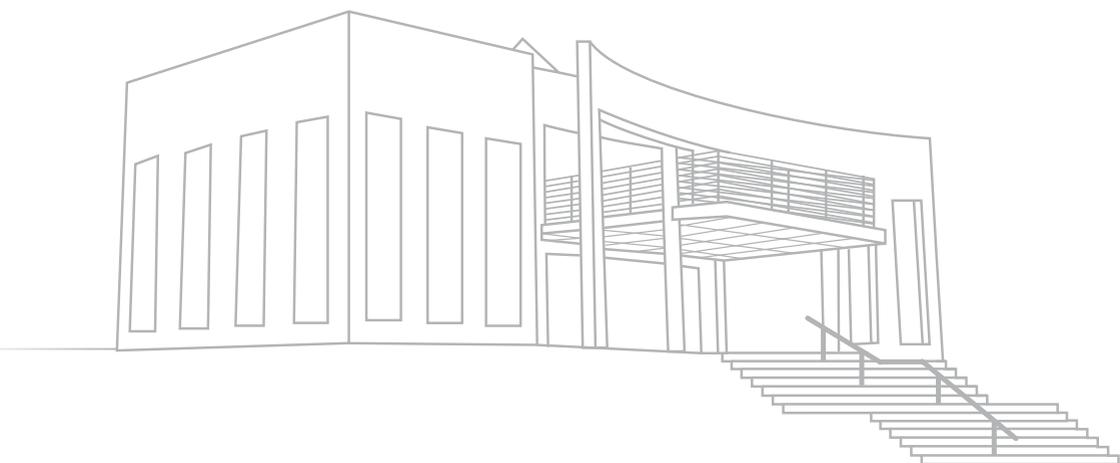


# Sistemas de Irrigação Alternativos de Baixo Custo





# Sistemas de Irrigação Alternativos de Baixo Custo

· Edmar José Scaloppi

© Direitos Reservados

---

Fundação de Estudos e Pesquisas Agrícolas e Florestais  
1ª edição 2011  
tiragem: 2000 exemplares

Capa e Projeto Gráfico  
Bruna Zanotto

Fotografias  
Aline Grego

---

Fundação de Estudos e Pesquisas Agrícolas e Florestais

---

Unesp - Campus de Botucatu  
Fazenda Experimental Lageado  
Rua José Barbosa de Barros, 1780  
18610-307 | Botucatu - SP | Brasil  
Tel: (14) 3882.6300  
fepaf@fca.unesp.br | www.fepaf.org.br

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - SERVIÇO TÉCNICO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

Boletim Técnico / Fundação de Estudos e Pesquisas  
Agrícolas e Florestais. - n. 1 (2010)-. Botucatu :  
Editora FEPAF, 2010-

Irregular  
ISSN 2179-4561

1. Agronomia. 2. Ciências agrônômicas. I. Fundação  
de Estudos e Pesquisas.

É proibida a reprodução total ou parcial, por qualquer meio ou forma, sem a expressa autorização (lei nº 9.610). O conteúdo dos capítulos é de inteira responsabilidade dos seus respectivos autores.



# Prólogo

Edmar José Scaloppi  
PhD em Engenharia de Irrigação,  
Prof. Titular da Faculdade de Ciências Agrônomicas/  
Unesp, Botucatu, SP.

A tecnologia de irrigação pode trazer inúmeros benefícios aos agricultores. O mais importante consiste em viabilizar a atividade produtiva nas propriedades agrícolas durante o ano todo, sem depender da estação chuvosa para reiniciar o processo produtivo sazonal. A intensificação da atividade produtiva deve, em um curto período, transformar as ações da propriedade em atitudes empresariais, melhorando a qualidade de vida das populações rurais. Por outro lado, o fornecimento artificial de água às culturas é reconhecido como o insumo mais caro aplicado à produção agrícola. Esta publicação tem por objetivo apresentar algumas alternativas bem sucedidas de irrigação tecnológica de baixo custo, sem comprometer a qualidade ambiental. A expectativa é motivar com argumentos quantitativos e promover a inserção de um maior número de agricultores em atividades mais lucrativas, eliminando a sazonalidade que penaliza a agricultura tradicional. O crescimento no contingente de agricultores-irrigantes determinará maior atenção dos pesquisadores para a solução de eventuais problemas tecnológicos e ambientais e promoverá, com maior frequência, encontros associativos para encaminhar as discussões e divulgar as soluções mais adequadas. A abordagem dos procedimentos envolvidos foi intencionalmente simplificada para facilitar a compreensão. O fato de não existir um sistema de irrigação ideal, capaz de se constituir na melhor opção técnico-econômica para todas as condições, implica na necessidade de se identificar o sistema mais adequado para cada condição. Também, na atual formatação, esta publicação não tem a pretensão de solucionar todos

os problemas relacionados ao dimensionamento e operação dos sistemas propostos, mas fornecer elementos que possam contribuir para racionalizar a tomada de decisões. Uma característica desfavorável aos sistemas de irrigação apresentados é a ausência de interesses comerciais. Como as empresas de irrigação são responsáveis pelo grande esforço de marketing a favor da agricultura irrigada, esses sistemas acabam sendo marginalizados e sua divulgação passa a depender da iniciativa dos órgãos de extensão governamentais, das instituições de ensino e pesquisa ou das cooperativas diferenciadas que, aparentemente, não tem revelado resultados significativos nesta proposta. Até mesmo em algumas instituições de ensino, os sistemas alternativos de baixo custo não têm merecido uma abordagem compatível com sua importância, em cursos de graduação, pós-graduação ou aperfeiçoamento. A expectativa é que esta publicação possa contribuir para resgatar um valioso recurso tecnológico com inquestionáveis benefícios econômico-sociais aos agricultores.

Botucatu, março de 2011.

***Edmar José Scaloppi, PhD em Engenharia de Irrigação, Prof. Titular da Faculdade de Ciências Agrônomicas/Unesp, Botucatu, SP. Tel. 14-38117165 email: edmar@fca.unesp.br***

# Sumário

INTRODUÇÃO	9
FUNDAMENTOS DE IRRIGAÇÃO	11
Volume de água requerido em irrigação	11
Vazão requerida	12
Água no solo disponível às culturas	13
Sugestão prática para orientar o manejo das irrigações	15
IRRIGAÇÃO DE BAIXO CUSTO POR SULCOS	17
O processo de irrigação por sulcos	18
Dimensionamento	19
Preparo da área a ser irrigada	19
Determinação do comprimento dos sulcos	20
a) Esquema de vazão constante	20
b) Esquema de vazões progressivamente reduzidas	21
Quimigação no sistema por sulcos	24
IRRIGAÇÃO DE BAIXO CUSTO POR ASPERSÃO CONVENCIONAL	27
Introdução	27
Principais componentes	27
Dimensionamento ilustrativo para piquetes rotacionados	29
Cálculo da vazão média dos aspersores	30

# Sumário

Escolha dos aspersores	30
Dimensionamento da unidade de bombeamento (motor e bomba hidráulica)	31
Consumo de energia	32
Material necessário	33
Procedimento de montagem	34
Montagem da linha de fornecimento de água às linhas laterais	34
Montagem das linhas laterais	35
Montagem da adutora	36
Quimigação	36
<b>IRRIGAÇÃO DE BAIXO CUSTO POR GOTEJAMENTO</b>	<b>37</b>
<b>AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO</b>	<b>39</b>
a) Aspersão convencional	40
b) Sulcos	41
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>47</b>

O custo de um sistema de irrigação pode ser avaliado pelo custo anual calculado durante o período de vida útil estimado para seus componentes, que é a soma dos custos de investimento (fixos) e dos custos operacionais (variáveis). A caracterização “baixo custo” aqui empregada refere-se à soma de custos fixos (aquisição de equipamentos, impostos, taxas, seguros, etc.) e custos variáveis (basicamente energia, mão-de-obra e reparos acidentais) computados em base anual.

