

*Beleza* FL  
02948

I CURSO SOBRE MANEJO DE SOLO E ÁGUA  
EM PROPRIEDADES AGRÍCOLAS DO TRÓPICO SEMI-ÁRIDO  
PERÍODO: 4 a 29 de outubro de 1982

IRRIGAÇÃO POR SULCOS

Arnóbio Anselmo de Magalhães

1982

Petrolina, PE.

Irrigação por sulcos.

1982

FL - 05009



32410 - 1



CENTRO DE PESQUISA AGROPECUARIA DO  
TRÓPICO SEMI-ÁRIDO

CPATSA

IRRIGAÇÃO POR SULCOS <sup>1</sup>

Arnóbio Anselmo de Magalhães <sup>2</sup>

---

<sup>1</sup> Trabalho elaborado para o I Curso de Manejo de Solo e Água em Propriedades Agrícolas do Trópico Semi-Árido.

<sup>2</sup> Pesquisador em Irrigação do CPATSA/EMBRAPA, Petrolina, PE.

## IRRIGAÇÃO POR SULCO

Dentre dos métodos superficiais de aplicação de água, a irrigação por sulcos se constitui num dos processos mais conhecidos e utilizados no mundo inteiro, prestando-se basicamente para a irrigação da maioria das culturas, nos mais diversificados tipos de terrenos e solos. Neste tipo de irrigação, a aplicação da água ao solo se faz através de pequenos sulcos abertos entre as fileiras de plantas, cujos promovem o umedecimento do terreno pelo processo de infiltração. Neste método, a água é conduzida por meios canais até a área a ser irrigada, sendo em seguida derivada para cada um dos sulcos de infiltração através de sifões, comportas, etc. Em muitos casos, dependendo das condições técnicas e econômicas, os canais de distribuição podem ser substituídos por uma rede de tubulação (tubos janelados) que pode tornar mais prático o processo de dotação de água a cada um dos sulcos de irrigação. Ao contrário do que acontece com outros métodos, a irrigação por sulcos, caracteriza-se por promover apenas umedecimento parcial da superfície do solo (30 a 80% da superf. total), reduzindo assim, as perdas por evaporação, a formação de crostas em solos pesados e permitindo ao oposto de outros métodos, o cultivo do solo um pouco mais cedo após uma rega.

Quanto a declividade, embora o sistema de irrigação por sulcos funcione mais eficientemente em terrenos planos (0,2 a 0,3%), pode este sistema processar-se em terrenos de pendentes bem maiores que podem variar de 3% em cultivos de fileiras retas até 15% no caso de sulcos em contorno. São limitações deste método, apenas, a irrigação de solos de excessiva permeabilidade, rasos e de topografia muito irregular.

Comparado a outros métodos, o método de irrigação por sulcos pode dar uma boa eficiência de aplicação, principalmente, se considerarmos que com este sistema é possível se irrigar em condições topográficas relativamente desfavoráveis. Portanto, se projetado e manejado corretamente, o sistema de irrigação por sulcos, pode proporcionar uma alta eficiência de aplicação de água (entre 70 e 80%), com uma vantagem a mais de se alocar menor quantidade de recursos para os custos de implantação e operação do sistema.

## FORMA E TAMANHO DOS SULCOS

A forma dos sulcos tem uma considerável influência sobre a oportunidade e eficiência de irrigação. A seção transversal dos sulcos deve ter dimensões suficientes para o adequado transporte da água necessária, afim de que se possa obter, em toda longitude dos sulcos, uma distribuição bastante uniforme. A forma mais comumente usada é do tipo em V, com 15 a 20 cm de profundidade e 25 a 30 cm de largura, podendo conduzir em pendentes relativamente suaves, um caudal de até 3,0 l/s. O formato do sulco geralmente está condicionado ao tipo de cultura, equipamento agrícola utilizado e ao tipo de solo. Em culturas de sistema radicular superficial é conveniente a utilização de sulcos rasos (profundidade de 10 a 15 cm) e de declividade uniforme para que a camada de solo mais superficial seja adequadamente umedecida. Já para culturas perenes ou anuais de sistema radicular de desenvolvimento acentuado, é preferível o uso de sulcos mais profundos e, neste caso, a pendente dos sulcos deixa de ter importância marcante como no caso dos sulcos rasos. Os sulcos largos e pouco profundos, são mais empregados em terrenos que absorvem a água lentamente. Estes sulcos são geralmente em forma de "U" e têm uma largura de fundo de cerca de 20 a 25 cm, podendo ser utilizada largura de até 60 cm ou mais, na exploração de culturas tais como uva, melão, pomares, etc.

As primeiras irrigações em solos recém-preparados, modificam a seção dos sulcos devido ao arraste considerável de material. Uma vez atingido a estabilidade de perfil, e dependendo da textura do solo, estes sulcos tomam forma parabólica, retangular ou trapezoidal.

## ESPAÇAMENTO

O espaçamento entre sulcos está condicionado ao tipo de cultura e equipamento agrícola utilizado nas práticas culturais, bem como, a natureza física e profundidade do solo que se deseja irrigar, de acordo com a profundidade de enraizamento do cultivo. De acordo com a Fig. 1, onde se apresentam diferentes relações de largura e profundidade de umedecimento em função da textura do solo, podemos concluir, em base a critérios estritamente edáficos, que o espaçamento entre sulcos deve ser menor em solos arenosos do que



em solos de textura fina. A definição do espaçamento deve ser feita de forma bastante cuidadosa, de maneira a se obter uma irrigação eficiente que beneficie todo o sistema radicular da planta, sem que ocorra grandes perdas por percolação ou fique uma faixa de solo seco entre eles. Na Fig. 2a, como consequência do excessivo espaçamento entre sulcos, temos um irregular umedecimento do solo e baixa eficiência de distribuição. Ao contrário, na Fig. 2b, temos um correto espaçamento em relação a profundidade de solo (D) que se deseja molhar.

O objetivo maior ao se selecionar o distanciamento correto entre sulcos, é assegurar que o movimento lateral da água entre sulcos adjacentes, umedeça a totalidade da zona radicular das plantas, antes que ultrapasse o limite de profundidade em que as raízes podem ainda extrair umidade. O perfil de umedecimento, pode facilmente ser determinado através da abertura de trincheiras nos sulcos, logo após uma irrigação.

