

Seleção de Métodos e Avaliação do Desempenho de Sistemas de Irrigação Pressurizados



República Federativa do Brasil

Luiz Inácio Lula da Silva
Presidente

Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento

Roberto Rodrigues
Ministro

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

Conselho de Administração

Luís Carlos Guedes Pinto
Presidente

Sílvio Crestana
Vice-Presidente

Alexandre Kalil Pires
Hélio Tollini

Ernesto Paterniani
Marcelo Barbosa Saintive
Membros

Diretoria Executiva da Embrapa

Sílvio Crestana
Diretor-Presidente

Tatiana Deane de Abreu Sá
José Geraldo Eugênio de França
Kepler Euclides Filho
Diretores-Executivos

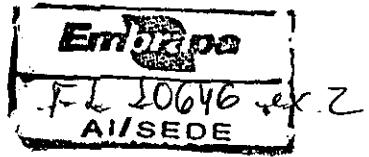
Embrapa Meio-Norte

Valdemício Ferreira de Sousa
Chefe-Geral

Aderson Soares de Andrade Júnior
Chefe-Adjunto de Pesquisa e Desenvolvimento

Paulo Henrique Soares da Silva
Chefe-Adjunto de Comunicação e Negócios

Valdomiro Aurélio Barbosa de Souza
Chefe-Adjunto de Administração



ISSN 0104-866X

Dezembro, 2005

*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Centro de Pesquisa Agropecuária do Meio-Norte
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento*

Documentos 109

Seleção de Métodos e Avaliação do Desempenho de Sistemas de Irrigação Pressurizados

**Aderson Soares de Andrade Júnior
Braz Henrique Nunes Rodrigues
Edson Alves Bastos
Cláudio Ricardo da Silva**

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

Embrapa Meio-Norte

Av. Duque de Caxias, 5.650, Bairro Buenos Aires

Caixa Postal 01

CEP 64006-220 Teresina, PI.

Fone: (86) 3225-1141

Fax: (86) 3225-1142

Home page: www.cpamn.embrapa.br

E-mail: sac@cpamn.embrapa.br

Comitê de Publicações

Presidente: Edson Alves Bastos

Secretária-executiva: Úrsula Maria Barros de Araújo

Membros: Aderson Soares de Andrade Júnior, Cristina Arzabe,
Maurisrael de Moura Rocha, Francisco José de Seixas Santos, José
Almeida Pereira e Maria do Perpétuo Socorro Cortez Bona do
Nascimento

Supervisor editorial: Lígia Maria Rolim Bandeira

Revisor de texto: Lígia Maria Rolim Bandeira

Normalização bibliográfica: Orlane da Silva Maia

Editoração eletrônica: Erlândio Santos de Resende

Fotos da capa: Waldir Aparecido Marovelli

1ª edição

1ª impressão (2005): 300 exemplares

Todos os direitos reservados.

A reprodução não-autorizada desta publicação, no todo ou em parte,
constitui violação dos direitos autorais (Lei no 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Embrapa Meio-Norte

Seleção de métodos e avaliação do desempenho de sistemas de
irrigação pressurizados / Aderson Soares de Andrade Júnior ... [et
al.]. - Teresina : Embrapa Meio-Norte, 2005.

44 p. ; 21 cm. - (Documentos / Embrapa Meio-Norte, ISSN 0104-
866X ; 109).

1. Irrigação. 2. Água. 3. Pressurização. I. Andrade Júnior, Aderson
Soares de. II. Embrapa Meio-Norte. III. Série.

CDD 631.587 (21. ed.)

© Embrapa, 2005

Autores

Aderson Soares de Andrade Júnior

Engenheiro Agrônomo, Doutor em Irrigação e Drenagem,
Bolsista PQ-CNPq,
Embrapa Meio-Norte, Caixa Postal 1, CEP 64006-220
Teresina, PI.
aderson@cpamn.embrapa.br

Braz Henrique Nunes Rodrigues

Engenheiro Agrícola, Mestre em Irrigação e Drenagem,
Embrapa Meio-Norte, Caixa Postal 1, CEP 64006-220,
Teresina, PI.
braz@cpamn.embrapa.br

Edson Alves Bastos

Engenheiro Agrônomo, Doutor em Irrigação e Drenagem,
Embrapa Meio-Norte, Caixa Postal 1, CEP 64006-220
Teresina, PI.
edson@cpamn.embrapa.br

Cláudio Ricardo da Silva

Engenheiro Agrônomo, Doutor em Irrigação e Drenagem,
Bolsista DCR FAPEPI/CNPq,
Embrapa Meio-Norte, Caixa Postal 1, CEP 64006-220
Teresina, PI.
claudio@cpamn.embrapa.br

Apresentação

A água é um recurso natural não renovável e cada vez mais escasso em termos de quantidade e de qualidade. Por isso, os seus principais usuários, os irrigantes, devem utilizá-la com a maior eficiência possível, levando-se em conta os aspectos econômicos que envolvem toda atividade produtiva.

O uso racional da água é de fundamental importância para a promoção do desenvolvimento ótimo dos cultivos irrigados. Contudo, a falta de conhecimentos e/ou de dados para um adequado manejo de irrigação (agronômico e hidráulico) tem feito com que a sua adoção não seja prática rotineira nas áreas irrigadas.

Outro aspecto importante diz respeito à escolha adequada do método de irrigação a ser utilizado. Essa seleção constitui-se em um dos requerimentos básicos essenciais ao sucesso da agricultura irrigada, devendo ser levado em consideração os aspectos técnicos, econômicos e sociais.

Nesta publicação, busca-se apresentar os conhecimentos técnicos básicos quanto à seleção dos métodos, manejo de água e ao desempenho dos sistemas de irrigação, de modo a permitir que os requerimentos hídricos dos cultivos sejam atendidos com maior eficiência, notadamente, quando se faz opção pelo uso de sistemas de irrigação pressurizados.

Valdemício Ferreira de Sousa
Chefe-Geral da Embrapa Meio-Norte

Sumário

Seleção de Métodos e Avaliação do Desempenho de Sistemas de Irrigação Pressurizados	9
Introdução	9
Seleção de métodos de irrigação	10
Irrigação subsuperficial	11
Irrigação por superfície	11
Irrigação por aspersão	12
Irrigação localizada	12
Uniformidade de distribuição de água	14
Sistemas de irrigação por aspersão convencional	14
Sistemas de irrigação por aspersão pivô central	19
Sistemas de irrigação localizada	25
Eficiência de aplicação de água	31
Sistemas de irrigação por aspersão	31
Sistemas de irrigação localizada	35
Considerações Finais	41
Referências Bibliográficas	41

Seleção de Métodos e Avaliação do Desempenho de Sistemas de Irrigação Pressurizados

Aderson Soares de Andrade Júnior

Braz Henrique Nunes Rodrigues

Edson Alves Bastos

Cláudio Ricardo da Silva

Introdução

A escolha adequada do método de irrigação a ser utilizado constitui-se em um dos requerimentos básicos essenciais ao sucesso da agricultura irrigada. Nessa seleção, devem ser considerados os aspectos técnicos, econômicos e sociais, possibilitando a melhor adequação do método a cada situação em particular.

A água é um recurso natural não renovável e cada vez mais escasso em termos de quantidade e de qualidade. Por isso, os seus principais usuários, os irrigantes, devem utilizá-la com a maior eficiência possível, levando-se em conta os aspectos econômicos que envolvem toda a atividade produtiva.

O uso racional da água é de fundamental importância para a promoção do desenvolvimento ótimo dos cultivos irrigados. Contudo, a falta de conhecimentos e/ou de dados para um adequado manejo de irrigação (agronômico e hidráulico), aliado ao baixo custo da água, como reflexo das reduzidas tarifas de energia elétrica praticadas, têm feito com que a sua adoção não seja prática rotineira nas áreas irrigadas.

Por isso, torna-se importante a ampliação dos conhecimentos básicos quanto à seleção do método, sobre o uso da água, e em particular quanto à performance dos sistemas de irrigação, de modo a permitir que os requerimentos hídricos dos cultivos sejam atendidos com maior eficiência, notadamente, quando se faz opção pelo uso de sistemas de irrigação pressurizados.

Seleção de métodos de irrigação

Diversos métodos de irrigação podem ser usados para aplicar água às plantas. A evolução histórica da irrigação mostra que as primeiras maneiras utilizadas, pelo homem, para fornecer água às plantas foram:

- i) Desvio e represa das águas dos rios.
- ii) Uso dos regadores manuais.
- iii) Os processos mecânicos de aspersão.
- iv) Os procedimentos atuais da irrigação localizada.

Esses avanços não diminuíram o mérito e nem a aplicabilidade dos rústicos métodos antigos. Cada situação tem seu(s) método(s) mais adequado(s).

Segundo a forma de aplicação de água às plantas, a engenharia de irrigação pode ser dividida em três categorias:

- i) Irrigação por superfície, conhecida também como irrigação por gravidade.
- ii) Irrigação sob pressão ou pressurizada.
- iii) Irrigação subterrânea ou sub-superficial.

Na irrigação por superfície, a água alcança as plantas de forma direta por escoamento sobre a superfície do terreno cultivado. Normalmente, na maioria dos casos, há a necessidade do bombeamento da água desde a fonte de abastecimento até, pelo menos, o canal principal. Na irrigação pressurizada, a água é conduzida desde a fonte de abastecimento até a área cultivada (impulsionada por uma estação de bombeamento), através de tubulações ou condutos forçados, e é distribuída às plantas mediante dispositivos especiais. Na irrigação subterrânea ou subsuperficial, a água alcança as raízes das plantas por ascensão capilar a partir da elevação do lençol freático. Pelas particularidades inerentes a essa categoria de irrigação, somente é possível sua aplicação em situações de solo, topografia e relevo muito especiais.