Deve-se salientar que todo projeto de irrigação com vazão superior a 1 L/s deve requerer o licenciamento ambiental aos órgãos competentes, como a CETESB no Estado de S. Paulo ([www.cetesb.sp.gov.br](http://www.cetesb.sp.gov.br)) e a outorga para uso de recursos hídricos na Agência Nacional de Águas ([www.ana.gov.br](http://www.ana.gov.br)). Em corpos hídricos de domínio dos Estados e do Distrito Federal, a solicitação de outorga deve ser feita às respectivas autoridades outorgantes estaduais responsáveis pelo gerenciamento dos recursos hídricos. No Estado de S. Paulo, o interessado deve procurar na página: ([www.dae.sp.gov.br](http://www.dae.sp.gov.br)) a Diretoria da Bacia Hidrográfica do DAEE - Departamento de Águas e Energia Elétrica, onde se localiza a área do empreendimento ou uso, para requerer a outorga. Aos técnicos responsáveis pelo dimensionamento e execução de projetos de irrigação, há a exigência profissional do preenchimento da Anotação de Responsabilidade Técnica (ART) junto aos CREAs. No Estado de S. Paulo, as informações estão disponíveis na página ([www.creasp.org.br](http://www.creasp.org.br)).

Preliminarmente ao envolvimento com agricultura irrigada é recomendável conhecer alguns conceitos básicos associados ao dimensionamento, operação e manejo de sistemas de irrigação, conforme especificados a seguir.



### Volume de água requerido em irrigação

A primeira iniciativa decorrente da possibilidade de envolvimento com a agricultura irrigada consiste na identificação da quantidade de água requerida:

$$V = 10 \times A \times D/E$$

sendo:  $V$  = volume requerido,  $m^3$ ,  $A$  = área irrigada, ha,  $D$  = quantidade de água requerida pela cultura, mm/d,  $E$  = eficiência de aplicação de água desejada, adimensional e decimal.

Ex.: Assumindo-se:  $A = 1$  ha,  $D = 4$  mm/d,  $E = 0,8$  (80%)

$$V = 10 \times 1 \times 4/0,8 = 50 \text{ m}^3/\text{d}$$

A quantidade de água requerida pela cultura, representada pela evaporação do solo, transpiração das plantas, constituição dos tecidos vegetais e eventual lixiviação do excesso de sais solúveis da região radicular, aumenta gradativamente desde o plantio, atingindo um valor máximo quando as plantas encontram-se completamente desenvolvidas. O sistema de irrigação deve ser dimensionado para satisfazer a demanda hídrica das culturas neste período que, em geral, é crítico para a produção.

O consumo de água pela cultura é um parâmetro difícil de ser avaliado com precisão. Na ausência de valores locais determinados, recomenda-se assumir 4 mm/d como referência para dimensionamento na região sudeste e parte da região sul e centro-oeste do país.

O valor de 4 mm/d significa que em  $1 \text{ m}^2$  de área vegetada são consumidos 4 L de água por dia, ou 40.000 L por hectare ( $10.000 \text{ m}^2$ ). Assumindo-se uma eficiência de aplicação de 80%, serão necessários  $50 \text{ m}^3$  de água por dia para irrigar apenas 1 hectare, ou seja, uma piscina com um tamanho razoável de  $10 \times 5 \times 1 \text{ m}$ .

## Vazão requerida

A vazão requerida (Q) é calculada dividindo-se o volume requerido no estádio de maior exigência da cultura pelo período de aplicação de água adotado. Assim, para irrigar 1 ha em apenas 1 h/d, a vazão requerida seria 50 m<sup>3</sup>/h (14 L/s). Aumentando-se o período de aplicação para 10 h/d, a vazão reduz-se para 5 m<sup>3</sup>/h (1,4 L/s). Para um período de 20 h/d, a vazão seria apenas 2,5 m<sup>3</sup>/h (0,7 L/s). Observe que o aumento no período diário de operação implica em redução proporcional na vazão, com inúmeras vantagens ao dimensionamento:

- a) redução da potência da unidade de bombeamento e do transformador e de seus custos, inclusive de acionamento e segurança operacional,
- b) possibilidade de usufruir custos mais reduzidos na operação noturna em sistemas acionados por energia elétrica,
- c) redução do diâmetro da tubulação (menor custo) e das perdas de carga hidráulica (maior uniformidade e menor potência requerida).
- d) redução das perdas de água por evaporação durante a operação noturna em sistemas por aspersão.

Caso a vazão disponível (Qd) para um período de operação de 10 h/d seja insuficiente, p.ex. 4 m<sup>3</sup>/h ao invés de 5 m<sup>3</sup>/h, pode-se adotar uma das seguintes alternativas:

- 1) Reduzir a área irrigada (A):

$$A = Qd \times E \times T / (10 \times D) = 4 \times 0,8 \times 10 / (10 \times 4) = 0,8 \text{ ha}$$

- 2) Reduzir a quantidade máxima de água consumida pela cultura (D):

$D = Qd \times E \times T / (10 \times A) = 4 \times 0,8 \times 10 / (10 \times 1) = 3,2 \text{ mm/d}$  (com resultados imprevisíveis para a produção).

- 3) Aumentar a eficiência de aplicação (E):

$E = 10 \times A \times D / (Qd \times T) = 10 \times 1 \times 4 / (4 \times 10) = 1 = 100\%$  (impossível, não existe sistema de irrigação com eficiência absoluta!)

4) Aumentar o período operacional diário (T):

$$T = 10 \times A \times D / (Qd \times E) = 10 \times 1 \times 4 / (4 \times 0,8) = 12,5 \text{ h/d}$$

5) Penalizar proporcionalmente uma ou mais alternativas:

P.ex., reduzir a área e a demanda hídrica e aumentar o período operacional por um mesmo fator k calculado por:

$$Qd = 10 \times k \times A \times k \times D / (0,8 \times T/k)$$

$$4 = 10 \times k \times 1 \times k \times 4 / (0,8 \times 10/k) = 5 k^3$$

$$k = (4/5)^{1/3} = 0,93$$

Portanto,  $A = 0,93 \times 1 = 0,93 \text{ ha}$ ;  $D = 0,93 \times 4 = 3,7 \text{ mm/d}$ ;  $T = 10/0,93 = 10,75 \text{ h} = 10 \text{ h:45 min}$

6) Armazenar o volume deficitário em um reservatório:

$$\text{Volume requerido} = 50 \text{ m}^3$$

$$\text{Volume disponível} = 4 \text{ m}^3/\text{h} \times 24 \text{ h/d} = 96 \text{ m}^3/\text{d}$$

$$\text{Volume fornecido durante o período de bombeamento} = 4 \times 10 = 40 \text{ m}^3$$

Sendo o volume disponível igual ou superior ao requerido, a alternativa de construir um reservatório é viável. Portanto:

$$\text{Volume a ser armazenado} = 50 - 40 = 10 \text{ m}^3$$

Caso o volume disponível seja inferior ao requerido, todas as alternativas, inclusive o reservatório, devem ser dimensionadas em relação ao volume disponível. Em condições favoráveis, basta remover com retroescavadeira um volume de solo um pouco superior ao de armazenamento para se obter o reservatório desejado.

## Água no solo disponível às culturas

Todo solo com drenagem natural é capaz de reter uma determinada quantidade máxima de água. Excedida essa quantidade, haverá percolação às camadas mais profundas até atingir a superfície freática, que passa a adquirir condições de escoamento em

direção às nascentes. Por outro lado, as características do próprio solo, da planta cultivada e da atmosfera determinam uma quantidade mínima de água no solo para um adequado desenvolvimento das culturas. A diferença entre as quantidades máxima e a mínima define a quantidade de água disponível para cada cultura entre as chuvas e irrigações. Em solos argilosos essa diferença pode chegar a 12%, em base volumétrica; em solos mistos, 8%, e em solos arenosos, 5%.