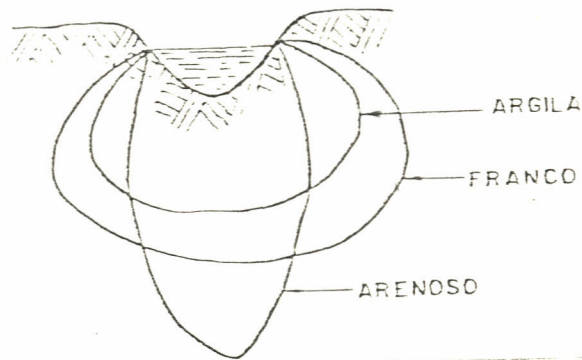


Figura 1.

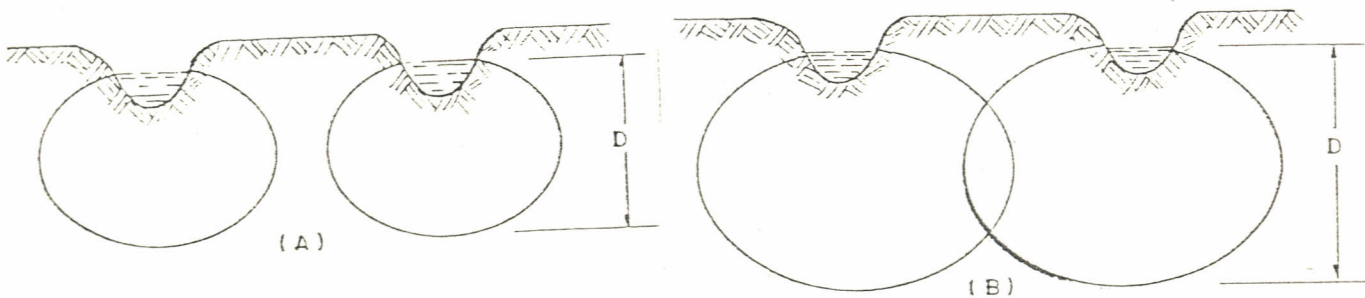


Figura 2.

## DECLIVIDADE

A declividade tem considerável importância na irrigação por sulcos ou faixas, influenciando marcadamente sobre o avanço da água e seus efeitos erosivos. A declividade está geralmente associada a natureza do solo, comprimento e quantidade de água a ser aplicada em cada sulco. Até certos limites, para a aplicação de um maior volume de água em solos de textura pesada e sulcos relativamente curtos, menor deve ser a pendente destes sulcos.

A velocidade da água nos sulcos é diretamente proporcional à raiz quadrada da declividade, sendo também, proporcional a forma geométrica do sulco, a sua rugosidade e a quantidade de água conduzida.

A erosão nos sulcos está diretamente associada à velocidade com que a água se movimenta ao longo destes sulcos e ao grau de erodibilidade do solo. Em geral, os solos arenosos são mais facilmente erodíveis que os solos de textura pesada, estando a máxima erodibilidade associada com solos coesivos que apresentam tamanhos de partícula entre limo e areia.

Em geral, os limites de declividade para que se obtenha uma boa uniformidade de aplicação na irrigação por sulcos, se situam entre 0,1 a 0,5% para solos arenosos e 0,5 até 1,5% para solos mais argilosos, existindo situações, que de conformidade com sistema de irrigação por sulcos usado, podem variar de 0% até 15% de declividade (sulcos em contorno, corrugação, etc.).

## VAZÃO

A vazão a ser aplicada em cada sulco depende de sua seção de escoamento, características hidráulicas e da força erosiva da água. Maiores uniformidades de aplicação de água somente são obtidas através do processo de redução de vazão. Isto é, inicialmente aplica-se a máxima vazão não erosiva que o sulco pode conduzir, reduzindo-a em seguida, logo que a frente de água atinja o final do sulco. Esta prática permite que haja uma melhor uniformidade de distribuição de água, evitando as perdas acentuadas por percolação e escoamento no início e final do sulco.

A vazão máxima não erosiva pode ser determinada, segundo GARDNER, pe-

la seguinte equação:

$$q_{\max} = \frac{C_e}{S^a}$$

onde:

$q_{\max}$  = vazão máxima não erosiva

$S$  = declividade (%)

$C_e$  e  $a$  = coeficientes que dependem do tipo de solo

TABELA 1 - Valores de  $C$  e  $a$  para diferentes tipos de solos

Textura	$C$	$a$
Fina	0,988	0,550
Muito fina	0,892	0,937
Média	0,613	0,733
Grossa	0,644	0,704
Muito grossa	0,665	0,548

A vazão máxima não erosiva, pode ser ainda determinada através da equação de CRIDDLE (mais conhecida na literatura), onde os valores dos coeficientes acima foram unificados ( $C= 0,631$  e  $a= 1$ ) para os diferentes tipos de solos.

$$q_{\max} = \frac{0,631}{S} \quad (1/s)$$

Vale salientar que esta equação não tem validade para declividades muito pequenas, já que quando a declividade tende para zero a vazão máxima tende ao infinito. Portanto, apesar de existirem outras equações mais completas que tratam do assunto e que também apresentam certas limitações, o mais racional, seria fazer a determinação da vazão ideal através de testes de campo.



## COMPRIMENTO DE SULCO

A determinação do comprimento dos sulcos é uma das etapas que merece maior atenção no projeto de um sistema de irrigação. O comprimento a ser conferido aos sulcos de irrigação depende do tipo de solo, de sua declividade e do volume de água a ser aplicada, devendo ser o maior possível desde que se consiga uma boa uniformidade de distribuição. Os sulcos demasiadamente longos têm inconveniente de contribuir negativamente na uniformidade de distribuição de água, acarretando perdas excessivas por percolação no início dos sulcos e, em certos casos, deficiência de umidade em sua extremidade inferior. Ao contrário, a redução do comprimento dos sulcos, conduz invariavelmente a um maior parcelamento da área, a uma maior necessidade de canais de alimentação e outras estruturas de irrigação, bem como dificulta as práticas mecanizadas e promove o aumento dos custos de operação e conservação do sistema.

A capacidade de infiltração do solo, declividade e vazão, são parâmetros que devem ser observados cuidadosamente. Assim, para uma mesma declividade, os sulcos devem ser mais curtos em solos arenosos do que em solos argilosos. Para sulcos com pente inferior a 0,3%, o comprimento do sulco pode aumentar com o aumento da declividade, acontecendo o contrário quando esta declividade excede a 0,3%. No que diz respeito a vazão, o comprimento do sulco deve estar numa conformidade tal, de maneira que a frente de avanço alcance o seu final, em um tempo menor ou igual ao tempo necessário para que se infiltre a lâmina de irrigação a ser aplicada. O comprimento do sulco pode também aumentar com o aumento da lâmina de água a ser aplicada, podendo ser mais longo em solos pesados com cultura de sistema radicular profundo do que em solos arenosos com culturas de sistema radicular superficial.