As categorias de irrigação podem ser subdivididas em métodos de irrigação e estes, por sua vez, em sistemas de irrigação. Dessa forma, dentro da categoria de irrigação por superfície incluem-se os chamados métodos de irrigação superficiais. Os métodos de irrigação superficiais são subdivididos em três principais sistemas de irrigação:

- a) Irrigação por sulcos.
- b) Irrigação por faixas.
- c) Irrigação por inundação.

Por sua vez, a categoria de irrigação pressurizada é subdividida nos seguintes métodos e sistemas de irrigação:

i) Método de irrigação por aspersão:

- a) Sistema de irrigação por aspersão convencional (fixo, portátil e semi-portátil).
- b) Sistema de irrigação pivô central.
- c) Sistema de irrigação lateral móvel.
- d) Sistema de irrigação autopropelido.

ii) Método de irrigação localizada:

- a) Sistema de irrigação por microaspersão.
- b) Sistema de irrigação por gotejamento (acima e abaixo da superfície do solo).
- c) Sistema de irrigação por tubos porosos.
- d) Sistema de irrigação xique-xique.
- e) Sistema de irrigação por jato pulsante.
- f) Sistema de irrigação por cápsulas porosas.

A irrigação subterrânea é representada unicamente pelo “método de irrigação” subsuperficial e o “sistema de irrigação” por subirrigação.

Irrigação subsuperficial

O sistema de irrigação por subsuperfície é adaptável para:

- i) Superfícies planas niveladas.
- ii) Solos que possuem uma camada impermeável abaixo da zona radicular ou lençol freático elevado controlável.
- iii) Quase todas as culturas.
- iv) Locais com qualquer condição de ventos.

Irrigação por superfície

O sistema de irrigação por superfície (inundação, faixas e sulcos) é adaptável para:

- i) Superfícies planas e sistematizadas (gradiente de declive de 0 a 0,8 %); solos que possuem velocidade de infiltração básica inferior a 25 mm/h.
- iii) Quase todas as culturas.
- iv) Locais com qualquer condição de ventos.

Irrigação por aspersão

O sistema de irrigação por aspersão é adaptável para:

- i) Superfícies planas e inclinadas (aspersão convencional – móvel ou fixa).
- ii) Qualquer taxa de infiltração de água do solo.
- iii) Todas as culturas.
- iv) Locais com ventos amenos (≤ 2 m/s).

Irrigação localizada

O sistema de irrigação localizada (microaspersão e gotejamento) é adaptável para:

- i) Qualquer gradiente do relevo.
- ii) Qualquer velocidade de infiltração básica.
- iii) Todas as culturas (sistema mais adequado para conviver com problemas de salinidade).
- iv) Locais com qualquer condição de ventos.

Os métodos de irrigação localizada apresentam adaptabilidade a diversas situações. Além das acima citadas, é importante considerar outros aspectos como:

- i) Necessidade de mão-de-obra.
- ii) Necessidade de investimentos iniciais em equipamentos.
- iii) Requerimento de energia.
- iv) Uniformidade de distribuição de água.
- iv) Operacionalidade pelo irrigante.
- vi) Maior eficiência de aplicação de água.

Na verdade, existem variações nas vantagens e limitações no emprego de cada método de irrigação. O certo é que não existe um método de irrigação ideal para

todas as situações. Cada situação em particular deve ser analisada, sugerindo-se soluções em que as vantagens inerentes possam compensar as limitações naturais dos métodos de irrigação.

De um modo geral, duas situações podem ocorrer na prática e afetar a escolha do método e/ou sistema de irrigação (TELLES, 1988):

- i) A água é escassa e/ou apresenta custo elevado – quando os suprimentos de água tornam-se limitados, o sistema de irrigação deve ser projetado e manejado para maximizar a produção por unidade de água aplicada. Nesses casos, se não existirem outras condições limitantes, logicamente, deve-se optar pelos sistemas de irrigação localizada, que aplicam água com maior eficiência em relação aos demais sistemas.
- ii) A terra é escassa e/ou apresenta custo elevado – o sistema de irrigação a ser selecionado deve atender a uma maximização da produção por unidade de área, uma vez que o suprimento de água é facilmente disponível ou os custos de irrigação não são elevados. Nesses casos, se não existirem outras condições limitantes, deve-se optar pelos sistemas de irrigação por aspersão ou por superfície, uma vez que não é exigida elevada eficiência na aplicação de água. Por outro lado, é fundamental que os custos com investimentos – os custos fixos – sejam os menores possíveis para viabilizar economicamente o empreendimento.

Segundo Fancelli e Dourado Netto (2000), no processo de seleção dos métodos de irrigação, os seguintes fatores devem ser considerados:

- i) Potencial hídrico (vazão disponível na propriedade).
- ii) Situação topográfica (dimensão e forma da área, uniformidade topográfica e gradiente de declive).
- iii) Qualidade e custo da água.
- iv) Solo (características morfológicas, capacidade de retenção de água).
- v) Clima (chuva, vento, potencial evaporativo do ar – temperatura e umidade relativa, ocorrência de geadas).
- vi) Culturas (sistema de plantio, densidade de plantio/semeadura, profundidade efetiva das raízes, altura das plantas e valor econômico).

É importante destacar que as situações apresentadas são de caráter geral. Muitas vezes poderá ocorrer a necessidade de definir-se a escolha por um determinado método e/ou sistema de irrigação com base em outros fatores, como por

exemplo: o tipo de solo, a topografia da área, particularidades da cultura a ser explorada, para resolver problemas climáticos ou de salinidade na área irrigada ou até mesmo para adaptar-se ao processo de distribuição de água na área, no caso dos perímetros ou distritos de irrigação.

Uniformidade de distribuição de água

A uniformidade de distribuição de água expressa um índice que define a

qualidade da irrigação com interferência direta no rendimento das culturas. Refere-se à igualdade de distribuição da água aplicada pelos aspersores,

microaspersores ou gotejadores sobre a superfície do solo. Se a uniformidade da

irrigação é baixa, significa que algumas áreas recebem menos água e outras mais

água que a quantidade necessária, causando prejuízos para o desenvolvimento

normal das plantas e acarretando encharcamentos, erosão, perdas de água por

percolação e lavagem de nutrientes.

Existem particularidades na determinação da uniformidade de distribuição de

água quando se empregam sistemas de irrigação por aspersão ou localizada, as

quais serão apresentadas e detalhadas abaixo:

Sistemas de irrigação por aspersão convencional

As principais variáveis que influenciam na determinação do grau de

uniformidade da precipitação são a pressão de operação, os diâmetros dos

bocais dos aspersores, o espaçamento entre os aspersores e a velocidade do

vento (GOMES, 1994). Na Fig. 1, podem ser observados os efeitos do

espaçamento entre aspersores e da velocidade do vento sobre a uniformidade

da distribuição de água dos aspersores.

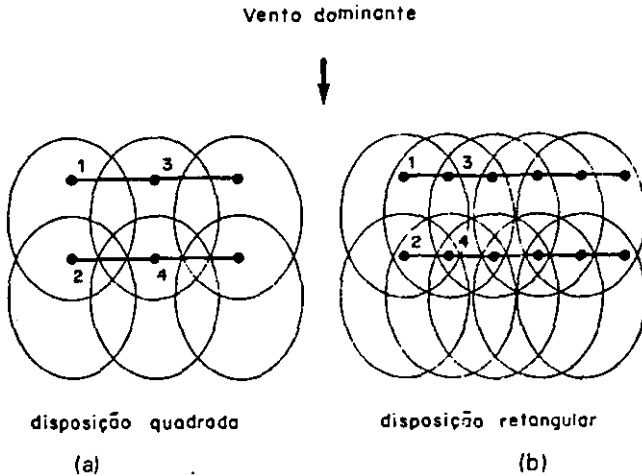


Fig. 1. Formas das áreas molhadas pelos aspersores em disposição quadrada (a) e retangular (b) sujeitas a ventos dominantes.

Fonte: Gomes (1994).

O grau da uniformidade da distribuição de água é avaliado por diversos métodos. Uma forma usual de obtê-los é por medidas de dispersão, expressando-se de forma adimensional, pela comparação com o valor médio. Dentre eles, o mais conhecido e utilizado é o método proposto por Christiansen (1942). Por esse método, o coeficiente de uniformidade (CUC) é obtido em ensaios de campo, podendo-se distribuir os pluviômetros em diferentes formas e arranjos para obtenção da superposição dos valores das lâminas coletadas. Existem diversas formas e arranjos para os pluviômetros nos ensaios:

- i) Disposição em campo – colocam-se os pluviômetros, em malha quadrada ou retangular, entre as linhas laterais e os aspersores a serem avaliados, em condições reais de operação, em campo. Nesse caso, todos os aspersores são operados durante o teste, de modo que a água lançada por eles na área em estudo seja incluída nos cálculos da uniformidade de distribuição. Pode-se, inclusive, efetuar o ensaio em vários pontos da área irrigada, de modo a ter-se uma visão geral do desempenho do sistema. Apresenta como desvantagem a elevada mão-de-obra necessária e o elevado tempo de duração dos testes (Fig. 2c).