Um valor de 10%, característico de solos mais argilosos com boa capacidade de armazenamento, significa 10 mm de água disponível a cada 10 cm de profundidade de solo. Se, por exemplo, a maior parte das raízes das plantas cultivadas encontra-se até 30 cm de profundidade, então o solo pode fornecer 30 mm de água disponível para as plantas. Assumindo-se que a evapotranspiração (água perdida por evaporação do solo e transpiração das plantas) seja, em média, 4 mm/d, a cultura estaria adequadamente suprida com a água disponível no solo durante um período de, pelo menos, 7 dias, ou seja, 30 mm/4 mm/d = 7,5 dias. Este período representa o turno de irrigação para a cultura no estágio de desenvolvimento considerado. A Tabela 1 ilustra um esquema genérico de consumo hídrico e desenvolvimento radicular durante o desenvolvimento de uma cultura.

► TABELA 1: Consumo hídrico e desenvolvimento radicular durante o desenvolvimento de uma cultura.

<b>Desenv.</b>	Plantio	20%	40%	60%	80%	100%	Matur.
<b>Consumo</b>	40%	50%	60%	70%	90%	100%	80%
<b>Prof. raiz</b>	20%	30%	50%	70%	90%	100%	100%

Os valores anotados representam percentuais em relação aos máximos previstos. Por exemplo, assumindo-se que o consumo máximo de água atinja 4 mm/d, que as raízes efetivas se desenvolvam até 40 cm, e que o solo retém 8% de água disponível em base volumétrica (8 mm de água disponível a cada 10 cm de profundidade de solo) as seguintes informações podem ser obtidas:

► TABELA 2: Esquema genérico de dotação de água e turno de irrigação durante o desenvolvimento de uma cultura.

Desenvolv.	Plantio	20%	40%	60%	80%	100%	Matur.
Consumo	1,6	2,0	2,4	2,8	3,6	4,0	3,2
Prof raízes	8	12	20	28	36	40	40
Lâmina	6	10	16	22	29	32	32
Turno	4	5	7	8	8	8	10

Obs.: Desenvolvimento em %, consumo de água em mm/d, profundidade das raízes em cm, lâmina a ser aplicada em mm, e turno de irrigação em dias.

## Sugestão prática para orientar o manejo das irrigações

A determinação rigorosa da quantidade de água a ser aplicada e do momento oportuno de aplicação não é tarefa simples. Envolve equipamentos nem sempre onerosos, mas requerem instalação e interpretação criteriosas. Por outro lado, a experiência demonstra que, com a prática, os agricultores podem tornar-se competentes na identificação de quando e quanto irrigar. Uma forma prática de se avaliar a quantidade de água a aplicar seria calcular as quantidades seguramente insuficientes para provocar perdas por percolação, p. ex., solos argilosos podem oferecer 12% de água disponível em volume, ou 12 mm/10 cm de profundidade. Assumindo-se uma profundidade efetiva de raízes de 30 cm (típico para a maioria das culturas anuais), poderia ser aplicado 36 mm. Já em solos de textura mediana, a capacidade de água disponível reduz-se para 8% ou 8 mm/10 cm de profundidade de solo. A lâmina a ser aplicada neste caso ficaria em 24 mm. Solos arenosos exibem cerca de 5% de água disponível ou 5 mm/10 cm. A lâmina a ser aplicada ficaria em torno de 15 mm.

Aplicar uma quantidade suficiente para suprir a cultura durante um período previsto. Isolar uma pequena parcela de plantas que serão irrigadas com maior frequência (a cada 2 ou 3 dias) assegurando que não sofrerão deficiência hídrica. Em horários de maior transpiração em dias ensolarados, comparar a estado de hidratação (turgescência) das plantas irrigadas normalmente com aquelas irrigadas com maior frequência. Havendo

diferenças, comprova-se que a quantidade de água existente no solo é insuficiente para suprir a demanda da cultura irrigada. Portanto, deve-se ajustar a quantidade de água a ser aplicada e identificar o turno de irrigação correspondente.

## IRRIGAÇÃO DE BAIXO CUSTO POR SULCOS

O sistema por sulcos integra os sistemas de irrigação por superfície, sendo um dos mais difundidos e prevalecendo na maior parte das áreas irrigadas do mundo. As principais características são:

- Em geral, revela um custo total reduzido (soma de custos fixos e variáveis) razão principal de sua predominância nas áreas irrigadas.

- Dispensa a pressurização da água, ou o próprio bombeamento, caso a cota do manancial esteja um pouco acima da cota da área a ser irrigada.

- Aplicável a todas as culturas, desde que tenham sido instaladas com a previsão de serem irrigadas por sulcos, ou seja, deve haver um pequeno desnível relativamente uniforme na direção das linhas de plantio. Em culturas cujas plantas de interesse se apresentam razoavelmente espaçadas, como os pomares, cafezais, videiras, bananeiras, coqueiros, melão, melancia, etc. os sulcos devem estar próximos ao sistema radicular dessas plantas e o sistema adquire uma característica vantajosa de irrigação localizada, com grande economia de água, quando comparado aos sistemas por aspersão e mesmo microaspersão.

- Pequena dependência à qualidade da água, podendo utilizar águas superficiais poluídas ou residuárias sem tratamento, em geral não comprometendo a qualidade da produção, mesmo para consumo *in natura* (sem processamento). Águas ricas em material orgânico beneficiam as características físicas e químicas do solo e favorecem a nutrição vegetal com economia de fertilizantes.

- Dispensa equipamentos especiais ou mão-de-obra especializada para aplicação de água.

- Possibilita a aplicação de agroquímicos (fertilizantes, corretivos e agrotóxicos de solo) com facilidade na água de irrigação, empregando equipamento de baixo custo e sem possibilidade de obstrução. A exigência de solubilidade é menor e, portanto, os fertilizantes são mais baratos. Mesmo em suspensão podem ser aplicados com sucesso na água de irrigação.

- Não interfere nos tratamentos fitossanitários desenvolvidos na parte aérea da cultura. Não há a possibilidade de lixiviação de agroquímicos aplicados como ocorre na irrigação por aspersão.

- Acentuada dependência à topografia, podendo requerer sistematização da superfície para assegurar uma declividade relativamente uniforme na direção do escoamento e favorecer a uniformidade de distribuição de água na área irrigada.

- Inadequado para solos rasos, pedregosos ou excessivamente permeáveis que pode resultar em dificuldades para instalação ou provocar grandes perdas por percolação.

- Parâmetros hidráulicos variáveis com as sucessivas irrigações por modificações que ocorrem na condição superficial e nas características de infiltração, requerendo alterações na vazão e no período de aplicação de água.

- Integrado às áreas para as quais são dimensionados.

- Dificuldades para operação noturna e automação.

- Limitada divulgação por não envolver interesses comerciais, dificultando a aceitação, discussão e solução de muitos problemas técnicos e práticos. O número de usuários é limitado e disperso.

- Requer assistência técnica especializada para orientar a operação e o manejo das irrigações. Entretanto, essas informações são facilmente assimiladas pelos irrigantes interessados.

## O processo de irrigação por sulcos

Apresenta duas fases principais: avanço e recesso da água na superfície. Para cada ponto no sulco, a diferença entre o tempo de recesso (quando a água desaparece da superfície) e o de avanço (quando a água atinge aquele ponto) determina o tempo de infiltração. Tempos de infiltração semelhantes ao longo do comprimento resultam em maior uniformidade de distribuição de água. Deve-se considerar, porém, que a razão de infiltração diminui com o tempo, ou seja, 60 min de infiltração podem incorporar, p.ex., 30 mm de água; porém, apenas 30 min podem infiltrar mais que 20 mm. Portanto, diferenças no tempo de

infiltração não resultam em diferenças proporcionais nas quantidades infiltradas ao longo do comprimento dos sulcos.