Uma boa forma de se determinar o comprimento dos sulcos, consiste em se fornecer uma vazão máxima não erosiva na cabeceira do sulco, verificando-se após 1/4 do tempo requerido para se aplicar a lâmina necessária, a longitude alcançada pela fonte de avanço. Esta distância percorrida, seria portanto, o comprimento ideal do sulco.

Na tabela que se segue, do U.S. Soil Conservation Service, são apresentados alguns valores de longitudes de sulco.



TABELA 2 - Comprimento e vazões máximas para sulcos de irrigação, segundo a declividade, textura e lâmina de água a ser aplicada.

Declividade %	Vazão máxima permis- sível 1/s	Comprimento dos sulcos (m)								
		Textura								
		Grossa			Média			Fina		
		Lâmina de água a aplicar (mm)								
		50	100	150	50	100	150	50	100	150
0,25	2,50	150	220	265	250	350	440	320	460	535
0,50	1,25	105	145	180	170	245	300	225	310	380
0,75	0,83	80	115	145	140	190	235	175	250	305
1,00	0,63	70	100	120	115	165	200	150	230	260
1,50	0,41	60	80	100	95	130	160	120	175	215
2,00	0,23	50	70	85	80	110	140	105	145	185

#### AVANÇO DA ÁGUA NO SULCO

A velocidade de avanço da água nos sulcos está condicionada a capacidade de infiltração do solo, declividade, rugosidade, comprimento do sulco e a vazão aplicada. A determinação da velocidade de avanço deve ser realizada na própria área que se deseja irrigar, em sulcos similares aos que são ou serão utilizados na irrigação da referida área. O teste consiste em se anotar o tempo gasto em minutos, para que a frente de avanço alcance pontos predefinidos ao longo do sulco, marcados através de estacas equidistantes de 10, 20, 30 ou 40 m. Sempre que possível e as condições assim o permitirem, deve-se também determinar a curva de recessão, anotando-se o tempo gasto para que a água ainda remanescente no sulco, uma vez tendo sido cortada a vazão, infiltre-se completamente ao longo de todo o sulco. Em se tratando de sulcos novos, é aconselhável a realização dos testes somente após 2 ou 3 irrigações, quando os sulcos tenham então adquirido estabilidade de forma e rugosidade. A velocidade de avanço da água nos sulcos pode ser representada por meio de curvas ou de equações matemáticas, sendo a representação mais generalizada, dada como uma função exponencial da variável tempo.

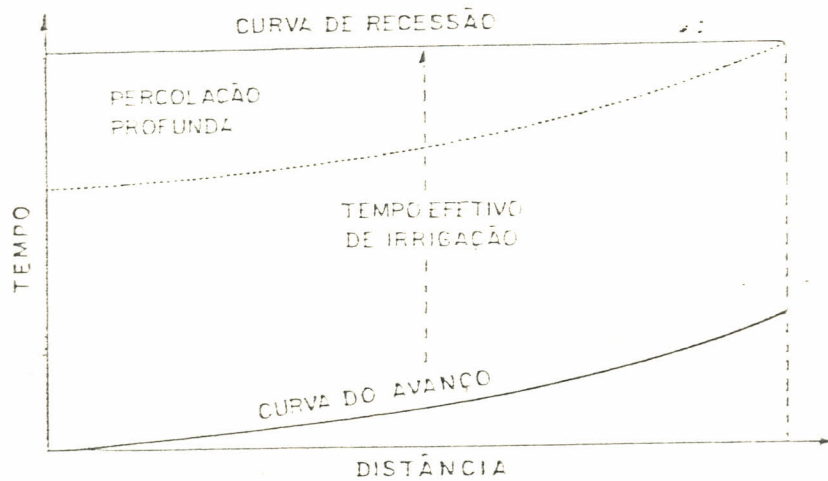


Fig.3 Curvas de avanço e recessão

Equação representativa  $\rightarrow L = b T^a$

T = tempo de avanço (min)

L = comprimento de sulcos (m)

b e a = coeficientes

#### CARACTERÍSTICAS DE UMEDECIMENTO

Durante o processo de avanço, a água vai se infiltrando gradativamente no solo através do perímetro irrigado do sulco, movimentando-se com igual magnitude em todas as direções, delimitando seções transversais circulares ou elípticas.

Em condições de solos não saturados, o movimento da água é provocado pela ação dos gradientes de potencial matricial e gravitacional. O movimento horizontal ascendente se deve a gradientes de potencial matricial, ao passo que o movimento vertical descendente depende de ambos os gradientes de potencial (matricial e gravitacional). Portanto, o total umedecimento do solo se dá no sentido vertical descendente por ação da gravidade e no sentido horizontal e vertical ascendente por ação da capilaridade, sendo a profundida-

de e largura de umedecimento dependentes da natureza do solo.

Em se tratando de solos profundos e arenosos em que há predominância do movimento vertical devido a ação da gravidade, é frequente ocorrer um estendimento da frente de umidade em profundidade, antes que o movimento lateral alcance a linha média entre os sulcos. Neste caso é aconselhável reduzir o tempo de aplicação com a finalidade de evitar perdas excessivas de água por percolação profunda.

### DISTRIBUIÇÃO E CONTROLE DE VAZÃO

Além da forma pouco recomendável de se distribuir água as parcelas através de pequenas aberturas feitas no próprio canal de alimentação, existem vários outros dispositivos que podem ser usados, segundo o grau de controle que se deseja na aplicação de água. Sempre que possível, deve-se optar por um adequado e correto controle de distribuição de água, com vistas a se obter uma melhor eficiência de irrigação. Dentre os dispositivos utilizados, de controle e distribuição de água, podemos citar:

SIFÃO - Se constitui num dos procedimentos de mais baixo custo de controle e distribuição de água. São feitos de metal leve, plástico ou borracha, fácil de serem instalados e mudados de um sulco a outro. Têm a vantagem de conservar intactos os taludes do canal de alimentação e se prestam muito bem para o processo de redução de vazão (colocação de 2 ou 3 sifões e posterior retirada de um ou mais sifões, logo que a água chegue ao final do sulco). Sua vazão, além do diâmetro, depende da diferença de nível da superfície livre da água no canal à extremidade do sifão (carga hidráulica). Na Tabela 3, tem-se as vazões para os sifões de diâmetro comumente usados em irrigação.