- ii) Disposição em malha – utiliza-se um único aspersor com os coletores dispostos em uma amostragem em malha quadrada para coletar a água precipitada. Em seguida, faz-se a simulação dos diversos espaçamentos, originando as diferentes superposições. Esse procedimento de ensaio é o indicado pelas normas da ABNT (NBR 8989) (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1985). É um procedimento versátil e econômico, podendo simular as diversas condições operacionais de projeto com a realização de um único ensaio, o qual poderá ser conduzido em laboratório ou em campo. Contudo, o processo de mensuração das lâminas coletadas é extremamente cansativo e trabalhoso, devido ao elevado número de coletores exigidos nos testes (Fig. 2b).
- iii) Disposição radial – utiliza-se um único aspersor com os coletores dispostos em uma amostragem radial. Os coletores são dispostos em quatro eixos ortogonais, centrados no aspersor. Geralmente, os coletores são espaçados de 2 m, sendo que o primeiro coletor situa-se a 1 m do aspersor. O cálculo da uniformidade de distribuição é processado com as médias obtidas nos quatro semi-eixos ortogonais. Constitui-se em uma simplificação do procedimento padrão recomendado pela ABNT, uma vez que se reduz sensivelmente a quantidade de coletores usados nos testes (Fig. 2a). Maiores detalhes quanto ao procedimento de cálculo e simulação das superposições de diferentes espaçamentos podem ser obtidos em Coelho, Botrel e Olitta (1992a).

Recomenda-se que cada ensaio tenha a duração de pelo menos metade do tempo previsto para a aplicação da lâmina de irrigação no campo.

A uniformidade de distribuição de água pode ser expressa através de diferentes índices como: coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC), coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD) e coeficiente de variação (CV), os quais são obtidos pelas seguintes expressões:

$$CUC = 100 \times \left(1 - \frac{\sum |x_i - \bar{X}|}{n\bar{X}} \right) \dots\dots\dots (1)$$

$$CUD = 100 \times \left(\frac{\bar{X}_{25}}{\bar{X}} \right) \dots\dots\dots (2)$$

$$CV = 100 \times \left(\frac{\sigma}{\bar{X}} \right) \dots\dots\dots (3)$$

em que:

X_i - precipitação coletada no i -ésimo pluviômetro (mm, ml).

\bar{X} - precipitação média dos pluviômetros (mm, ml).

n - número de pluviômetros.

\bar{X}_{25} - precipitação média dos 25%, menores valores (mm, ml).

σ - desvio padrão dos valores de precipitação coletados (mm, ml).

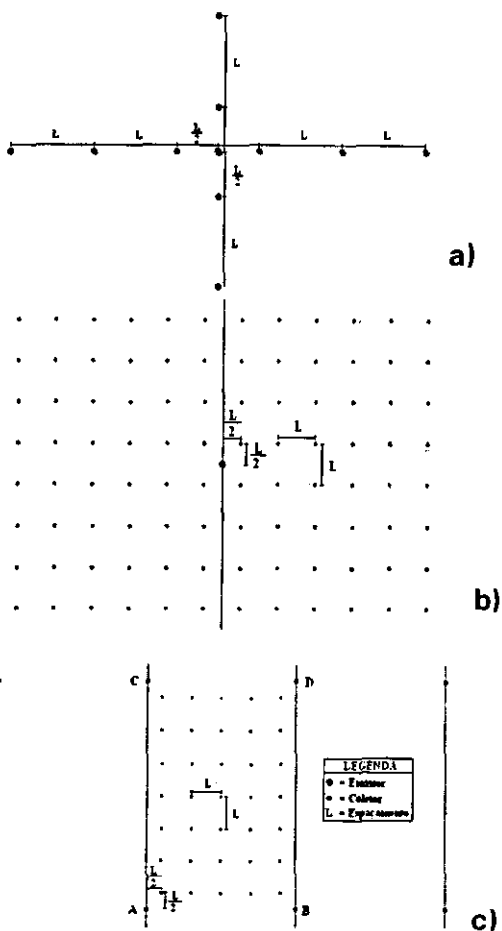


Fig. 2. Disposição dos coletores para a obtenção do grau de uniformidade da irrigação por aspersão convencional: radial (a), malha (b) e campo (c).

Segundo Frizzone (1992), de uma maneira geral, em sistemas de irrigação por aspersão convencional é aceitável, no mínimo, um valor de CUC de 80%. Admitem-se valores menores do que 80% se a precipitação pluvial apresentar um valor significativo durante a estação de cultivo (FRIZZONE, 1992; GOMES, 1994).

Coelho, Nogueira e Conceição (1992b), trabalhando em condições climáticas dos tabuleiros litorâneos do Nordeste, concluíram que o espaçamento 12 x 12 m para os bocais 4,5 x 5,5 mm e 5,0 x 6,5 mm foi o que apresentou maiores valores de uniformidade (acima de 75%), associado aos valores mais adequados de intensidade de precipitação para valores de velocidade do vento de até 21,6 km/h. O espaçamento 18 x 18 m para os bocais 6,0 x 8,5 mm foi o mais adequado para as mesmas condições de velocidades do vento.

Segundo Rocha et al. (1998), a avaliação dos sistemas de irrigação com base na uniformidade de distribuição de água na superfície do solo, desconsiderando-se a redistribuição da água no seu perfil, que é tridimensional e de grande importância nas relações água - solo - planta, pode subestimar a sua eficiência de funcionamento. De fato, esses autores verificaram que os valores de CUC obtidos na superfície do solo foram inferiores aos conseguidos no perfil do solo, mostrando que a uniformidade subsuperficial pouco depende da superficial.

Da mesma forma, Rezende e Freitas (1996), analisando a influência do espaçamento entre aspersores sobre a distribuição de água acima e abaixo da superfície do solo em um sistema de irrigação por aspersão convencional, verificaram que os valores de CUC determinados abaixo da superfície do solo (95,44% e 92,5%) foram superiores aos determinados acima da superfície do solo (88,23% e 74,83%) para os espaçamentos de 12 x 12 e 18 x 18 m, respectivamente. Em estudo similar, avaliando cinco espaçamentos entre aspersores, Vanzela, Zocoler e Hernandez (2004) verificaram que à medida que houve aumento no espaçamento entre aspersores, ocorreu uma redução nos valores de CUC, tanto acima como abaixo da superfície do solo. Contudo, a redução foi menor abaixo do que acima da superfície do solo. Esses autores observaram, ainda, que quando o solo apresenta alta umidade inicial, ocorre uma diminuição nos valores de CUC determinados abaixo da superfície do solo em relação aos determinados acima da superfície do solo, devido às elevadas perdas por percolação profunda quando são adotados os menores espaçamentos.

Verifica-se, portanto, que a exigência de um CUC mínimo de 80%, obtido nos ensaios de campo convencionais, é questionável em função da redistribuição da água no solo.

Sistemas de irrigação por aspersão pivô central

A uniformidade de aplicação de água é influenciada por vários fatores, tais como: variações na vazão dos aspersores (sprays) ao longo da linha lateral; variações nas condições do vento; variações na velocidade de rotação e variações nos bocais dos aspersores ou sprays (elevação, diâmetro, tipo e inclinação) (RAMOS et al., 1995).

O procedimento padrão para a avaliação de desempenho de sistemas de irrigação por aspersão pivô central encontra-se detalhadamente descrito no projeto de norma – PN 12: 02.08.005, da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. Em resumo, esse projeto de norma estabelece as seguintes condições para a realização dos ensaios em campo:

- i) Distribuem os coletores em duas linhas, com ângulo de abertura de 3°, a partir do ponto do pivô. O espaçamento entre os coletores ao longo da linha é, normalmente, de 5 m. Os coletores devem ser colocados em hastes a 50 cm da superfície do solo.
- ii) Regula-se o percentímetro de velocidade a uma taxa de 50%.
- iii) Durante o ensaio, a pressão de operação e a vazão do sistema devem ser monitoradas no ponto do pivô. Para tanto, utilizam-se um manômetro e um hidrômetro;
- iv) Determinam-se a velocidade de deslocamento da última torre e o tempo total de giro do equipamento.
- v) Recomenda-se realizar os ensaios com o percentímetro de velocidade regulado a diferentes taxas de velocidades (pelo menos, a 25% e a 75%).

Como cada coletor representa uma área maior à medida que se afasta do centro do pivô, ao efetuar-se o cálculo da uniformidade de distribuição tem-se que ponderar os volumes coletados. O fator de ponderação usado é o número de ordem do coletor (FRIZZONE, 1992):

$$CUC = 100 \alpha \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n S_i |D_i - \bar{x}_p|}{\sum_{i=1}^n D_i S_i} \right) \dots \dots \dots (4)$$

sendo:

$$\bar{x}_p = \left(\frac{\sum_{i=1}^n D_i S_i}{\sum_{i=1}^n S_i} \right) \dots \dots \dots (5)$$

em que:

\bar{X} – lâmina média ponderada coletada, considerando todos os pluviômetros (mm).

D_i – lâmina coletada em cada pluviômetro a uma distância S_i do pivô (mm).

l – índice que denota um ponto de observação.

Em sistemas de irrigação pivô central, recomendam-se os seguintes valores de CUC (MERRIAN et al., 1973 citado por HEINEMANN; FRIZZONE, 1995):

i) $CUC \geq 88\%$ - para culturas com sistema radicular raso e alto valor econômico.

ii) $88\% > CUC \geq 80\%$ - para culturas com sistema radicular médio.

iii) $80\% > CUC \geq 70\%$ - para fruteiras ou culturas com sistema radicular profundo.