A determinação de equações simples para representar o processo de infiltração em sulcos nas condições onde as irrigações são praticadas é fundamental para o dimensionamento e avaliação desse sistema e, portanto, deve ser executada por pessoal técnico especializado. Aos interessados, recomenda-se consultar o trabalho publicado por Scaloppi et al. (1995).

## Dimensionamento

O dimensionamento de um sistema por sulcos consiste em se atribuir dimensões a 3 parâmetros básicos: o comprimento das parcelas, o regime de aplicação de água aos sulcos (vazões) e o tempo de aplicação. Maiores detalhes sobre o dimensionamento dos sistemas de irrigação por superfície podem ser obtidos em Scaloppi (2003a). As características topográficas da área resultam de operações preliminares de sistematização ou regularização da superfície. Deve-se destacar que as áreas potencialmente favoráveis ao sistema por sulcos devem apresentar uma topografia relativamente plana (inclinação máxima em torno de 5% na direção transversal) e uniforme (manutenção da direção da declividade). Na direção do escoamento, a declividade não deve ultrapassar 1% e, preferencialmente, em torno de 0,5%. Esse valor pode compensar pequenas variações que ocorrem no gradiente de declive, evitando sua reversão, principalmente em condições de sistematização menos rigorosas.

## Preparo da área a ser irrigada

A primeira providência consiste em adequar a condição superficial ao sistema de irrigação. Para isso, deve-se promover uma mobilização suficiente do solo. Em seguida, sistematizar a superfície (eliminar irregularidades) utilizando implementos mecanizados adequados (plaina niveladora ou lâmina traseira). Procurar manter uma declividade uniforme em toda área. Não sendo possível, dividir a área em parcelas que apresentam condições topográficas semelhantes. Em trabalhos mais rigorosos, consultar o texto publicado por Scaloppi (2003b).

Após a sistematização, marcar uma desnivelada básica representativa com declividade média em torno de 0,5% (desnível de 5 cm em 10 m de distância) que será a direção

das linhas de plantio. Ajustar a desnivelada respeitando as curvaturas observadas no campo. Caso o comprimento seja limitado pelas dimensões da área (em geral, inferiores a 100 m) será assumido que o comprimento das parcelas está definido. Por outro lado, sendo essas dimensões mais expressivas, com algumas centenas de metros, o comprimento dos sulcos deverá ser determinado.

## Determinação do comprimento dos sulcos

O comprimento adequado dos sulcos deve ser determinado em função do esquema de aplicação de água a ser adotado. Dois esquemas serão apresentados: vazão constante e vazão progressivamente reduzida.

### a) Esquema de vazão constante

No esquema de vazão constante, o seguinte critério pode ser recomendado:

Aplicar a vazão máxima não erosiva e anotar os tempos de avanço até a frente de avanço reduzir-se apreciavelmente. Avaliar a vazão e calcular as lâminas médias aplicadas quando a água atinge estacas de interesse.

Ex.: vazão = 0,4 L/s. lâmina média requerida = 30 mm, largura da faixa de reposição de água = 0,6 m.

Tempo – min	2	4	7	12	18	26	36	48	62	80
Distância – m	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100

a) Comprimento = 80 m, tempo de avanço = 48 min

Vazão = 0,4 L/s = 24 L/min

Volume aplicado = 48 x 24 = 1152 L

Lâmina média aplicada = 1152/(80 0,6) = 24 mm

b) Comprimento = 90 m, tempo de avanço = 62 min

Volume aplicado =  $62 \times 24 = 1488$  L

Lâmina média aplicada =  $1488/(90 \times 0,6) = 28$  mm

c) Comprimento = 100 m, tempo de avanço = 80 min

Volume aplicado =  $80 \times 24 = 1920$  L

Lâmina média aplicada =  $1920/(100 \times 0,6) = 32$  mm

Para uma lâmina média requerida de 30 mm, observa-se que os comprimentos de 90 e 100 m já devem apresentar perdas de água significativas por percolação. Portanto, o comprimento de 80 m parece mais adequado.

Estando o comprimento determinado, pode-se estimar o tempo de aplicação, em função de uma eficiência de aplicação desejada (p.ex., 80% = 0,8):

Volume requerido =  $80 \times 0,6 \times 30 = 1440$  L

Volume a ser aplicado =  $1440/0,8 = 1800$  L

O período de aplicação de água (T) em cada sulco será aproximado por:

$T = 1800 \text{ L}/0,4 \text{ L/s} = 4500 \text{ s} = 75 \text{ min}$

## b) Esquema de vazões progressivamente reduzidas

Pesquisadores do USDA Agricultural Research Service, em Kimberly, Idaho, EUA, (Kemper et al., 1981) desenvolveram um equipamento para aplicação de água aos sulcos, denominado “cablegation” que foi adaptado com razoável sucesso à exigência de baixo custo caracterizada nesta publicação (Fig. 1). O sistema simplificado consiste basicamente de uma pequena caixa de recepção de água (Fig. 2) que está conectada à uma tubulação de PVC para aplicações sanitárias (esgoto), no interior da qual desloca-se um plug constituído pela parte superior de uma garrafa PET (Fig. 3). Este artefato é conectado a um fio de nylon preso a um esticador de arame liso para cercas que deve ser fixado à parte superior da caixa de recepção (Fig. 2).

Para sulcos de 110 m de comprimento, serão necessários apenas 15 tubos DN 100 para irrigar 1 hectare, a um custo estimado em R\$450,00/ha. O restante, caixa de recepção (pode ser sucata), esticador e fio de nylon não deve ultrapassar R\$ 50,00, totalizando então cerca de R\$ 500,00/ha. Deslocando-se esse equipamento para irrigar sequencialmente outros 110 m de comprimento, o custo será reduzido pela metade; outro deslocamento e



Fig.1



Fig. 2



Fig. 3

redução a 1/3, e assim, sucessivamente. Os tubos são acoplados sem soldagem.

A derivação de água aos sulcos é obtida através de orifícios perfurados na tubulação tendo dimensões apropriadas e seguindo um alinhamento posicionado cerca de 60° em relação à superfície (Fig. 4). A tubulação estando instalada com declividade mínima de 0,5% na direção da tubulação, a pressão hidrostática promove o deslocamento do plug desde que o esticador esteja destravado. O período adotado para o deslocamento do plug resume um procedimento operacional criterioso que deve resultar em um desempenho satisfatório da irrigação.

O orifício mais próximo ao plug apresenta maior vazão, que vai sendo reduzida nos orifícios mais afastados (Fig. 4). A vazão recebida pela caixa determina o número de sulcos que serão irrigados simultaneamente.

A pressão diferencial em cada orifício resulta em vazões decrescentes a partir do



orifício mais próximo ao plug. Assim, cada sulco receberá uma sucessão de vazões decrescentes em cada aplicação. Este esquema favorece a eficiência de aplicação de água, proporcionando maiores distâncias de avanço com a maior vazão no início, sendo sucessivamente reduzida quando a água aproxima-se do final do sulco, reduzindo ou até eliminando as perdas por deflúvio superficial.

O diâmetro da tubulação e dos orifícios depende das dimensões da área irrigada e do comprimento dos sulcos. Na versão mais usual, a tubulação utilizada é DN 100 com orifícios de 3 cm de diâmetro, para sulcos em torno de 100 m de comprimento.

No esquema com redução progressiva da vazão, o seguinte critério pode ser sugerido, com adaptações para cada condição, para orientar a determinação do comprimento em função do número de sulcos simultaneamente irrigados: deslocar o plug quando for aplicado  $(100 - 10 \times N - 10)\%$  do volume requerido para cada um dos N sulcos simultaneamente irrigados, até o limite de 40%. Avaliar o comprimento mais adequado após encerrar a irrigação.

Ex. 4 sulcos; deslocar o plug quando for aplicado  $(100 - 10 \times 4 - 10) = 50\%$  do volume requerido.