SPILE - São tubos de comprimento relativamente curto (60 a 100 cm), instalados permanentemente nas paredes dos canais, na base de um spile para cada sulco. A regulagem da vazão é conseguida pela variação da carga hidráulica ou do grau de obstrução da entrada de fluxos nos spiles.

TUBULAÇÃO MÓVEL COM PEQUENAS COMPORIAS - (mais conhecidos como tubos janelados). São tubulações móveis de engate rápido semelhante aos utilizados



na irrigação por aspersão. As pequenas comportas facilitam o controle da água que chega ao sulco, permitindo variações de vazão, que podem ir de 0,5 a 1,5 litros ou mais por segundo. Apresentam a vantagem de se prestarem para a irrigação em terrenos não bem sistematizados com cultivos anuais, funcionam com baixa pressão. Substituem o canal de alimentação e eliminam as perdas por infiltração que se verificam nos canais de terra.

TUBULAÇÃO SUBTERRÂNEA - Método californiano, também conhecido como método de baixa pressão. Trata-se de tubulação enterrada em que a saída d'água para a superfície do solo se faz por meio de hidrantes. A distância entre estes hidrantes obedece o espaçamento estabelecido para os sulcos, podendo ficar em frente a cada sulco ou grupo de sulcos, sendo que neste caso a distribuição de água é feita através de pequenos canais auxiliares.

TABELA 3 - Vazão em litros por segundos através de sifões e tubos curtos.

DIÂMETRO (cm)	CARGA HIDRÁULICA (cm)							
	2,5	5,0	7,5	10	12,5	15	17,5	20
1	0,03	0,05	0,06	0,07	0,07	0,08	0,09	0,09
2	0,13	0,19	0,23	0,26	0,30	0,32	0,35	0,37
3	0,30	0,42	0,51	0,59	0,66	0,73	0,79	0,84
4	0,53	0,75	0,91	1,06	1,18	1,29	1,40	1,49
5	0,83	1,17	1,43	1,65	1,85	2,02	2,18	2,33
6	1,19	1,68	2,06	2,38	2,66	2,91	3,14	3,36
7	1,62	2,29	2,80	3,24	3,62	3,96	4,28	4,58
8	2,11	2,99	3,66	4,23	4,72	5,18	5,59	5,98
9	2,67	3,78	4,63	5,35	5,98	6,55	7,07	7,56
10	3,30	4,67	5,72	6,60	7,38	8,09	8,73	9,34

#### DISPOSIÇÕES ESPECIAIS E TIPOS DE SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO POR SULCO EM FUNÇÃO DO SOLO, CULTIVO E TOPOGRAFIA

- Sulcos Clássicos - Sistema largamento usado em terrenos previamente sistematizados. Comportam acentuada variação de vazão e se prestam fa-



cilmente para o processo de redução da vazão inicial, proporcionando assim, maiores eficiências de irrigação. São fácil de serem construídos, exigem menos mão-de-obra de irrigação e proporcionam maiores rendimentos nas operações mecanizadas.

- Corrugação - Sistema de irrigação em que os sulcos são construídos no sentido da maior declividade do terreno. Os sulcos de dimensões diminutas e espaçamento relativamente curto, comportam apenas, pequenas vazões. Esta modalidade de irrigação é muito utilizada na irrigação de pastagens, cereais e plantas de pequenos espaçamentos (alta densidade de plantio) em terrenos irregulares. Para irrigação de pastagens em solos firmes, este sistema pode ser utilizado em terrenos de declividade de até 15%. Na Tabela 4, encontram-se recomendações de comprimento e espaçamento para o método em pauta.

- Sulcos em contorno - Esta disposição é empregada em terrenos demasiadamente inclinados e irregulares, onde não é conveniente a sistematização do solo ou a aplicação de outro método de irrigação. É usado em cultivos semeados em linha e em praticamente todos os solos irrigáveis. Neste sistema, o canal alimentador é construído no sentido da máxima pendente, devendo serem instalados saltos e represas para se evitar erosão. Os sulcos são construídos paralelos as curvas de nível e com ligeira declividade para que seja facilitado o deslocamento da água em toda a sua longitude. Este método exige sistema de drenagem e bastante atenção do irrigante, a fim de que sejam evitados possíveis transbordamentos durante a irrigação.

- Sulcos em zig-zag - São empregados em terrenos de pendente moderada e baixa capacidade de infiltração de água, com a finalidade de reduzir a declividade média e a velocidade de avanço da água no sulco, isto, através do aumento efetivo do comprimento do sulco. Este sistema, é geralmente utilizado na irrigação de fruteiras.

- Sulcos fechados - Sistema que consiste na aplicação de água em sulcos previamente fechados no pé, com eliminação das perdas por escorrimento no seu final. Estes sulcos são construídos com declividade nula ou muito suave, devendo ter reduzido comprimento e secção considerável, a fim de que seja amenizado o efeito de desuniformidade na distribuição de água. Se os sulcos têm uma leve inclinação, o maior tirante d'água no pé do sulco tende a

compensar a diferença de infiltração entre os seus extremos.

TABELA 4 - Comprimento e espaçamento dos sulcos de irrigação por corrugação, (em metros) adaptado por Booher.

COLO E PLANTA	DECLIVIDADE %	TEX. FINA		TEXT. MÉDIA		TEXT. GROSSA	
		Compr.	Espaç.	Compr.	Espaç.	Compr.	Espaç.
CULTURAS DE RAIZES PROFUNDAS	2	180	0,75	130	0,70	70	0,60
	4	120	0,65	90	0,65	45	0,55
	6	90	0,60	75	0,60	40	0,50
	8	80	0,55	60	0,55	30	0,45
	10	70	0,50	50	0,50	-	-
	12	60	0,45	40	0,45	-	-
CULTURAS DE RAIZES SUPERFICIAIS	2	120	0,65	90	0,55	45	0,45
	4	85	0,60	60	0,50	30	0,45
	6	70	0,55	50	0,45		
	8	60	0,50	45	0,45		
	10	55	0,45	40	0,40		
	12	50	0,40	35	0,40		

#### LÂMINA DE IRRIGAÇÃO

Em se tratando de irrigação por sulco, é importante que durante o período de rega a água permaneça na extremidade final do sulco, o tempo necessário para que neste ponto se infiltre a lâmina que se deseja aplicar.