Da mesma forma que na aspersão convencional, observa-se, em sistemas de irrigação pivô central, uma tendência de subestimativa na performance quando se utilizam índices de desempenho determinados apenas na superfície do solo (REZENDE, 1992).

Rodrigues et al. (2001) avaliaram a uniformidade de distribuição de água, tanto acima como no interior do solo, com um pivô central operando em condições de campo. A determinação dos valores de CUC e CUD acima da superfície foi efetuada usando a metodologia padrão da ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1985). Para obtenção da uniformidade no perfil do solo, os valores de umidade do solo, com base em volume, foram obtidos usando TDR (Reflectometria no Domínio do Tempo), a qual é uma técnica simples e que permite a obtenção de resultados em tempo quase real. Obtiveram os seguintes valores dos coeficientes de desempenho: acima da superfície (CUD = 67,12% e CUC = 77,97%) e no perfil do solo (CUD = 86,36% e CUC = 89,19%). Esses resultados demonstram que, no dimensionamento econômico de sistemas de irrigação, os coeficientes de uniformidade obtidos no interior do solo devem ser considerados (Fig. 3 e 4).

Outro aspecto importante na análise da performance de sistemas de irrigação pivô central diz respeito ao custo da melhoria da uniformidade de distribuição de água versus economia de energia. Segundo Heinemann e Frizzone (1995), se um sistema de irrigação por aspersão pivô central tem valores de coeficientes de uniformidade de distribuição baixos, e possui no início e final da linha lateral as pressões designadas no projeto, a causa dessa baixa uniformidade é provavelmente devida a problemas de desgaste e entupimento de bocais dos aspersores

e/ou reguladores de pressão que não estão funcionando corretamente. Faz-se necessário o redimensionamento do sistema visando a substituição do "kit aspersão" por um novo (ANDRADE JÚNIOR; AGUIAR NETTO; BASTOS, 1996), o que representa um custo adicional para o produtor.

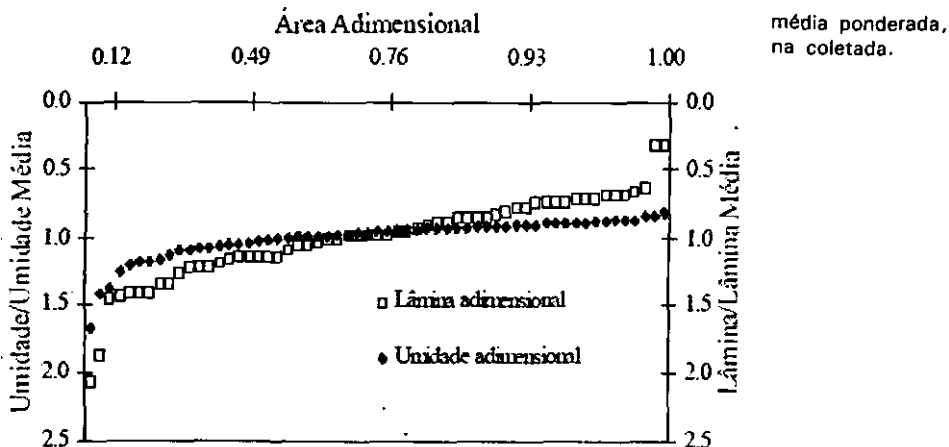
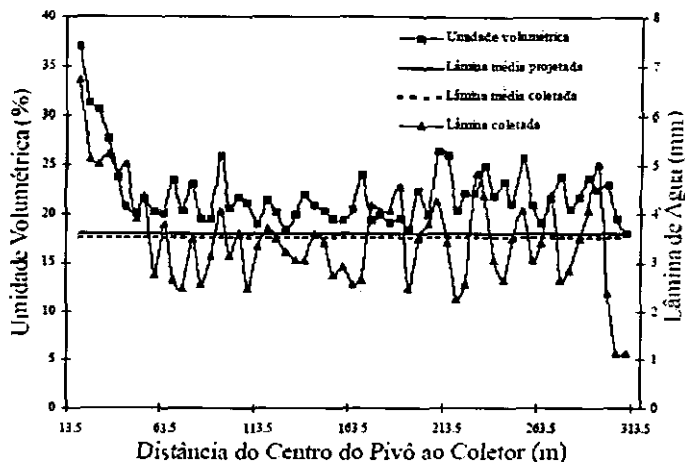


Fig. 4. Distribuição da lâmina coletada e umidade, em relação à área irrigada adimensional.

Fonte: Rodrigues et al. (2001).

A questão é verificar se o custo da melhoria da uniformidade de distribuição de água, com a substituição do "kit aspersão", é viável economicamente. Com esse objetivo, Heinemann e Frizzone (1995) avaliaram três situações diferentes de manejo de irrigação – adequação de 75% (manejo 1), 80% (manejo 2) e 85% (manejo 3) da área irrigada – de um equipamento pivô central nas condições de Guaíra, SP. Duas condições de funcionamento (Tabela 1) foram simuladas a partir de uma avaliação prévia do equipamento, onde as lâminas coletadas foram aleatoriamente alteradas, diminuindo-se o desvio padrão entre as mesmas, mantendo-se constante a lâmina média aritmética, média ponderada e a vazão do sistema (Fig. 5).

Tabela 1. Coeficientes de uniformidade nas condições de funcionamento 1 e 2.

Condição	CUC (%)	Diferença (%)	CV (%)	Diferença (%)
1	81,21	12,79	30,80	22,40
2	94,00	-----	8,40	--

Fonte: Heinemann e Frizzone (1995).

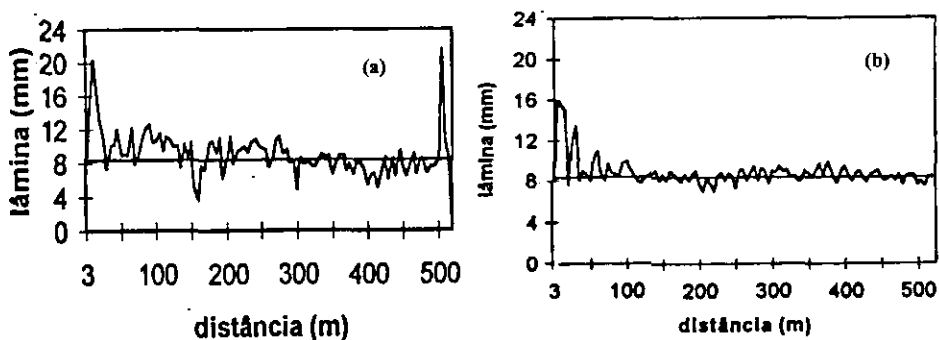


Fig. 5. Distribuição da lâmina de irrigação aplicada nas condições 1 (a) e 2 (b).
Fonte: Heinemann e Frizzone (1995).

A melhoria do CUC de 81,21% (condição 1) para o nível de 94,0% (condição 2) foi responsável por uma economia no volume de água aplicado pelo equipamento de 11,86% (manejo 1), 14,24% (manejo 2) e 16,68% (manejo 3). Para o caso de duas safras de feijão, a troca do "kit aspersão", de três em três anos, somente é viável para um manejo de irrigação que proporcione a adequação de, no mínimo, 80% da área, ou seja, 80% ou mais da área irrigada recebe a lâmina média requerida. Para esse caso, a economia de energia por safra, que a melhoria na distribuição de água proporcionou, foi de 14,77% (Tabelas 2, 3 e 4).

Tabela 2. Resultados obtidos para condição 1 e 2 de funcionamento do equipamento, para uma adequação de 75% da área irrigada.

Parâmetros	Condições	
	1	2
Manejo (%)	75	75
Lâmina (mm)	359,20	316,59
Horas de funcionamento (h)	1.201,64	1.059,09
Volume gasto / safra (m ³)	311.031,28	274.135,28
Energia consumida (kWh)	110.550,88	97.436,28
Custo de energia (US\$)	4.351,81	3.945,25
Economia de energia / safra (US\$)	-----	406,55
Custo - kit aspersão (US\$)	2.580,00	2.580,00

Fonte: Heinemann e Frizzone (1985).

Tabela 3. Resultados obtidos para condição 1 e 2 de funcionamento do equipamento, para uma adequação de 80% da área irrigada.

Parâmetros	Condições	
	1	2
Manejo (%)	80	80
Lâmina (mm)	374,00	320,74
Horas de funcionamento (h)	1.258,87	1.072,97
Volume gasto / safra (m ³)	323.846,60	277.728,77
Energia consumida (kWh)	115.816,04	98.713,24
Custo de energia (US\$)	4.515,03	3.984,84
Economia de energia / safra (US\$)	-----	530,19
Custo – kit aspersão (US\$)	2.580,00	2.580,00

Fonte: Heinemann e Frizzone (1985).

Tabela 4. Resultados obtidos para condição 1 e 2 de funcionamento do equipamento, para uma adequação de 85 % da área irrigada.

Parâmetros	Condições	
	1	2
Manejo (%)	85	85
Lâmina (mm)	390,54	325,38
Horas de funcionamento (h)	1.306,48	1.088,50
Volume gasto / safra (m ³)	338.168,59	281.746,54
Energia consumida (kWh)	120.196,16	100.142,00
Custo de energia (US\$)	4.650,81	4.029,13
Economia de energia / safra (US\$)	-----	621,68
Custo – kit aspersão (US\$)	2.580,00	2.580,00

Fonte: Heinemann e Frizzone (1995).