Em regimes de aplicação com redução progressiva de vazão, o gradiente de declive da tubulação com orifícios desempenha um papel importante no esquema operacional. Sendo gradientes muito reduzidos (inferiores a 1%), duas alternativas podem ser oferecidas: a) apoiar a tubulação em estacas instaladas de acordo com o gradiente escolhido, ou b) vedar os orifícios já irrigados para aumentar a vazão dos outros ainda em processo de irrigação. A possibilidade de vedar facilmente os orifícios já irrigados, sobrepondo-se um segmento de tubo ao orifício, favorece bastante a dotação criteriosa de água aos sulcos.

## Quimigação no sistema por sulcos

O sistema de irrigação por sulcos também pode integrar um equipamento simples de quimigação. No caso da adição de fertilizantes à água de irrigação (fertirrigação) pode-se parcelar a aplicação e reduzir as perdas por volatilização e percolação. O equipamento requerido é simplesmente um recipiente volumétrico dotado de um registro, resistentes à ação corrosiva da solução química. O recipiente é instalado sobre a caixa de recepção de água e a solução química é adicionada à água de irrigação na dosagem recomendada. A turbulência da água na caixa de recepção favorece a homogeneização da mistura (Fig. 5).

A solução química é introduzida no recipiente, cuja capacidade volumétrica deve satisfazer um período de aplicação pré-determinado. P.ex., assumindo-se que o sistema irriga  $1000 \text{ m}^2/\text{h}$ , determinar a razão de aplicação de  $20 \text{ kg}$  de uréia/ha, com um recipiente de  $20 \text{ L}$ .

Solução: dissolvendo-se  $10 \text{ kg}$  de uréia em água para completar os  $20 \text{ L}$  de solução



obtém-se uma concentração de 0,5 kg/L. A dose de uréia para os 1000 m<sup>2</sup>/h de área irrigada será 2 kg ou 4 L de solução. Portanto, a razão de aplicação será 4 L/h e o recipiente deverá ser reabastecido a cada 5 h. O simples artifício conhecido como vaso de Mariotte incorporado ao recipiente manterá constante a razão de aplicação (Fig. 6). Reduzindo-se a quantidade do produto em solução, aumenta-se proporcionalmente a razão de aplicação. P.ex., 2 kg de uréia em 20 L de solução (0,1 kg/L) requer uma aplicação de 20 L/h e, portanto, reabastecimento a cada hora.

Com o parcelamento da fertirrigação, pode-se avaliar a aplicação realizada e, sendo necessário, recalculas as dosagens para as próximas aplicações. Para assegurar a preservação ambiental recomenda-se restringir a quimificação apenas à área cultivada, eliminando a ocorrência de deflúvio superficial no final dos sulcos.





## IRRIGAÇÃO DE BAIXO CUSTO POR ASPERSÃO CONVENCIONAL

### Introdução

A aspersão se caracteriza por aplicar a água em área total, ou seja, não tem recursos para localizar a aplicação de água. Portanto, é recomendada para culturas que, quando completamente desenvolvidas, cobrem totalmente a superfície, como a maioria das culturas anuais (feijão, soja, trigo, arroz, milho, algodão, tomate industrial, etc.) e culturas olerícolas (hortaliças e legumes). Como este critério é o mesmo que define o espaçamento entre muitas plantas cultivadas, o potencial de aplicação é enorme. As culturas que cobrem totalmente a superfície do solo, como as forrageiras, apresentam condições ideais para a aspersão porque onde precipitar uma gota de água proveniente de um aspersor haverá uma raiz pronta para absorvê-la.

A redução de custos nesses sistemas baseia-se no emprego de tubulações de PVC rígido para aplicações sanitárias (esgoto) para compor as linhas laterais e de derivação e a escolha de aspersores com baixa vazão operando a baixas pressões com um desempenho plenamente satisfatório. As tubulações enterradas a pequena profundidade no solo (30 cm) podem resistir às pressões normais de operação devido à reação do solo à ação pressurizada da água no interior da tubulação. As baixas pressões dos aspersores estão em torno de 200 kPa (cerca de 20 m de carga piezométrica).

### Principais componentes

A tubulação recomendada para as linhas laterais é DN 40, com 37,4 mm de diâmetro interno. Pode comportar até 15 aspersores em operação simultânea com vazão média em torno de 500 L/h, espaçados de 12 m, totalizando 180 m de comprimento. Considerando duas linhas laterais instaladas nos dois lados da linha de derivação, pode-se irrigar uma faixa com 360 m de comprimento ( $360 \times 12 = 4320 \text{ m}^2$ ).

A saída de água para os aspersores inicia-se com a instalação de um tê na linha

lateral que receberá uma bucha de redução soldável 40 x 25 mm para inserção da haste ou tubo de subida de 25 mm (Fig. 7) em cuja extremidade conecta-se uma luva soldável/roscável 25 x ½ pol para instalação dos aspersores (Figs. 8 e 9) Para o último aspersor da linha lateral o tê será substituído por um joelho de 40 mm (Fig. 10).



Fig. 7



Fig. 8



Fig. 9



Fig. 10

O comprimento da haste depende da altura máxima de crescimento prevista para a cultura. Acima de 50 cm de comprimento, a haste deve estar apoiada em estacas, atenuando as vibrações que podem danificar as conexões.

O diâmetro da tubulação das linhas de derivação depende do número de linhas laterais que operam simultaneamente. Sendo uma única linha, pode-se utilizar o mesmo DN 40. Mais de uma linha em operação simultânea pode requerer um diâmetro superior, p.ex. DN 50. Nessa faixa de diâmetro, os tubos específicos para irrigação podem se mostrar mais vantajosos. É importante assegurar a disponibilidade das conexões normalizadas para as linhas laterais.

### Dimensionamento ilustrativo para piquetes rotacionados

$$\text{Área} = 30 \text{ piquetes de } 900 \text{ m}^2 = 27000 \text{ m}^2 = 2,7 \text{ ha}$$

A área apresenta dimensões ilustrativas de 300 x 90 m, ou seja, 3 fileiras com 10 piquetes em cada uma.

A demanda hídrica assumida será de 4 mm/d e a eficiência de aplicação de água estimada em 80%. O período operacional foi fixado em 10 h/d.

Cálculo da vazão requerida (Q):

$$Q = 10 \times 2,7 \times 4 / (0,8 \times 10) = 13,5 \text{ m}^3/\text{h} = 13500 \text{ L/h}$$

Cálculo do número mínimo de aspersores que devem operar simultaneamente (N)

$$N = \text{vazão} / (144 \times 5)$$

A vazão deve ser expressa em L/h. O valor 144 representa a área de influência de um aspersor em m<sup>2</sup> (12 x 12 m) e o número 5, a razão média de aplicação de água (5 mm/h) adotada com as seguintes vantagens:

a) minimiza a possibilidade de ocorrer deflúvio superficial e, conseqüentemente, erosão, e perda de água e nutrientes,

b) melhor uniformidade de distribuição de água atribuída ao maior tempo de aplicação em cada posição,

c) viabiliza a operação noturna.

Portanto, o valor de N será então

$$N = 13500 / (144 \times 5) = 18,75$$

Como a área apresenta 300 m de comprimento, as duas linhas laterais devem comportar 25 aspersores. Como  $N = 18,75$  deverão ser adotadas 2 linhas laterais em operação simultânea, com 25 aspersores. Para facilitar a operação e reduzir custos não se admite frações de linhas laterais irrigadas e sim, linhas laterais inteiras.

### Cálculo da vazão média dos aspersores

$$q = Q/N = 13500/25 = 540 \text{ L/h}$$

A intensidade média de precipitação será então:

$$I = 540/144 = 3,8 \text{ mm/h, eliminando qualquer risco de acúmulo de água superficial.}$$

### Escolha dos aspersores

Escolher aspersores que proporcionem a vazão média calculada com as maiores vantagens econômicas e operacionais, a saber,

a) reduzida pressão para economizar energia sem prejudicar o desempenho (uniformidade de distribuição de água),

b) máximo alcance do jato na pressão especificada,

c) uniformidade de distribuição espacial de água satisfatória,

d) custo reduzido e durabilidade elevada,

e) idoneidade da empresa fabricante.