Para que se tenha uma boa eficiência de irrigação, é importante que se conheça o tempo de oportunidade de infiltração ao longo de todo o sulco, para que se possa melhor manejar o sistema e evitar assim, perdas excessivas por percolação e escoamento (runoff). O tempo de oportunidade de infiltração é dado pela diferença de tempo entre a curva de recessão e de avanço de água no sulco. A curva de recessão, na maioria dos casos, pode ser considera

da sem muita margem de erro, como uma linha horizontal traçada a partir do momento em que se corta a vazão aplicada ao sulco (Fig 4).

Em resumo, na prática de irrigação por sulco, além das lâminas infiltradas no início e final do sulco, é também necessário conhecer a lâmina média infiltrada.

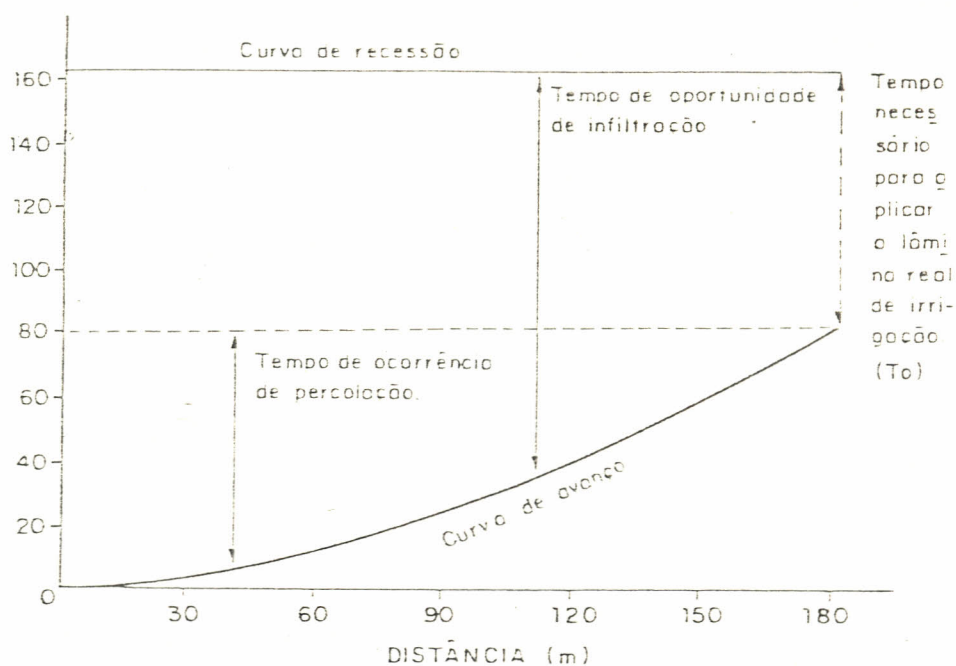


Fig. 4 - Curvas de avanço e recessão.

A lâmina média aplicada, pode ser determinada pela seguinte equação:

$$L_m = \frac{T_i \times q}{C \times E} \times 60$$

onde:

$L_m$  = lâmina média aplicada (mm)

$T_i$  = tempo de aplicação de água (min)

$q$  = vazão aplicada por sulco (l/s)

$C$  = comprimento do sulco (m)

$E$  = espaçamento entre sulcos (m)



Em caso de uso do processo de redução de vazão, assumir:

$$L_m = \frac{T_{av} \times q_i + (T_i - T_{av}) q_r}{C \times E} \times 60$$

onde:

$T_{av}$  = tempo de avanço (min)

$T_i$  = tempo de aplicação de água no início do sulco (min)

$q_i$  = vazão reduzida l/s

### EFICIÊNCIA DE IRRIGAÇÃO

Na avaliação de um projeto de irrigação, as principais eficiências a serem determinadas são:

- Eficiência de Condução - Nos dá a estimativa das perdas de água ocorrida, desde a fonte de captação até a entrada da parcela a ser irrigada.

$$E_c = \frac{V_a}{V_d} \times 100$$

onde:

$E_c$  = eficiência de condução (%)

$V_a$  = volume aplicado na área de irrigação ( $m^3$ )

$V_d$  = volume de água derivada da fonte ( $m^3$ )

- Eficiência de Distribuição - Corresponde a estimativa da uniformidade de infiltração ao longo do sulco. Esta eficiência diz respeito a relação entre a lâmina mínima infiltrada no solo e a lâmina média aplicada. Portanto, utilizando a equação de infiltração, podemos facilmente determinar a eficiência de distribuição.

$$E_d = \frac{L_f}{(L_i + L_f)/2} \times 100$$

onde:

$E_d$  = eficiência de distribuição (%)

$L_i$  = lâmina infiltrada no início do sulco (mm)

$L_f$  = lâmina infiltrada no final do sulco (mm)



Sob condições adequadas de manejo de irrigação, exceto para solos demasiadamente permeáveis, a eficiência de distribuição pode alcançar valores acima de 80%.

- Eficiência de Aplicação - Corresponde ao percentual do total de água aplicada na irrigação que fica em disponibilidade para as plantas.

$$E_a = \frac{L_f}{L_m} \times 100$$

onde:

$L_f$  = lâmina infiltrada no final do sulco (mm)

$L_m$  = lâmina média aplicada por sulco (mm)

Partindo-se do conhecimento prévio da relação entre a vazão de entrada e de saída no final do sulco, bem como do expoente (n) da equação de infiltração acumulada, pode-se também determinar a eficiência de aplicação pela seguinte aplicação:

$$E_a = 1 - \left( \frac{T_{irr}}{T_{av}} \right) \left( \frac{q_s}{q_e} \right) - \frac{(R + 1)^n - R^n}{(R + 1) + R^n} \times 100$$

onde:

$E_a$  = eficiência de aplicação (%)

$T_{irr}$  = tempo de irrigação (min)

$T_{av}$  = tempo de avanço (min)

$q_e$  e  $q_s$  = vazão de entrada e saída (l/s)

$$R = \frac{T_{irr}}{T_{av}}$$

#### ANÁLISE DAS PERDAS DE ÁGUA

Na irrigação por sulcos, dada a pouca importância que tem as perdas por evaporação, temos somente a considerar dois tipos expressivos de perdas de água: as perdas por percolação profunda e as perdas por escoamento no final do sulco.

