

---

## ***CAPÍTULO 3***

# **FASES DA IRRIGAÇÃO POR SUPERFÍCIE**

---

**J. A. FRIZZONE**

Dep. Eng. Rural - ESALQ/USP, CEP: 13418-900, Piracicaba - SP

## **1 INTRODUÇÃO**

Um processo típico de irrigação por superfície, com drenagem livre, pode ser caracterizado por quatro fases: avanço, reposição, depleção e recesso (Figura 1). A importância relativa de cada uma dessas fases na irrigação, depende do sistema utilizado. Assim, se o volume de água que um sulco pode conter é muito pequeno, a fase de recesso tem pouca importância.

O intervalo de tempo decorrido entre as curvas de avanço e de recesso, para cada ponto ao longo da parcela, determina o tempo de oportunidade para infiltração (ou tempo de infiltração no ponto considerado). elevada uniformidade de distribuição de água é assegurada quando as variações no tempo de infiltração ao longo do comprimento da parcela são pequenas.

A manifestação seqüencial das quatro fases pode ser interrompida se a irrigação cessar antes que a frente de avanço atinja o final da parcela. Nesse caso, a fase de reposição não se manifesta e a fase de recesso pode ocorrer simultaneamente à de avanço.

Para o estudo das fases da irrigação por superfície, considere a Figura 1 e as seguintes definições para as variáveis:

$T_o$  – tempo de oportunidade de infiltração;

$T_c$  – tempo de corte da vazão derivada à parcela;

$T_d$  – tempo de depleção da água na parcela;

$T_r$  – tempo de reposição da lâmina de irrigação;

$T_{rec}$  – tempo de recesso da água na parcela;

$T_x$  – tempo de avanço da água para uma distância  $x$ ;

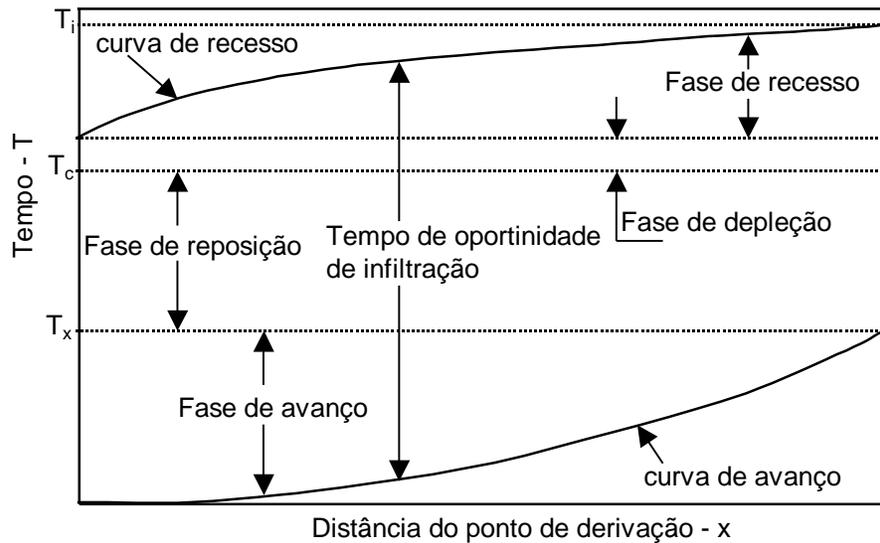


Figura 1. Fases da irrigação por superfície

## 2 FASE DE AVANÇO DA ÁGUA NO SULCO

### 2.1 O processo de avanço

O início da fase de avanço coincide com o início da irrigação, isto é, no momento em que a vazão é derivada à parcela a ser irrigada, e prolonga-se até que a frente de avanço atinge a sua extremidade final. A previsão da fase de avanço da água na superfície do solo não é simples, em razão da natureza do escoamento superficial, classificado como não permanente e espacialmente variado. Aplicando-se uma vazão constante à montante da parcela, a razão de avanço diminui progressivamente enquanto aumenta a área de infiltração, numa proporção maior que a redução da velocidade de infiltração média na distância considerada.

O avanço da água na superfície do solo é uma consideração importante no manejo dos sistemas de irrigação por superfície. O tempo que leva a água para alcançar o final da parcela é denominado tempo de avanço e define as perdas de água por percolação profunda e, portanto, tem grandes implicações na eficiência do sistema e na economia da irrigação. O tempo de avanço é uma função da vazão que escoar, do comprimento da parcela, da rugosidade da superfície de escoamento e da declividade da mesma. Elevados tempos de avanço proporcionam grandes perdas de água por percolação profunda, baixa eficiência de aplicação e baixa uniformidade de distribuição. É importante observar que a estimativa do tempo de avanço para o comprimento total é mais importante que o ajuste nos pontos intermediários.

## 2.2 A função de avanço

A representação gráfica da distância de avanço em função do tempo denomina-se curva de avanço. O comportamento do processo de avanço deve-se à redução da vazão com a distância. As práticas de cultivo e a própria irrigação, modificam a rugosidade da superfície de escoamento, a razão de infiltração, a forma da seção de escoamento e, conseqüentemente, as características do avanço de água. Outros fatores que afetam a taxa de avanço são a vazão aplicada, a declividade da parcela e a umidade do solo.