## Dimensionamento da unidade de bombeamento

(motor e bomba hidráulica)

$$CV = Q H / (2,7 \times \rho_g)$$

CV = potência do motor em CV

Q = vazão, m<sup>3</sup>/h,

H = altura manométrica total, m,

$\rho_g$  = rendimento global de bombeamento, em %

$$\rho_g = \rho_{\text{motor}} \times \rho_{\text{bomba}} \times \rho_{\text{transmissão}} \times 100$$

onde  $\rho_{\text{motor}}$ ,  $\rho_{\text{bomba}}$  e  $\rho_{\text{transmissão}}$  = rendimentos do motor, bomba e mecanismo de transmissão, respectivamente, em decimal.

Altura manométrica total (desnível + carga operacional + perda de carga) = 7 + 20 + 8 = 35 m

Desnível = ponto mais elevado da área – superfície da água no poço de sucção.

Os rendimentos de motor, bomba e transmissão são expressos em decimal, sendo valores típicos para unidades acionadas por motor elétrico de baixa potência:  $\rho_{\text{motor}} = 0,85$ ,  $\rho_{\text{bomba}} = 0,7$ , e  $\rho_{\text{transmissão}} = 1$ . Portanto,

$$\rho_g = 0,85 \times 0,7 \times 1 \times 100 = 60\% \text{ e, finalmente,}$$

$$CV = 13,5 \times 35 / (2,7 \times 60) = 2,9 \text{ CV} = 3 \text{ CV (disponível)}$$

Notar que nos projetos por aspersão de baixo custo a potência requerida em acionamento elétricos é, aproximadamente, 1,2 CV/ha. No acionamento a biodiesel deve-se ajustar o rendimento mecânico do motor em cerca de 30%. Assim, o rendimento global modifica-se para:

$$\rho_g = 0,3 \times 0,7 \times 1 \times 100 = 21\% \text{ e, portanto,}$$

$$CV = 13,5 \times 35 / (2,7 \times 21) = 8,3 \text{ CV}$$

## Consumo de energia

$$E = V \times H \times 9,81 / (\rho_g \times F)$$

onde E = consumo de energia (kW h no acionamento elétrico e L no biodiesel), V = volume bombeado, m<sup>3</sup>, H = altura manométrica total, m,  $\rho_g$  = rendimento global de bombeamento, % e, F = fator de conversão.

Ex. O volume bombeado por dia (V) é calculado por:

$$V = Q \times T$$

onde Q = vazão, m<sup>3</sup> /h e T = período operacional diário, h. Portanto, no presente exemplo ilustrativo,

$$V = 13,5 \times 10 = 135 \text{ m}^3$$

Sendo a altura manométrica total 35 m, o consumo diário de energia elétrica (Ee) com  $\rho_g = 60\%$  e F = 36, será calculado por:

$$Ee = 135 \times 35 \times 9,81 / (60 \times 36) = 21,5 \text{ kW h}$$

e o custo correspondente ao consumo de energia elétrica:

$$Ce = Ee \times \text{custo do kW h cobrado pela concessionária local.}$$

Assumindo um custo de R\$ 0,25/kW h resulta:

$$Ce = 21,5 \times 0,25 = \text{R\$ } 5,38/\text{d}$$

O consumo diário de biodiesel ( $\rho_g = 21\%$  e F = 360) será calculado por:

$$Ed = 135 \times 35 \times 9,81 / (21 \times 360) = 6,13 \text{ L}$$

e o custo correspondente ao consumo de biodiesel:

$$Cd = Ed \times \text{custo unitário do biodiesel.}$$

Assumindo um custo de R\$ 1,95/L resulta:

$$Cd = 6,13 \times 1,95 = \text{R\$ } 11,95/\text{d}$$

Para os valores monetários utilizados, o custo do consumo energético no acionamento elétrico é praticamente 45% do calculado no acionamento a biodiesel.

## Material necessário

Para a área irrigada de 2,7 ha, com dimensões de 300 x 90 m, que poderia representar 30 piquetes rotacionados para a pecuária leiteira, com dimensões de 30 x 30 m, os seguintes componentes são necessários para um sistema fixo de irrigação por aspersão convencional, excluindo a adutora e a unidade de bombeamento:

150 aspersores plásticos com rotação completa por impacto e bocal único de 3,2 mm.

360 tubos de PVC DN 40 (NBR 5688) para aplicações sanitárias (esgoto).

150 tês DN 40 esgoto (NBR 5688).

150 buchas de redução 40 x 25 mm (NBR 5648).

150 luvas de redução soldável/roscável 25 x 1/2".

12 registros de esfera compacto soldável de 40 mm.

12 joelhos de 90° DN 40 esgoto NBR 5688.

30 tubos de PVC 25mm NBR 5648 (para hastes de 120 cm de altura acima da superfície do solo).

Adesivo para PVC em quantidade suficiente para colar as buchas de redução, hastes e luvas para a conexão dos aspersores.

O custo por hectare depende da configuração do projeto, da qualidade dos componentes adquiridos e das condições da negociação (a quantidade de material necessário favorece o consumidor). Por essas razões, um valor estimativo variável entre R\$ 2000,00 a R\$ 2500,00/ha pode ser sugerido.

## Procedimento de montagem

Tanto a tubulação da linha de derivação quanto das linhas laterais deverão ser en-

terras a uma profundidade segura das operações mecanizadas previstas para a área. Não havendo a previsão de subsolagem ou sulcamento profundo, a profundidade de 30 cm parece satisfatória. Nas tubulações e acessórios enterrados, a reação do solo envolvente à pressão interna da água resulta em um aumento da resistência à ruptura. As tubulações e conexões enterradas não necessitam ser coladas, pois o sistema opera a baixas pressões, em geral, insuficientes para provocar a desconexão ou ruptura. Apenas promover um acoplamento adequado, empregando um lubrificante apropriado (vaselina sólida) entre os componentes. Este recurso facilita a montagem porque pode corrigir alguma desatenção e permitir um posicionamento ideal entre os componentes (o adesivo usado em PVC apresenta secagem muito rápida e muitas vezes não permite corrigir um posicionamento incorreto entre os componentes). Além disso, possibilita o reaproveitamento do material, caso haja desinteresse pela irrigação. Os aspersores devem ser instalados em hastes perpendiculares à inclinação da superfície. Estando os sulcos abertos com sulcador (Fig. 11) e aterrados com uma plaina tracionados por um trator de baixa potência, (Fig. 12) estima-se que duas pessoas podem instalar a tubulação em cerca de 5 ha/dia.



Fig. 11



Fig. 12

### Montagem da linha de fornecimento de água às linhas laterais

A cada dois tubos (12 m) inserir sequencialmente 2 tê (seria mais conveniente uma cruzeta que, infelizmente, parece não ser fabricada na dimensão DN 40) para instalar as duas linhas laterais em posições opostas (Fig. 13). Observar a instalação de um tê no final da linha de fornecimento para as duas últimas linhas laterais (Fig. 14).