- Perdas por percolação - A percentagem do total de água aplicada na irrigação que se perde por percolação, pode ser estimada pela seguinte equação:

$$P_p = \frac{L_p}{L_m} \times 100 \quad \therefore \quad L_p = \frac{L_i - L_f}{2}$$

onde:

$P_p$  = perdas por percolação (%)

$L_p$  = lâmina percolada (mm)

Segundo Bishop, as perdas por percolação profunda abaixo da zona de exploração radicular, podem também ser estimadas a partir da relação tempo de irrigação-tempo de avanço ( $R = T_{IRR}/T_{AV}$ ) e do parâmetro ( $n$ ) da equação de infiltração acumulada. Considerando portanto, a equação de infiltração ( $I = KT^n$ ) e a relação adimensional ( $R$ ), pode-se determinar a percentagem de água percolada pela seguinte fórmula:

$$P_p = \left( \frac{T_{irr}}{T_{irr} + T_{av}} \right) \left( \frac{q_s}{q_e} \right) \times 100$$

em que:

$P_p$  = perda por percolação

$q_e$  e  $q_s$  = vazão de entrada e saída

- Perdas por escoamento (Runoff) - Corresponde a percentagem de água que se perde por escoamento no final do sulco durante as irrigações. Pode ser estimada pela seguinte equação:

$$PE = \frac{LR}{L_m} \times 100 \quad \text{e} \quad LR = L_m - (L_f + L_p)$$

onde:

$PE$  = percentagem de água perdida por escoamento (%)

$LR$  = lâmina média equivalente à "runoff".

Conforme definido por Willardson e Bishop, as perdas por escoamento podem ser também determinadas pela equação que se segue:

$$PE = \left( \frac{T_{irr}}{T_{irr} + T_{av}} \right) \left( \frac{q_s}{q_e} \right) \times 100$$

onde:

PE = percentagem de água perdida por runoff (%)  
 $q_e$  e  $q_s$  = vazão de entrada e saída (l/s)

### PROJETO DE IRRIGAÇÃO POR SULCO

A elaboração de um projeto de irrigação por sulco, se faz em base a uma série de dados obtidos através de testes de campo, realizados no próprio local onde será implantado o sistema.

#### PROJETO (exemplificação)

Dimensionar um sistema de irrigação por sulco para uma área de 10 ha (Fig 5), sistematizada, pendente de 1%, tomando como base as seguintes condições:

Cultura - feijão vigna

Espaçamento - 1,0 m entre linhas por 0,5 m entre plantas

Prof. efetiva do sistema radicular - 0,50 m

Evapotranspiração - 4 mm/dia

Solo - textura argilosa

Capacidade de campo - 30%

Ponto de murcha - 17%

Densidade aparente - 1,2 g/cm<sup>3</sup>

Irrigação - utilizar apenas 50% da água disponível

Os dados inerentes a velocidade de avanço, infiltração instantânea e acumulada, são apresentados nas tabelas e figuras que se seguem.

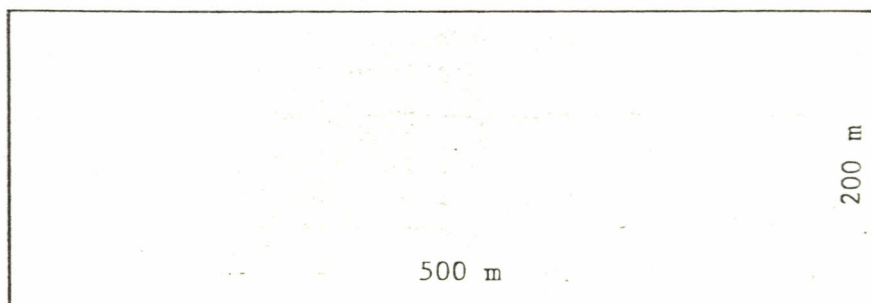


Fig. 5 - área do projeto



TABELA 5 - Avanço da água no sulco.

DISTÂNCIA (m)	TEMPO ACUMULADO		
	Sulco - A	Sulco - B	Sulco - C
0	-	-	-
20	5	2	1
40	15	6	4
60	28	12	9
80	53	21	12
100		33	16
120		43	21
140		52	27
160		63	33
180		77	39
200		90	47

OBS: As vazões correspondentes a 0,5 e 1,5 l/s (sulcos A e C) foram previamente descartadas. A primeira por se resultar insuficiente e a segunda por provocar erosão nos sulcos.

TABELA 6 - Infiltração da água no solo.

Medição de vazão - calha WSC (0 - 100 m)

TEMPO ACUMUL. (min)	SULCO - B				
	Vazão de Ent. (l/min)	Vazão de Saída (l/min)	VELOCIDADE DE INFILTRAÇÃO		
			l/min/100m	l/min/m	mm/h
-	VAZÃO MÉDIA = 60 l/min				
2		11,4	48,6	0,486	29,16
9		30,0	30,0	0,300	18,00
19		37,8	22,2	0,222	13,32
29		39,6	20,4	0,204	12,24
49		42,6	17,4	0,174	10,44
64		43,8	16,2	0,162	9,72
79		45,0	15,0	0,150	9,00
189		45,6	14,4	0,144	8,64
101		46,2	13,8	0,138	8,28
119		46,8	13,2	0,132	7,92
149		46,8	13,2	0,132	7,92



