	10.82	10.76	10.77	26.20	18.02
46	263.25	30.40	30.78	30.81	30.79	43.67	49962	12.66	12.53	12.51	12.51	26.11	17.57
50	296.67	34.26	33.79	33.69	33.64	42.79	55616	14.10	14.19	14.23	14.25	26.07	16.74
54	317.83	36.71	36.51	36.42	36.35	40.62	62364	15.82	15.95	16.00	16.02	26.65	14.02
58	333.92	38.56	38.97	38.94	38.90	38.19	70728	17.95	17.84	17.85	17.82	27.03	11.20
62	360.50	41.63	41.33	41.33	41.27	35.64	77856	19.76	19.74	19.62	19.55	25.90	9.74
66	379.33	43.81	43.70	43.55	43.48	33.06	84801	21.53	21.28	21.18	21.09	23.05	9.91
70	395.25	45.65	45.62	45.55	45.42	29.09	88851	22.56	22.52	22.47	22.41	19.84	9.32