## Montagem das linhas laterais

As linhas laterais serão constituídas por tubulação e conexões DN 40 para aplicações sanitárias (esgoto). A dimensão de 300 m da área irrigada deverá acomodar duas linhas laterais com comprimento total de  $300 - 12 = 288$  m. Portanto, cada lateral terá um comprimento de  $288/2 = 144$  m, que é múltiplo de 12 m. Para evitar a instalação de um aspersor junto à linha de derivação, recomenda-se deslocar 6 m do centro da área a posição da linha de derivação de maneira a proporcionar uma linha com 150 m (13 aspersores) e outra com 138 m (12 aspersores). Iniciar a montagem instalando um registro de esfera compacto soldável de 40 mm no início da linha lateral (Fig. 15). Envolver o mesmo com um segmento de tubo plástico na posição vertical para acessar a operação manual de abertura e fechamento. (Fig. 16). O primeiro aspersor deve estar instalado a 6 m do início da linha lateral. Para tanto, acoplar um tê com uma saída vertical onde deverá ser conectada uma bucha de redução soldável 40 x 25 mm para instalação da haste de 25 mm, com altura determinada pelas aplicações previstas, em cuja extremidade será instalada uma luva de redução soldável/roscável



25 x 1/2" para instalação dos aspersores de baixa pressão (em torno de 200 kPa de pressão ou cerca de 20 m de carga manométrica) baixa vazão (cerca de 540 L/h) determinada por bocal único em torno de 3,2 mm de diâmetro. Observar que para o último aspersor, o tê deve ser substituído por um joelho de 90°.

## Montagem da adutora

A adutora deve conduzir a água desde o manancial até a linha de derivação. Portanto, o comprimento da tubulação depende dessa distância e a tubulação deve ser especificada para conduzir a vazão total do projeto e resistir às pressões determinadas pelo desnível entre o manancial e a área irrigada e a perda de carga hidráulica correspondente.

## Quimigação

Um dispositivo para quimigação, também de baixo custo, pode ser inserido no sistema de irrigação por aspersão convencional. Consiste de um reservatório plástico com volume variável, dependente da demanda, resistente à pressão do sistema e conectado à linha principal. A instalação de um registro de esfera soldável compacto entre a entrada para o reservatório e o retorno para a linha principal, constitui o elemento responsável pela introdução de uma perda de carga localizada, que irá determinar a passagem da água para o reservatório contendo a quantidade desejada do produto químico. A razão de injeção é determinada pelo grau de fechamento do registro. A passagem de um volume de água correspondente a 5 vezes o volume do reservatório deve reduzir a concentração da solução no reservatório a 1% do valor inicial.

## IRRIGAÇÃO DE BAIXO CUSTO POR GOTEJAMENTO

**Objetivo:** utilizar microtubos possivelmente descartados para ampliar a área irrigada por mangueiras de polietileno tendo 16 mm de diâmetro.

Inserir os microtubos nas mangueiras em orifícios perfurados com broca de 3 mm. Em função do reduzido diâmetro do microtubo, manter reduzida a vazão na mangueira para diminuir a perda de carga e melhorar a uniformidade de emissão. Em culturas perenes com plantas relativamente espaçadas, pode-se ampliar em 2 vezes a área irrigada por uma mangueira. Com algum cuidado, é possível enterrar os microtubos no solo para não interferir nos tratamentos aplicados à cultura e proteger contra a incidência da radiação solar direta e reduzir, ao mesmo tempo, a amplitude de variação térmica.



## AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO

Conforme foi demonstrado por Scaloppi (2009) o cálculo de apenas dois índices: eficiência de aplicação e eficiência de armazenamento de água no ambiente radicular pode fornecer informações importantes sobre o desempenho dos principais sistemas de irrigação:

$E_{apl}$  = quantidade de água disponível às plantas/quantidade de água aplicada;

$E_{arm}$  = quantidade água disponível às plantas/quantidade de água requerida.

A quantidade de água disponível às plantas pode ser definida como a quantidade de água benéficamente utilizada pelas plantas cultivadas para satisfazer os processos fisiológicos associados à produção. Pode estar incluído o consumo requerido em lixiviações para controlar o excesso de sais solúveis no ambiente radicular.

A quantidade de água aplicada refere-se ao volume escoado através dos bocais dos aspersores ou dos orifícios utilizados em sistemas de irrigação por sulcos. Esses volumes estão ajustados às mesmas unidades expressas nas quantidades de água definidas no numerador das equações propostas.

Analogamente, a quantidade de água requerida pode representar um volume, uma área, ou uma lâmina, que pode ser armazenada no ambiente radicular para se tornar disponível às plantas cultivadas.

A  $E_{apl}$  caracteriza a proporção da água aplicada que permanece disponível à cultura ou, a quantidade de perdas durante o processo de aplicação. Portanto, até não ocorrer perdas por percolação, a  $E_{apl}$  permanece próxima à unidade, refletindo apenas às perdas por evaporação, em geral, muito inferiores às por percolação. Dessa forma, mesmo que a  $E_{apl}$  seja elevada, a irrigação pode revelar enorme deficiência de água às culturas durante o turno de irrigação adotado. Para identificar essa limitação, adotou-se a  $E_{arm}$  que responde pela qualidade da reposição de água no ambiente radicular. Assim, uma  $E_{arm}$  de 100% indica que houve reposição plena de água em todos os locais amostrados. As aplicações excessivas serão detectadas pela  $E_{apl}$ . Portanto,

apenas esses dois índices permitem avaliar objetivamente a qualidade das irrigações.

### a) Aspersão convencional

Os dados anotados a seguir indicam volumes de água coletados ( $\text{cm}^3$ ) em uma área irrigada por um sistema por aspersão convencional, após 9 h de operação dos aspersores espaçados de  $12 \times 12$  m, com vazão média avaliada em  $0,52 \text{ m}^3/\text{h}$ . Os coletores apresentando a mesma área de influência de  $144 \text{ m}^2$ , foram simetricamente dispostos entre 4 aspersores adjacentes. Assumindo se uma lâmina requerida de 30 mm, e uma área de captação dos coletores de  $80 \text{ cm}^2$ , calcular as eficiências de aplicação ( $E_{\text{apl}}$ ) e de armazenamento de água ( $E_{\text{arm}}$ ).

420 380 340 310 280 250 230 210 190 160 130 100  $\text{cm}^3$

Para efeitos comparativos, a quantidade de água requerida, expressa como volume nos coletores, corresponde à lâmina requerida multiplicada pela área de captação dos coletores, ou seja  $3 \text{ cm} \times 80 \text{ cm}^2 = 240 \text{ cm}^3$ . Portanto, volumes coletados excedentes a  $240 \text{ cm}^3$  constituem perdas por percolação. Por outro lado, sendo inferiores, serão integralmente incorporados à quantidade de água útil ou disponível, conforme indicado a seguir:

$$\text{Água disponível} = 6 \times 240 + 230 + 210 + 190 + 160 + 130 + 100 = 2460 \text{ cm}^3$$

$$\text{Água requerida} = 240 \text{ cm}^3 \times 12 \text{ coletores} = 2880 \text{ cm}^3$$

$$\text{Água aplicada} = 0,52 \text{ m}^3/\text{h} \times 9 \text{ h} / 144 \text{ m}^2 = 0,0325 \text{ m} = 3,25 \text{ cm}$$

$$3,25 \text{ cm} \times 80 \text{ cm}^2 \times 12 \text{ coletores} = 3120 \text{ cm}^3$$

$$E_{\text{apl}} = \text{água disponível} / \text{água aplicada} = 2460/3120 = 0,79 = 79\%$$

$$E_{\text{arm}} = \text{água disponível} / \text{água requerida} = 2460/2880 = 0,85 = 85\%$$

Os resultados indicam que ocorreram 21% de perdas durante o processo de aplicação. Na ausência de deflúvio superficial, assegurada pela seleção criteriosa dos aspersores, na qual a intensidade de precipitação não excede a capacidade de infiltração da água no solo, essas perdas são atribuídas à dois componentes: percolação para fora do ambiente

radicular ou evaporação da água aspergida entre os aspersores e os coletores. A percolação pode ser facilmente calculada:

$$\text{Percolação} = (\text{água coletada} - \text{água disponível}) / \text{água aplicada} = (3000 - 2460) / 3120 = 540 / 3120 = 0,173 = 17,3\%$$

Portanto, as perdas por evaporação podem ser estimadas, subtraindo-se as perdas por percolação das perdas totais, ou seja,  $0,21 - 0,173 = 0,037 = 3,7\%$

É importante destacar que a estimativa das perdas por evaporação assume que o volume total coletado represente fielmente o volume aspergido, descontando-se apenas as perdas por evaporação desde os bocais dos aspersores até os coletores. Deve-se admitir, entretanto, a reduzida probabilidade de apenas 12 coletores reproduzir com precisão o volume total aspergido na área de ensaio. Portanto, apesar desta estimativa estar rigorosamente inserida no balanço de volume aplicado, sua interpretação deve ser cautelosa. O aumento significativo do número de amostras nos ensaios de avaliação favorece essa interpretação.