Sistemas de irrigação localizada

As perdas de água provocadas pela não-uniformidade das vazões dos emissores são indicadas por meio do *coeficiente de uniformidade* (Cu) da irrigação localizada. A uniformidade de distribuição dos emissores depende de vários fatores:

- a) Características hidráulicas dos emissores.
- b) Qualidade da fabricação dos emissores.
- c) Número de emissores por planta.
- d) Variações de pressão por causa das perdas de carga nas tubulações e as diferenças de cotas do terreno (o uso de emissores autocompensantes reduzem bastante esse efeito).
- e) Possíveis entupimentos dos emissores.
- f) Efeito do vento quando se utiliza microaspersores.
- g) Sensibilidade do emissor à temperatura da água na tubulação.

A tendência é que a uniformidade de distribuição de água aumente quando ocorre acréscimo no número de emissores por planta e na sua sensibilidade às variações de temperatura da água de irrigação, bem como quando são promovidas medidas visando à redução dos demais fatores como: menor variação de pressão no sistema, redução no número de emissores com problemas de obstrução e redução no coeficiente de variação de fabricação dos emissores, que reflete a qualidade do emissor utilizado no sistema de irrigação.

O coeficiente de variação de fabricação (v) obtém-se a partir dos valores de vazão medidos em uma amostra de emissores a empregar no projeto, através da seguinte relação estatística:

$$v = \frac{\sigma}{q_{med}} \dots\dots\dots (6)$$

em que:

- v – coeficiente de variação de fabricação (decimal).
- σ – desvio padrão das vazões amostrais (L/h).
- q_{med} – vazão média de todos os emissores (L/h).

O valor de v deve ser fornecido pelo fabricante, sendo normalmente determinado em testes conduzidos em laboratórios de hidráulica. Quanto mais alto for o valor de v menor será a qualidade do emissor. A Tabela 5 indica a classificação dos emissores estabelecida por Solomon (1977) citado por Gomes (1994), segundo o coeficiente de variação de fabricação (v).

Considerando-se os fatores dos quais depende a uniformidade de irrigação, acima mencionados, assumindo-se que os efeitos da temperatura atuam normalmente em favor da uniformidade e que os problemas de obstruções devem estar controlados, Keller e Karmeli (1974) citados por Gomes (1994), estabeleceram uma fórmula estatística para estimar o Cu em função da qualidade do emissor e das condições hidráulicas de funcionamento dos emissores, a qual é bastante utilizada atualmente na fase de dimensionamento do projeto de irrigação:

$$Cu = 100 \times \left(1 - 1,27 \frac{v}{\sqrt{N_e}} \right) \left(\frac{q_{min}}{q_{med}} \right) \dots \dots \dots (7)$$

em que:

Cu – coeficiente de uniformidade de projeto (%).

N_e – número de emissores por planta.

q_{min} – vazão mínima do emissor que corresponde à pressão mínima (L/h).

Tabela 5. Classificação do gotejador segundo seu coeficiente de variação de fabricação.

Coeficiente do gotejador (v)	Qualidade
< 0,05	Excelente
0,05 a 0,07	Médio
0,07 a 0,11	Discreto
0,11 a 0,15	Mal
> 0,15	Péssimo

Fonte: Solomon (1977) citado por Gomes (1994).

É importante salientar que quando o Cu se refere a uma subunidade, a q_{min} corresponde a vazão do emissor submetido à pressão mínima da subunidade e q_{med} será a vazão média de toda a subunidade, podendo ser considerado igual à vazão nominal do emissor utilizado no projeto de irrigação.

O Cu de projeto influi na qualidade e eficiência esperadas da irrigação e no custo das instalações. Quanto maior for o valor de Cu maior será a eficiência e a qualidade da irrigação, e mais cara será a instalação do sistema. Na Tabela 6, estão os valores recomendados de coeficiente de uniformidade de projeto (Cu), em função do espaçamento dos emissores, da declividade do terreno e do tipo de clima da região.

Entretanto, logo depois de instalado o sistema de irrigação e pelo menos uma vez por ano, deve-se determinar o coeficiente de uniformidade experimental (Cu'), geralmente, a partir de dados coletados no campo, com base na seguinte expressão:

$$\dots\dots\dots (8)$$

em que:

$$Cu' = 100 \times \left(\frac{Q_{min}}{Q_{med}} \right) Cu'$$

Cu' – coeficiente de uniformidade experimental (%).
 Q_{min} – média das menores vazões dos emissores, correspondentes a 25% da amostra medida na unidade experimental (L/h).
 Q_{med} – média de todas as vazões dos emissores amostrados (L/h).

Tabela 6. Valores recomendados de Cu segundo o espaçamento dos emissores, topografia do terreno e tipo de clima.

Emissores	Declividade	Cu	
		Clima árido	Clima úmido
Espaçados mais de 4 m em culturas permanentes	Uniforme ($i \leq 2\%$)	90 – 95%	80 – 85%
	Uniforme ou ondulada ($i > 2\%$)	85 – 90%	75 – 80%
Espaçados menos de 2,5 m em culturas permanentes ou semipermanentes	Uniforme ($i \leq 2\%$)	85 – 90%	75 – 80%
	Uniforme ou ondulada ($i > 2\%$)	80 – 90%	70 – 80%

Fonte: Pizarro (1996)

Para facilitar a determinação do Cu' em uma subunidade de irrigação localizada, Merriam e Keller (1978), citados por Pizarro (1996), sugerem amostrar 16 gotejadores (microaspersores). Neste caso, selecionam-se quatro laterais, a primeira, a situada a 1/3 da origem, 2/3 e a última linha. Em cada lateral, selecionam-se quatro emissores com o mesmo critério (primeiro, 1/3, 2/3 e o último) (Fig. 6), coletando-se o volume em um determinado intervalo de tempo. Para linhas laterais de maior comprimento, sugere-se a coleta de dados em oito emissores por linha lateral, selecionando-se os seguintes emissores: o 1º emissor, os emissores situados a 1/7, 2/7, 3/7, 4/7, 5/7, 6/7 e o último emissor.

Adicionalmente à determinação do Cu' , é importante também a definição do coeficiente de uniformidade de pressão (CUP), o qual é obtido pela expressão abaixo:

$$CUP = 100 \times \left(\frac{P_{25}}{\bar{p}} \right)^x \dots\dots\dots (9)$$

sendo que:

$$x = \frac{\log \left(\frac{\bar{q}_1}{\bar{q}_2} \right)}{\log \left(\frac{h_1}{h_2} \right)} \dots\dots\dots (10)$$

em que:

CUP – coeficiente de uniformidade de pressão (%).

p_{25} – média das 25% pressões mais baixas medidas nos mesmos pontos onde se mediu a vazão dos emissores (kPa).

\bar{p} – é a pressão média de todas as medidas efetuadas na subunidade (kPa).

x – coeficiente de descarga do emissor obtido em campo (adimensional).

\bar{q}_1 – média das vazões obtidas com a pressão h_1 .

\bar{q}_2 – média das vazões obtidas com a pressão h_2 .

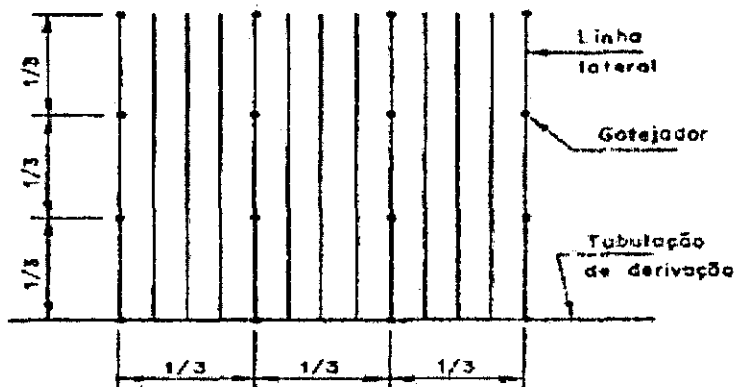


Fig. 6. Posições dos emissores da amostra na subunidade de irrigação.

Da comparação do Cu' com o CUP pode-se determinar a natureza de possíveis problemas de uniformidade, a fim de definir a sua natureza, ou seja, se o mesmo é devido a problemas de diferença de pressão (CUP baixo), de obstrução de emissores (Cu' baixo), que é o caso mais comum, ou a ambos.

É recomendável fazer esta avaliação logo após a instalação do sistema de irrigação e uma vez por ano. Hansen e Bendixen (2004) avaliaram, via 13 amostragens, a irrigação por gotejamento na cultura do morango no Vale de Santa Maria, Califórnia, EUA. Verificaram que, apesar dos emissores e pressões de trabalho diferentes para cada amostragem, em média, a Cu' foi maior do que 80%, concluindo como aceitável. Entretanto, Santos et al. (2003), avaliando a uniformidade de distribuição em irrigação por gotejamento em subsuperfície na cultura da pupunha, verificaram que, após 13 meses da instalação do sistema de irrigação, o valor de Cu' reduziu de 97,5% para 0,2%, devido à intrusão radicular no orifício gotejador.

Atualmente, tem-se discutido se o número "mágico" de 16 emissores poderá não ser o suficiente em função dos valores reais de Cu' e CUP , pois as determinações com uma amostra de apenas 16 emissores, previamente selecionados, impedem a aplicação de critérios estatísticos e dessa forma define os limites de confiança para uma determinada probabilidade. Segundo López et al. (1992), quanto mais baixos esses valores, maior deverá ser o número de emissores a

serem selecionados para as medições em campo, ainda que com 24 emissores, os valores de Cu' e CUP não variaram substancialmente. Viera e Mantovani (2004) avaliaram um sistema de irrigação por gotejamento com 16 e 32 emissores. Verificaram que, em situações onde o sistema de irrigação possui uma manutenção constante, é possível fazer as avaliações de apenas 16 gotejadores, mas onde o sistema de irrigação está com problemas (entupimento), sugerem fazer uma amostragem maior, com 32 emissores.