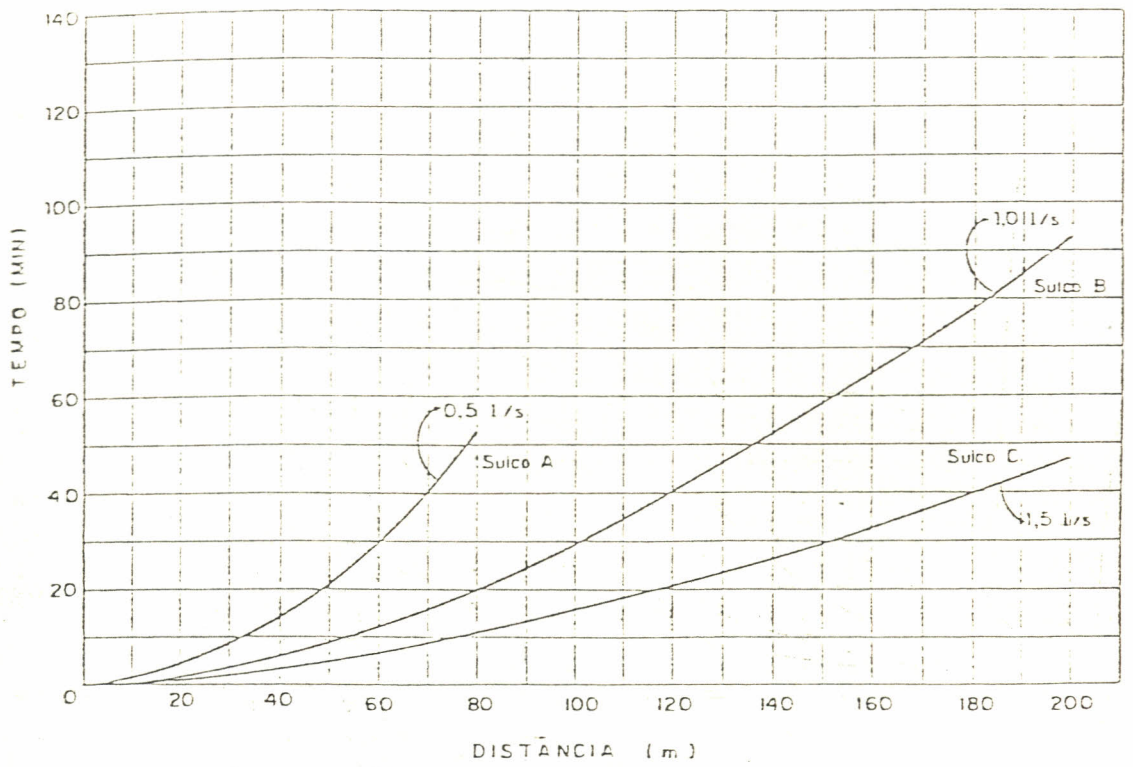


Fig. 6 - Curvas de avanço da água no sulco.

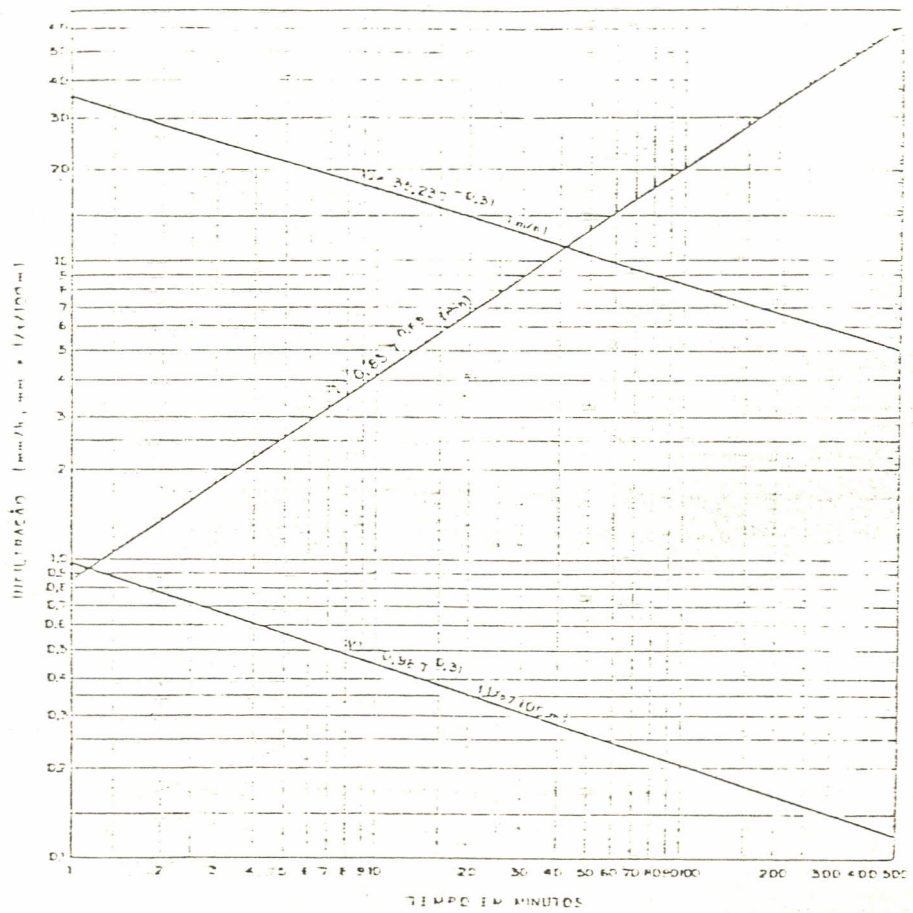


Fig. 7 - Curvas de infiltração para o sulco B.

Equações representativas:

$$VI = 32,2 T^{-0,31} \text{ (mm/h)}$$

$$I = 0,85 T^{0,69} \text{ (mm)}$$

$$T = \left( \frac{I \text{ (mm)}}{0,85} \right)^{1/0,69} \text{ (min)}$$

### CÁLCULOS

a) Lâmina a ser aplicada no final do sulco por irrigação

$$LR = 10 \left( \frac{C.C. - PM}{100} \right) \times d \times p \times 0,5$$

$$LR = 10 \left( \frac{30-18}{100} \right) \times 1,2 \times 50 \times 0,5 = 39 \text{ mm}$$

b) Turno de rega

$$TR = \frac{LR}{ETP} \quad \therefore \quad TR = \frac{39}{4} \approx 10 \text{ dias}$$

c) Tempo de irrigação necessário para infiltrar a lâmina de irrigação.

$$T = \left( \frac{I}{0,85} \right)^{1/0,69}$$

$$T = \left( \frac{39}{0,85} \right)^{1/0,69} \quad \therefore \quad T = 256,67 \text{ min}$$

d) Tempo total de aplicação (soma do tempo de avanço mais o tempo de irrigação).

$$Ti = Tav + T$$

$$\text{Para } 100 \text{ m de sulco, } Ti = 33 + 256,67 = 289,67 \text{ min}$$

$$\text{Para } 200 \text{ m de sulco, } Ti = 90 + 256,67 = 346,67 \text{ min}$$

e) Comprimento de sulco - como temos duas opções de comprimento (100 e 200 m), temos que nos adequar a longitude de sulco que ofereça melhor eficiência de aplicação.