## b) Sulcos

A avaliação do desempenho em sulcos envolve particularidades que devem ser observadas. Primeiramente, deve-se determinar a quantidade de água requerida, em função da lâmina requerida e da largura da faixa de reposição de água desejada. Em culturas que apresentam as linhas de plantio relativamente próximas, como a maioria das culturas anuais, no estágio de máximo desenvolvimento vegetativo, a largura da faixa de reposição, em geral, coincide com o espaçamento entre as linhas de plantio. Porém, nas fases iniciais de desenvolvimento ou, à medida que o espaçamento entre as linhas de plantio aumenta, a largura da faixa de reposição fica restrita a um valor máximo determinado pela condutividade hidráulica do solo naquela direção.

O produto da lâmina requerida pela largura da faixa de reposição define o volume de água requerido por unidade de comprimento do sulco tendo, portanto, uma dimensão de área.

Outra particularidade ocorre em relação à quantidade de água infiltrada. As equações mais empregadas para expressar a infiltração são unidimensionais. Portanto, para se ob-

ter o volume infiltrado por unidade de comprimento do sulco, deve-se multiplicar a equação de infiltração pela largura característica adotada para se obter a equação de infiltração pelo método do balanço volumétrico (Scaloppi et al., 1995). A utilização do perímetro molhado médio como largura característica no ponto considerado torna-se particularmente vantajosa porque permite utilizar a mesma equação para diferentes larguras da faixa de reposição desejadas.

As seguintes recomendações são sugeridas para melhorar a representatividade nessa avaliação:

a) Escolher sulcos representativos da área irrigada.

b) Estaquear ao longo do comprimento mantendo um espaçamento uniforme entre as estacas e submúltiplo inteiro do comprimento dos sulcos. O número sugerido de 10 estacas pode ser razoável nessa avaliação. Para que todos os dados tenham o mesmo fator de ponderação, iniciar o estaqueamento à uma distância correspondente à metade do espaçamento regular adotado entre as estacas. Isto fará com que a última estaca também esteja localizada a essa distância da extremidade final do sulco.

c) Determinar a equação de infiltração preferencialmente empregando o método de balanço volumétrico durante as fases de avanço e pós-avanço da água no sulco (Scaloppi et al., 1995). Ajustar uma equação de Kostiakov ou Kostiakov modificada aos dados.

d) Determinar a vazão a ser aplicada, porém impedindo-a de adentrar ao sulco. Repetir até obter resultados aproximados.

e) Aplicar a vazão ao sulco e anotar o tempo que a frente líquida alcança cada estaca.

f) Ao anotar os tempos de avanço, determinar também o perímetro molhado em cada estaca para se estimar o perímetro molhado médio.

g) Ao término da aplicação de água, anotar os tempos de recesso em cada estaca.

O exemplo a seguir, foi desenvolvido em função de uma lâmina requerida de 3,2 cm em uma faixa de reposição tendo 40 cm de largura, totalizando, portanto, 128 cm<sup>3</sup> de água requerida por cm de comprimento de sulco ou 12,8 L/m. O comprimento dos sulcos atingiu 120 m.

A vazão aplicada foi assumida constante e igual a 24 L/min. O tempo de aplicação foi 90 min. A equação de infiltração empregada tem por expressão  $z = 0,4 t^{0,6}$ , onde  $z$  representa a lâmina infiltrada, cm e  $t$ , o tempo de infiltração, min. Multiplicando-se essa equação pelo perímetro molhado médio (25 cm), obtém-se a equação  $Az = 10 t^{0,6}$ , onde  $Az$  = volume infiltrado ( $\text{cm}^3$ ) por unidade de comprimento do sulco (cm).

Parece razoável admitir a insignificância das perdas por evaporação nesta avaliação, em função da reduzida exposição espaço-temporal da superfície líquida apresentada. Os resultados da avaliação estão anotados na Tabela 3.

► TABELA 3: Resultados da avaliação do desempenho de sistema de irrigação por sulcos.

Distância – m	10	30	50	70	90	110	Totais
Recesso – min	92	96	100	104	108	112	
Avanço – min	2	11	22	35	50	66	
Infiltração – min	90	85	78	69	58	46	
Infiltração - $\text{cm}^2$	149	144	136	127	114	100	770
Água disponível - $\text{cm}^2$	128	128	128	127	114	100	725
Percolação - $\text{cm}^2$	21	16	8	0	0	0	45

Quantidade de água aplicada = 24 L/min x 90 min = 2160 L

2160 L/120 m = 18 L/m = 180  $\text{cm}^3/\text{cm}$  = 180  $\text{cm}^2$

180  $\text{cm}^2$  x 6 pontos de determinação = 1080  $\text{cm}^2$

Quantidade de água requerida = 128  $\text{cm}^2$  x 6 pontos de determinação = 768  $\text{cm}^2$

$E_{\text{apl.}}$  = água disponível/ água aplicada = 725/1080 = 0,67 = 67%

$E_{\text{arm.}}$  = água disponível / água requerida = 725/768 = 0,94 = 94%

$$\text{Percolação} = 45/1080 = 0,04 = 4\%$$

$$\text{Deflúvio} = \text{perdas totais} - \text{percolação} = 0,33 - 0,04 = 0,29 = 29\%$$

A avaliação revela que a principal perda de água ocorre por deflúvio superficial no final dos sulcos. Algumas providências remediadoras podem incluir a continuidade dos sulcos invadindo o próximo bloco operacional, a captação e reaproveitamento do excesso de água, a redução da vazão ao término da fase de avanço, o bloqueio do escoamento e/ou aumento da seção de escoamento no final dos sulcos e, oportunamente, redução do gradiente de declive nos 20% finais do comprimento dos sulcos.

Sendo as perdas por percolação significativas, a recomendação seria aumentar a vazão não erosiva para reduzir o tempo de avanço, reduzir o tempo de aplicação de água e, oportunamente, reduzir o comprimento dos sulcos e/ou aumentar o gradiente de declive.





## REFERÊNCIAS

KEMPER, W.D. et al. Cablegation: I. Cable controlled plugs in perforated supply pipes for automatic furrow irrigation. Transactions of the ASAE, St. Joseph , v.24, n.6, p.1526-1532, 1981.

SCALOPPI, E.J. Irrigação por superfície. In: MIRANDA, J.H. ; PIRES, R.C.M. (Eds.) Irrigação. Jaboticabal: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 2003a. p.311-404. (Série Engenharia Agrícola, v. 2)

SCALOPPI, E.J. Sistematização da superfície para irrigação e drenagem. In: MIRANDA, J.H.; PIRES, R.C.M. (Eds.). Irrigação. Jaboticabal: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 2003b. p.405-470. (Série Engenharia Agrícola, v. 2)

SCALOPPI, E.J.; MERKLEY, G.P.; WILLARDSON, L.S. Intake parameters from advance and wetting phases of surface irrigation. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, New York, v.121, n.1, p.57-70, 1995.

SCALOPPI , E.J. Procedimento para avaliar o desempenho de sistemas de irrigação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 38., 2009, Juazeiro/Petrolina. *Anais...* Jaboticabal: Associação Brasileira de Engenharia Agrícola, 2009. 1 CD-ROM.