Uma vez definidos os valores de Cu' e CUP , determinados em cada subunidade de irrigação, é possível fazer inferências quanto à uniformidade de irrigação do sistema como um todo. Para tanto, utiliza-se a seguinte expressão:

$$CUS = 100 \times (Cu' \times f) \dots\dots\dots (11)$$

sendo que:

$$f = \left(\frac{P_{25}}{P_{\min}} \right)^4 \dots\dots\dots (12)$$

em que:

CUS – coeficiente de uniformidade do sistema de irrigação (%).

Cu' – coeficiente de uniformidade médio de todas as subunidades (decimal).

f – fator de ajuste das pressões mínimas do sistema (decimal).

P_{25} – média das 25% pressões mais baixas em todas as subunidades (kPa).

P_{\min} – média de todas as pressões mínimas em todas as subunidades (kPa).

É importante enfatizar que, no caso de sistemas de irrigação por microaspersão, todo o procedimento usado para a determinação do Cu' , CUP e CUS é o mesmo descrito para os sistemas de irrigação por gotejamento acima descrito. Deve-se apenas ajustar o processo de coleta dos volumes no campo, da seguinte forma:

- i) Retiram-se os microaspersores de suas respectivas hastes de sustentação.
- ii) Inserir-los nos recipientes de coleta, tendo-se o cuidado de não deixar precipitar água fora.
- iii) Ajustar o tempo de coleta, devido às maiores vazões dos microaspersores. Normalmente, esse tempo deve ser suficiente para coletar metade do volume do recipiente usado no teste.

Eficiência de aplicação de água

A obtenção de boas produções com a menor quantidade possível de água aplicada torna a irrigação mais efetiva. A eficiência de aplicação de água (E_a) representa a porcentagem de água incorporada ao solo na zona de profundidade efetiva das raízes, sob a forma disponível, em relação à água derivada do reservatório ou rio. Considera-se apenas a água que entra no campo irrigado, desprezando-se as perdas nos canais de condução ou tubulações antes de atingir a área irrigada. Nesse caso, as perdas ocorrem principalmente por evaporação e por percolação profunda (KLAR, 1991).

Dependendo do sistema de irrigação utilizado, o cálculo da eficiência de irrigação e seus desdobramentos assumem determinadas particularidades, as quais serão detalhadas abaixo:

Sistemas de irrigação por aspersão

A avaliação do desempenho de um sistema de irrigação por aspersão pode ser efetuada por meio da análise conjunta da uniformidade de distribuição de água e da eficiência de aplicação de água na área.

A análise de uniformidade dá uma idéia do grau de dispersão das lâminas aplicadas, enquanto a análise de eficiência, com base em uma função de distribuição de probabilidade, dá uma idéia mais abrangente, uma vez que através desta podemos conhecer, dentre outros elementos, o percentual de área em déficit, em excesso de água, a eficiência de aplicação, armazenamento e distribuição, considerando diferentes lâminas de manejo (TEIXEIRA; OLITTA, 1995).

Durante o processo de irrigação, do volume total de água aplicado (V_t), parte fica depositada na zona das raízes, estando disponível às plantas (V_s); outra parte é constituída de perdas potenciais, seja por evaporação (V_{ev}), deriva pelo vento (V_v), percolação (V_p), escoamento superficial (V_e) e interceptação pelas plantas (V_{int}). Frizzone (1992) recomenda os seguintes fatores para atestar a qualidade da irrigação por aspersão:

Eficiência de aplicação (Ea)

Mede a fração do volume total aplicado que ficou disponível para a cultura, dado pela seguinte relação:

$$Ea = \left(\frac{\text{volume de água armazenada na zona das raízes}}{\text{volume aplicado pelo sistema}} \right) = \left(\frac{Vs}{Vt} \right) \times 100 \dots\dots\dots (13)$$

em que:

Ea – eficiência de aplicação (%).

Vs – volume de água armazenada na zona radicular.

Vt – volume total de água aplicado pelo sistema.

É um indicador do excesso de água aplicado no campo durante a irrigação, não refletindo a capacidade da irrigação em repor a lâmina requerida na zona das raízes, não devendo ser analisado isoladamente.

Através da decomposição do volume total nos diversos componentes, tem-se:

$$Ea = \left(\frac{Vs}{V_{ev} + V_v + V_e + V_s + V_p} \right) \times 100 \dots\dots\dots (14)$$

em que:

V_{ev} – perda de água por evaporação.

V_v – perda de água por deriva pelo vento.

V_e – perda de água por escoamento superficial.

V_p – perda de água por percolação profunda.

Multiplicando-se o numerador e denominador da equação (12) por (V_p + V_s), resulta:

$$Ea = \left(\frac{Vs}{V_{ev} + V_v + V_e + V_s + V_p} \right) \left(\frac{V_p + V_s}{V_p + V_s} \right) \times 100 \dots\dots\dots (15)$$

$$Ea = \left(\frac{V_p + V_s}{V_{ev} + V_v + V_e + V_s + V_p} \right) \left(\frac{Vs}{V_p + V_s} \right) \times 100 \dots\dots\dots (16)$$

Com isso, dois novos parâmetros são definidos, quais sejam:

Eficiência de distribuição (Ed)

Mede o volume de água armazenado na profundidade efetiva do sistema radicular em relação ao volume total infiltrado, dando uma idéia das perdas por percolação profunda. É representada numericamente por:

$$E_d = \left(\frac{V_s}{V_s + V_p} \right) \times 100 \quad \dots\dots\dots (17)$$

Eficiência de aplicação em potencial (Eap)

Representa a fração de água aplicada que é absorvida pelo solo através da infiltração. Indica as perdas de água por outros fatores que não a percolação profunda, isto é, deriva ao vento, evaporação, dentre outras, sendo representada por:

$$E_{ap} = \left(\frac{V_p + V_s}{V_{ev} + V_v + V_e + V_s + V_p} \right) \times 100 \quad \dots\dots\dots (18)$$

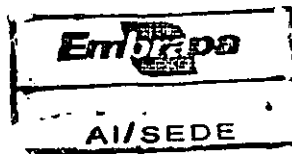
Eficiência de armazenamento (Es)

Representa a fração do armazenamento de água na zona radicular (no momento da irrigação) que foi preenchido pela irrigação:

$$E_s = \left(\frac{V_s}{V_r} \right) \times 100 \quad \dots\dots\dots (19)$$

em que:

V_r – volume de água requerido para preencher o armazenamento de água na zona radicular.



Perda por percolação profunda (Dp)

Fornece uma estimativa das perdas ocorridas por percolação profunda, devido a um excesso de água em pontos da área irrigada, dada pela expressão:

$$D_p = \left(\frac{V_p}{V_l} \right) \times 100 \dots\dots\dots (20)$$

Perfil de distribuição de água

A representação da distribuição de lâminas por área de coleta pode ser feita de três formas:

- i) Utilizando-se os valores numéricos das lâminas coletadas e áreas (ou distâncias) a qual estas representam. Essa forma é muito comum em análises prévias de pivô central.
- ii) Por meio da utilização de valores numéricos de lâminas plotadas contra frequência de área.
- iii) Lâminas adimensionalizadas plotadas contra frequência acumulada de área.

A primeira forma tem a vantagem da identificação pronta de possíveis problemas no campo, uma vez que um valor de lâmina fortemente discrepante da lâmina média é facilmente associado a um ponto fisicamente identificável na área do sistema.

As duas últimas representações trazem a vantagem do ajuste matemático dos valores das lâminas contra a frequência de área, permitindo a simulação do desempenho do sistema para diferentes lâminas de manejo.

A Fig. 7 representa os diferentes fatores de performance de um sistema de irrigação por aspersão. Os valores dos volumes ilustrados podem ser representados via integração numérica, caso a função que ajusta a distribuição seja conhecida. Dentre essas funções, destacam-se as funções de distribuição normal e a gama (TEIXEIRA; OLITTA, 1995).

Maiores detalhes quanto ao uso e comparação dos ajustes fornecidos pelas funções de distribuição normal e gama e seu efeito na variação dos parâmetros de qualidade de irrigação em um sistema pivô central pode ser encontrado em Teixeira e Olitta (1995).

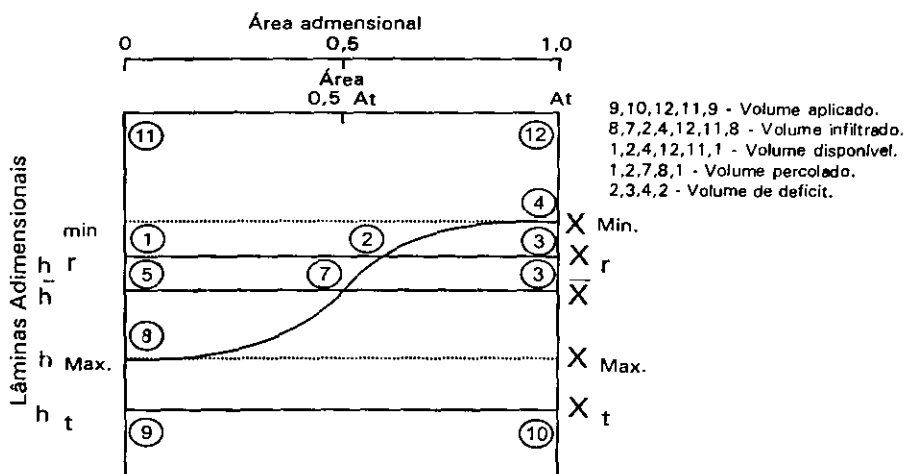


Fig. 7. Perfil de distribuição de água adimensional.
 Fonte: Teixeira e Olitta (1985).