Para sulcos de 100 m, temos:

$$L_m = \frac{q \times T_i}{C \times L} \times 60 \quad \therefore \quad L_m = \frac{1,0 \times 289,67}{100 \times 1,0} \times 60$$

$$L_m = 173,80 \text{ mm}$$

$$E_a = \frac{L_f}{L_m} \times 100 \quad \therefore \quad E_a = \frac{39}{173,8} \times 100 = 22,43 \%$$

Para sulcos de 200 m, a eficiência será:

$$L_m = \frac{1,0 \times 346,67}{200 \times 1,0} \times 60 = 104 \text{ mm}$$

$$E_a = \frac{39}{104} = 37,5\%$$

Verifica-se que para se fazer a irrigação com uma vazão constante de 1,0 l/s, o comprimento do sulco deve ser de 200 m.

Como a eficiência determinada é baixa (37,5%), fica evidente a necessidade de se fazer redução da vazão inicial para que se possa elevar a eficiência de aplicação. A vazão reduzida pode ser estimada pelo método da somatória das infiltrações parciais, com 10 minutos após a água chegar ao final do sulco.



TABELA 7 - Cálculo da vazão reduzida

DISTÂNCIA (m)	T.O.W. (min)	TEMPO EFET. DE IRRIGAÇÃO (min)	VELOC. DE INFILT. $V_i = 0,59 T^{-0,31}$ (l/min)		
			l/min/m	média/m	média/20 m
0	0	100	0,141	0,142	2,84
20	2	98	0,142	0,143	2,86
40	6	94	0,144	0,146	2,92
60	12	88	0,147	0,150	3,00
80	21	79	0,152	0,156	3,12
100	33	67	0,160	0,165	3,30
120	43	57	0,169	0,174	3,48
140	52	48	0,178	0,186	3,78
160	63	37	0,193	0,208	4,16
180	77	23	0,223	0,256	5,12
200	90	10	0,289		34,58 l/min

Verificamos que para sulcos de 200 m de comprimento, a vazão inicial de 1,0 l/s deve ser reduzida para 34,58 l/min (0,58 l/s).

Nestas condições, a eficiência de aplicação com redução de vazão, será:

$$L_m = \frac{T_{av} \times q_i + (T_i - T_{av}) q_r}{C \times L} \times 60$$

$$L_m = \frac{100 \times 1,0 + (346,67 - 100) \cdot 0,58}{200 \times 1,0} \times 60 = 72,9 \text{ mm}$$

$$E_a = \frac{L_f}{L_m} \times 100 \quad \therefore \quad E_a = \frac{39}{72,9} \times 100$$

$$E_a = 53,5\%$$

Como o ideal seria termos uma eficiência em torno de 70%, fica evidente que a eficiência encontrada ainda está baixa. Como para alterá-la teríamos que promover uma segunda redução de vazão (o que não é conveniente) ou aumen

tar o comprimento dos sulcos, o que é de todo impossível, devido as dimensões da área, temos que nos adequar a presente situação.

Portanto, o projeto terá sulcos com longitude de 200 m, com uma vazão de 1,0 l/s durante os primeiros 100 minutos e uma vazão reduzida de 0,58 l/s durante os 246 minutos restantes.

f) Eficiência de distribuição

$$Ed = \frac{Lf}{(Li + Lf)/2} \times 100$$

$$Ed = \frac{39}{(48,07 + 39)/2} \times 100 = 89,58\%$$

g) Perdas por percolação

$$Pp = \frac{Lp}{Lm} \times 100$$

$$Lp = \frac{Li + Lf}{2} \quad \therefore \quad Lp = \frac{48,07 - 39}{2} = 4,54 \text{ mm}$$

$$Pp = \frac{4,54}{72,9} \times 100 = 6,2\%$$

h) Perdas por escoamento (runoff)

$$Pr = \frac{LR}{Lm} \times 100 \quad \therefore \quad LR = Lm - (Lf + Lp)$$

$$LR = 72,9 - (39 + 4,54) = 29,36 \text{ mm}$$

logo:

$$Pr = \frac{29,36}{72,90} \times 100 = 40,2\%$$

i) Número de sulcos irrigados por dia

Nº total de sulcos = 500

$$N = \frac{T. \text{ de sulcos}}{T. \text{ de rega}} \quad \therefore \quad N = \frac{500}{10} = 50 \text{ sulcos}$$

Como o tempo de irrigação é de 5:47 horas, podemos dividir o total de sulcos em 2 parcelas, de forma a reduzir a vazão a ser conduzida pelo canal.

j) Vazão necessária

$$\text{Nº de sulcos irrigados por vez} = \frac{50}{2} = 25 \text{ sulcos}$$

$$\text{Nos 100 primeiros minutos} = 25 \text{ sulcos} \times 1,0 \text{ l/s} = 25 \text{ l/s}$$

$$\text{Nos 246 minutos restantes} = 25 \text{ sulcos} \times 0,58 \text{ l/s} = 14,5 \text{ l/s}$$

OBS: Embora deixe de ser apresentado o item último, o projeto somente estaria complementado, após o dimensionamento do conjunto moto-bomba e dos canais de distribuição e drenagem.



BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

- BOOHER, L.J. El Riego Superficial. FAO: Cuadernos de fomento agropecuario. nº 95. 1974.
- BARRETO, G.B. Irrigação: princípios, métodos e prática. Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, Campinas. 1979.
- BERNARDO, S. Irrigação por Superfície. U.F.V. 1980.
- DAKER, A. A água na Agricultura: Irrigação e Drenagem. 3º volume. 1971.
- GUROVICH, L.A. Principios Fundamentales y Métodos de Riego. Edições Teleduc. 1978.
- ISRAELSEN, O.W. & HASEN, E.V. Principios y Aplicaciones del Riego. 1973.
- LEAL PEREIRA, M.V. Determinação da Eficiência de Irrigação, a Nível de Parcela, no Projeto de Irrigação Bebedouro. U.F.V. 1976.
- OLITA, A.F.L. Os Métodos de Irrigação. Livraria Nobel S.A. 1978.
- OLSEN, E.C. Métodos e Sistemas de Riego. Department of Agricultural and Irrigation Engineering. Utah State University. 1983.
- OLSEN, E.C. Evaluacion de los Sistemas de Riego. Department of Agricultural and Irrigation Engineering. Utah State University. 1983.
- REICHARDT, K. A Água na Produção Agrícola. Piracicaba, 1978.
- SOARES, J.M. Eficiência de Irrigação por Sulco com Redução de Vazão e/ou Reuso de Água. Tese. UFV. 1980.

SALINAS, L.H.Y. Evaluacion del Sistema de Riego por Surcos. Departement of Agricultural and Irrigation Engineering. Utah State University. 1980.

WITHERS, B. & VIPOND, S. Irrigação - Projeto e Prática. E.P.U., 1977.