Sistemas de irrigação localizada

Eficiência de armazenamento

Em um sistema de irrigação localizada, normalmente, não se perde água no percurso desde a captação até a saída dos gotejadores ou microaspersores. Em condições de campo, a melhor técnica de controle consiste em se determinar a eficiência de irrigação e o grau de perdas de eficiência no sistema produzidos por duas causas essenciais:

- Falta de uniformidade na distribuição de água nos diferentes emissores (gotejadores ou microaspersores) devido notadamente às variações de pressão nos diferentes pontos do sistema e defeitos de fabricação nos materiais.
- Perdas de água no sistema de irrigação devido a vazamentos e evaporação da água.
- Perdas de água ocorridas no próprio solo em função da evaporação, percolação profunda e escoamento superficial.

As perdas de água no solo por percolação profunda são inevitáveis, principalmente, em solos de textura arenosa como os solos dos Tabuleiros Costeiros, mesmo que os emissores (gotejadores e microaspersores) forneçam a vazão de projeto requerida pela cultura. Entretanto, as maiores perdas por percolação profunda ocorrem devido ao fato dos emissores proporcionarem vazões superiores às de projeto, já que é difícil alcançar-se uma uniformidade absoluta (100%) na vazão dos emissores em todas as unidades de irrigação.

As perdas por percolação podem ser representadas por um coeficiente empírico chamado de *coeficiente de transmissão* (Ks), que expressa a eficiência do solo em armazenar a água saída dos emissores, conhecida como eficiência de armazenamento. Esse coeficiente é de difícil determinação e seu valor pode ser estimado em função da textura do solo, da profundidade das raízes da cultura e do clima da região (Tabela 7).

Os sistemas de irrigação localizada têm significativa vantagem sobre os outros sistemas de irrigação, já que as perdas de água do sistema são desprezíveis. Por exemplo, a evaporação é pequena, já que a água não é projetada ao ar ou não molha toda a superfície do terreno, como na aspersão convencional. Além disso, como normalmente são aplicadas pequenas vazões, o escoamento superficial é praticamente nulo.

Tabela 7. Coeficiente de transmissão (Ks) segundo a textura do solo, clima e profundidade das raízes da planta.

Clima	Profundidade das raízes (m)			Textura do solo		
	Muito arenosa	Arenosa	Média	Argilosa	Média	Muito arenosa
Árido	< 0,75	0,75 a 1,50	> 1,50	0,85	0,90	0,95
	0,90	0,95	1,00	0,95	1,00	1,00
Úmido	< 0,75	0,75 a 1,50	> 1,50	0,85	0,90	0,95
	0,90	0,95	1,00	0,95	1,00	1,00

Fonte: Keller e Karmeli (1974) citados por Gomes (1994).

Eficiência de aplicação

A eficiência de aplicação de água do sistema (E_a) é definida em função da ação conjunta dos coeficientes de uniformidade de distribuição (C_u) e do coeficiente de transmissividade (K_s) pela seguinte relação:

$$E_a = C_u \times K_s \quad \dots\dots\dots (21)$$

em que:

E_a – eficiência de aplicação de água (%)

Em termos de irrigação localizada, consideram-se como aceitáveis valores de E_a iguais ou superiores a 80%. Caso não se obtenha valores dessa ordem, devem ser adotadas medidas visando eliminar as possíveis causas do mau funcionamento do sistema.

Porcentagem de solo umedecido

Outro aspecto da avaliação de um sistema de irrigação localizada consiste em verificar a proporção de solo que participa das mudanças ativas da água e elementos nutritivos, a qual é denominada de porcentagem de solo umedecido (Psu). A porcentagem Psu representa a fração de solo umedecido, em termos de área ou volume, e depende da vazão do emissor, do espaçamento dos emissores, do tipo de solo e do tempo de irrigação.

A determinação do valor de Psu é efetuada dividindo-se a superfície umedecida pela superfície determinada pelos pontos de distribuição contínua. No caso de fruteiras, pode-se calcular Psu comparando-se as somas das superfícies umedecidas pelos diferentes emissores que abastecem cada planta com a superfície delimitada por quatro plantas contínuas.

Na literatura especializada, são raras as referências determinando um valor mínimo ou conveniente de Psu . Isso ocorre em função das dificuldades experimentais, já que as respostas variam em função da cultura, tipo de solo, taxa de evapotranspiração e regime pluviométrico (LÓPEZ et al., 1992). Entretanto, existem algumas recomendações e alguns trabalhos publicados indicando valores ideais de Psu para algumas culturas. Vermeiren e Jobling (1997) recomendam como aceitáveis valores de Psu de 30% a 35%, para regiões áridas, e de 15% a 20%, para regiões úmidas, onde se utilizam irrigações suplementares. Contudo, os sistemas onde Psu é elevado operam com maior segurança, pois no caso de uma eventual falha no sistema tem-se uma

maior garantia no fornecimento de água à cultura, devido às maiores reservas de água no solo. Para a cultura dos citros, sob diversas condições experimentais, parece haver uma certa concordância de *Psu* próxima a 50% (BIELORAI, 1982; CASTEL, 1994; SMAJSTRLA; KOO, 1984; SOUZA et al., 2003). Entretanto, ao definir a *Psu* em função da superfície total do terreno, a mesma é influenciada pela densidade de plantio. Por exemplo, se desejássemos irrigar, com 50% de *Psu*, dois pomares de laranja de mesma idade, variedade e desenvolvimento da copa, porém plantados com espaçamentos diferentes (9 x 5 m e 7 x 5 m), resultaria que no primeiro teríamos que molhar uma área de 22,5 m² e no adensado 17,5 m². Isso implicaria em dimensionar valores diferentes de lâmina de irrigação para plantas idênticas. Por isso, é mais adequado definir um valor de *Psu* em relação à própria planta como, por exemplo, a porcentagem da área sombreada pela planta (LÓPEZ et al., 1992).

Exemplo de avaliação em campo

A fim de ilustrar a avaliação de desempenho de um sistema de irrigação localizada, imaginemos a situação hipotética de um pomar de 24 ha irrigado por um sistema de irrigação por gotejamento. As características do projeto e os dados coletados durante os testes são apresentados na ficha de coleta de dados.

O coeficiente de uniformidade (Cu'), em torno de 96%, é elevado, o que de certa forma já era esperado em função do tipo de emissor usado (autocompensante e $n =$ coeficiente de variação de fabricação = 3,3%). Não ocorreram problemas de obstrução de emissores devido a eficiente filtragem da água efetuada pelos filtros de areia e de tela.

A eficiência de armazenamento de água no solo (Ks) não foi determinada em campo. Entretanto, em função do tipo de solo da área, assumiu-se um valor de $Ks = 95\%$. Dessa forma, a eficiência global do sistema de irrigação é obtida por:

$$Ea = 100(0,95 \times 0,969) = 92,05\%$$

Esse valor de Ea comprova uma boa performance do sistema de irrigação, estando esse em condições operacionais de efetuar a contento o manejo da irrigação e da fertirrigação.

Em se tratando de uma região de clima árido, a porcentagem de solo umedecido (*Psu*) não está muito adequada, notadamente no início e final da linha lateral.

Existe, portanto, a necessidade de ocorrerem melhorias nesse aspecto, o que poderá ser conseguido pela adição extra de emissores por planta ou pelo aumento do intervalo de irrigação, com conseqüente aumento do tempo de irrigação diário.

A adoção dessas medidas, em conjunto ou isoladamente, pode acarretar conseqüências no dimensionamento do sistema e/ou impedimentos operacionais que muitas vezes inviabilizam a sua prática. Por isso, qualquer decisão a ser tomada visando ao equacionamento do problema deve ser bem ponderada sob pena de tornar o sistema de irrigação ineficiente.

Ficha de Coleta de Dados

Parte I. Características Gerais do Projeto

1. Situação atual do projeto: *em operação há oito anos*
 2. Nome do Observador: *Antônio da Silva* Data da Observação: *28/08/1978*
 3. Cultivo: *Citros* Espaçamento: *5 m x 5 m* Idade: *8 anos*
 4. Solo: *Textura média* Observações (infiltração, salinidade, etc):
 5. Fonte de água e qualidade: *Água subterrânea (C1S1)*
 6. Equipamento:
 - (a) Tipo de filtro e características:
 - i) Filtro de areia: área = 0,56 m² com lavagem manual.
 - ii) Filtro de tela na tubulação secundária de 8 L/s e 200 MeshPressão de entrada: 30 a 20 m.c.a Pressão de saída: 26 a 20 m.c.a
 - (b) Fertilizador e características: *tanque 350 L com tubo venturi deslocável*
 - (c) Emissores: *Marca X* Tipo: *Autocompensante*
Pressão e vazão nominal: *4 L/s a 10 m.c.a*
Espaçamento: *1,25 m* Nº de plantas: 3
Obstruções: *pequenas obstruções*
 - (d) Linhas laterais: Diâmetro: *20 mm* Material: *PE* Espaçamento: *5 m*
 7. Condições de funcionamento
 - (a) Freqüência de irrigação: *diária*
 - (b) Tempo de irrigação: *10 h*
 8. Plano do sistema e topografia.
-

Ficha de Coleta de Dados

Parte II. Coleta de Dados

Posição dos emissores na lateral	Repetição	Posição da linha lateral na secundária							
		1°		1/3		2/3		Última	
		V (ml)	Q (L/h)	V (ml)	Q (L/h)	V (ml)	Q (L/h)	V (ml)	Q (L/h)
1°	A	143,0	4,29	143,7	4,31	140,2	4,21	140,7	4,22
	B	144,0	4,32	142,4	4,27	142,0	4,26	141,3	4,24
	Tempo	2 min		2 min		2 min		2 min	
	Média		4,30		4,29		4,23		4,23
1/3	A	146,0	4,38	141,7	4,25	145,0	4,35	139,7	4,19
	B	145,2	4,36	147,0	4,41	144,7	4,34	137,4	4,12
	Tempo	2 min		2 min		2 min		2 min	
	Média		4,37		4,33		4,34		4,15
2/3	A	143,2	4,29	142,7	4,28	146,0	4,38	140,5	4,21
	B	139,7	4,19	146,6	4,40	142,7	4,28	142,7	4,28
	Tempo	2 min		2 min		2 min		2 min	
	Média		4,24		4,34		4,33		4,24
Último	A	140,3	4,21	139,7	4,19	145,6	4,37	136,7	4,10
	B	141,7	4,25	142,3	4,27	143,7	4,31	139,6	4,19
	Tempo	2 min		2 min		2 min		2 min	
	Média		4,23		4,23		4,34		4,14
SU (m ²)		7							
Psu (%)		28		40		32		24	
Q min (L/h)	4,14	Cu = 96,9 %		Ks = 95 %		Ea = 92,05 %			
Q med (L/h)	4,27								

V - volume coletado, Q - vazão e SU - Superfície úmida

Considerações Finais

Dentre as atividades produtivas, a agricultura irrigada é a que apresenta a maior demanda de uso dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos. Por isso, para que a atividade torne-se cada vez mais atrativa, do ponto de vista econômico, sem causar fortes impactos ambientais, é necessária a adoção de técnicas de manejo racional da água de irrigação associada à utilização de métodos de irrigação com alta eficiência no uso da água.

Neste aspecto, o método de irrigação localizada (microaspersão e gotejamento) tem sido o mais utilizado. Contudo, a busca pela eficiência tem ocorrido em outros métodos de irrigação, como no caso da aspersão (pivô central), com a introdução dos emissores tipo LEPA ("Low Energy Precision Application"), que aplicam água de forma localizada, com economia de energia.

Em qualquer método de irrigação, uma vez dimensionado e instalado o projeto de irrigação, é importante verificar se as condições previstas inicialmente se confirmam em campo. Para tanto, é necessário fazer avaliações periódicas em campo, onde se determinam as condições de pressão, vazão e lâminas aplicadas. Os coeficientes CUC, Cu' , CUD são os índices mais utilizados para a verificação da distribuição de água na área irrigada, de forma a manter-se uma boa performance do método de irrigação escolhido.

Referências Bibliográficas

ANDRADE JÚNIOR, A. S.; AGUIAR NETTO, A. O.; BASTOS, E. A. Programa computacional para dimensionamento de sistemas de irrigação pivô central. *Irriga*, Botucatu, v. 1, n. 2, p. 35-45, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8989**: sistemas de irrigação por aspersão pivô central, caracterização e desempenho – método de ensaio; 1º Projeto de Normas. Rio de Janeiro, 1985. 22 p. PN 12:02.08.005.

BIELORAI, H. The effect of partial wetting of the root zone on yield and water use efficiently in a drip and sprinkler-irrigated mature grapefruit grove. *Irrigation Science*, New York, v. 3, p. 89-100, 1982.

CASTEL, J. R. Response of young clementine citrus trees to drip irrigation. I. Irrigation amount and number of drippers. *Journal of Horticultural Science*, Kent, v. 69, n. 3, p. 481-489, 1994.

COELHO, R. D.; BOTREL, T. A.; OLITTA, A. F. L. Ensaios da uniformidade de aplicação de água dos aspersores, com disposição radial de coletores na área. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 21., 1992, Santa Maria. *Anais...* Santa Maria: SBEA: UFSM, 1992a. v. 2, p. 901-914.

COELHO, E. F.; NOGUEIRA, L. C.; CONCEIÇÃO, M. A. F. Comportamento de aspersores de média pressão sob diferentes condições de vento. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 9., 1991, Natal. *Anais...* Fortaleza: ABID, 1992b. v. 1, Tomo 1, p. 153-171.

CHRISTIANSEN, J. E. *Irrigation by sprinkling*. Berkeley: University of California, College of Agriculture, Agricultural Experiment Station, 1942. 124 p. (Bulletin, 670).

FANCELLI, A. L.; DOURADO NETO, D. Irrigação. In: FANCELLI, A. L.; DOURADO NETO, D. *Produção de milho*. Guaíba: Agropecuária, 2000. p. 147-182.

FRIZZONE, J. A. *Irrigação por aspersão: uniformidade e eficiência*. Piracicaba: ESALQ, 1992. 53 p. (Série Didática, 3).

GOMES, H. P. *Engenharia de Irrigação: hidráulica dos sistemas pressurizados, aspersão e gotejamento*. João Pessoa: UFPB, 1994. p. 175-231.

HEINEMANN, A. B.; FRIZZONE, J. A. Custo da melhora da uniformidade de distribuição de água por um pivô central vs. economia de energia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 24., 1995, Viçosa. *Resumos...* Viçosa: SBEA, 1995. p. 189.

KLAR, A. E. A água do solo. In: KLAR, A. E. *Irrigação: frequência e quantidade de aplicação*. São Paulo: Nobel, 1991. p. 129-151.

LOPEZ, J. R.; ABREU, J. M. H.; REGALADO, A. P.; HERNANDEZ, J. F. G. *Riego localizado*. Madri: Mundi-Prensa, 1992. p. 217 - 230.

PIZARRO, F. C. *Riegos localizados de alta frecuencia (RLAF): goteo, microaspersión, exudación*. 3. ed. Madrid: Mundi-Prensa, 1996. 513 p.

RAMOS, M. M.; SOUSA, S. A. V.; MANTOVANI, E. C.; PRUSKI, F. F. Uniformidade de distribuição de água para sistemas pivô central e linear móvel equipados com difusores com placa estriada fixa e rotativa. Viçosa: SBEA, 1995. 14 p.

REZENDE, R. Desempenho de um sistema de irrigação pivô central quanto à uniformidade de aplicação de água, abaixo e acima da superfície. 1992. 88 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba.

REZENDE, R.; FREITAS, P. S. L. Influência do espaçamento entre aspersores na uniformidade de distribuição de água acima e abaixo da superfície do solo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 25., 1996, Bauru. Resumos... Bauru: UNESP: SBEA: ALIA, 1996. p. 305.

ROCHA, E. M. M.; MARURUNGA, S. M. S.; COSTA, R. N. T.; CASTRO, P. T.; AGUIAR, O. S. Uniformidade e eficiência de aplicação de água de irrigação por aspersão convencional na superfície e perfil do solo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 27., 1998, Poços de Caldas. Anais... Poços de Caldas: SBEA: UFLA, 1998. p. 286-288.

RODRIGUES, T. R. I.; BATISTA, H. S.; CARVALHO, J. M.; GONÇALVES, A. O.; MATSURA, E. E. Uniformidade de distribuição de água em pivô central, com a utilização da técnica TDR na superfície e no interior do solo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 5, n. 2, p. 187-191, 2001.

SANTOS, R. A.; HERNANDEZ, F. B. T.; FERREIRA, E. J. S.; VANZELA, L. S.; LIMA, R. C. Uniformidade de distribuição de água em irrigação por gotejamento em sub-superfície instalado na cultura de pupunheiras (*Bactris gasipaes* h.b.k.). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 32., 2003, Goiânia. Resumos... Jaboticabal: SBEA, 2003. 1 CD-ROM.

SMAJSTRLA, A. G.; KOO, R. C. J. Effects of trickle irrigation methods and amounts of water applied on citrus yields. *Proceedings of the Florida State Horticultural Society*, Tallahassee, v. 97, p. 3-7, 1984.

SOUZA, M. J. H.; RAMOS, M. M.; SIQUEIRA, D. L.; COSTA, L. C.; LHAMAS, A. J. M.; MANTOVANI, E. C.; CECON, P. R.; SALOMÃO, L. C. C. Produção e qualidade dos frutos de laranja 'Tahiti' submetida a diferentes porcentagens de área molhada. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 7, n. 2, p. 245-250, 2003.

TEIXEIRA, A. S.; OLITTA, A. F. L. **Eficiência de irrigação pivô central: comparação entre função normal e gama acumulada.** Viçosa: SBEA, 1995. 21 p.

TELLES, D. D. **Métodos de irrigação.** Brasília, DF: ABEAS, 1988. 112 p.

VANZELA, L. S.; ZOCOLER, J. L.; HERNANDEZ, F. B. T. H. Uniformidade de distribuição da água acima e abaixo da superfície do solo em um sistema de irrigação por aspersão convencional. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 31., 2002, Salvador. **Anais...** Jaboticabal: SBEA, 2002. 1 CD-ROM.

VERMEIREN, L.; JOBLING, G. A. **Irrigação localizada.** Campina Grande: UFPB, 1997. 184 p. (Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, 35).



**Ministério da Agricultura,
Pecuária e Abastecimento**