A expressão mais comumente utilizada para obter uma aproximação da fase de avanço da água no sulco é a função potência, definida como:

$$T_x = k x^b \quad (1)$$

sendo,

$T_x$  - tempo de avanço;

$x$  - distância de avanço em relação ao ponto de derivação; e

$k$  e  $b$  - parâmetros de ajuste.

Outras expressões foram propostas para descrever o avanço da água na superfície da parcela:

Função exponencial (Collins & Koluvek, 1981):

$$T_x = \frac{x}{k} e^{bx} \quad (2)$$

Função exponencial (Davis, 1961):

$$T_x = k(e^{bx} - 1) \quad (3)$$

Em irrigação por inundação e faixas, a fase de avanço é representada de forma diferente daquela em sulcos. Sendo o gradiente de declive dos tabuleiros quase nulo, as irregularidades da superfície do terreno têm maior efeito sobre a fase de avanço. Nos sistemas de faixas e tabuleiros, a curva de avanço é obtida representando-se em coordenadas cartesianas a área coberta pela água em função do tempo, isto é:

$$T_x = k A^b \quad (4)$$

## 2.3 Estimativa dos parâmetros da função de avanço

A equação (1) pode ser reescrita na forma:

$$\log T_x = \log k + b \log x \quad (5)$$

o que indica que  $\log T_x$  varia linearmente com  $\log x$ . Portanto, se os valores de  $T_x$  versus  $x$  lançados em um gráfico com coordenadas logarítmicas derem uma reta, a equação terá a forma potencial. Tendo-se retificado a curva de avanço em coordenadas logarítmicas, os parâmetros  $k$  e  $b$  da equação podem ser estimados por um dos seguintes métodos:

**1º) Método dos pontos escolhidos** – o método consiste em escolher dois pontos sobre a curva de avanço e aplicá-los à equação (5).

**Exemplo 1** – Consideremos os dados da Tabela 1, relativos ao avanço da água em sulcos de irrigação.

Tabela 1. Resultados de um teste de avanço da água no sulco

Distância (m)	Tempo de avanço (min)	Distância (m)	Tempo de avanço (min)
0	0	120	92
30	10	150	143
60	29	180	195
90	57	210	250

Na Figura 2 apresenta-se a curva de avanço obtida com os dados da Tabela 1, em coordenadas logarítmicas. Observe que o resultado é uma reta; escolhamos dois pontos,  $P_1$  e  $P_2$ , sobre esta reta, de forma que os mesmos estejam tão afastados quanto possível, porém sobre a reta, podendo ou não fazer parte dos dados originais. Sejam os pontos  $P_1$  com coordenadas  $x = 30\text{m}$  e  $T_x = 9,5\text{min}$  e  $P_2$  com coordenadas  $x = 210\text{m}$  e  $T_x = 245\text{min}$ . Substituindo-os na equação (5), teremos:

$$\begin{cases} \log 9,5 = \log k + b \log 30 \\ \log 245 = \log k + b \log 210 \end{cases}$$

o que resulta em  $b = 1,6702$  e  $k = 0,0324$ .

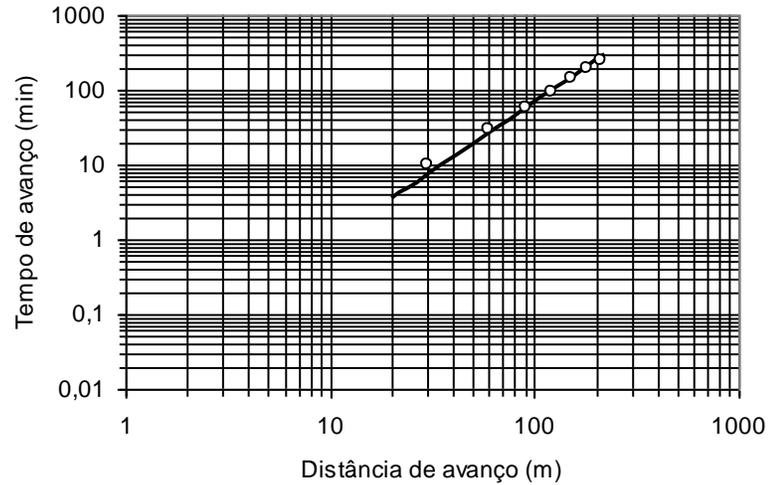


Figura 2. Curva de avanço em coordenadas logarítmicas

2º) **Método das médias** – A reta ideal que representa os pontos da Tabela 1 é tal que a soma algébrica dos desvios dos pontos em relação à reta seja zero. Consideremos positivos os desvios da reta aos pontos superiores e negativos os desvios da reta aos pontos inferiores. Se  $Y_i$  representa a ordenada dos pontos observados e  $Y_{c_i}$  a ordenada da reta estimada, podemos escrever:

$$\sum_{i=1}^N Y_i - \sum_{i=1}^N Y_{c_i} = 0 \quad (6)$$

Fazendo-se como na equação (5):

$$Y_{c_i} = \log T x_i$$

$$X_i = \log x_i$$

$$A = \log k$$

temos:

$$Y_{c_i} = A + b X_i \quad (7)$$

Então, podemos escrever:

$$\sum_{i=1}^N Y_{c_i} = N \cdot A + b \sum_{i=1}^N X_i \quad (8)$$

em que  $N$  é o número de pontos.

Substituindo-se a equação (8) em (6), tem-se:

$$\sum_{i=1}^N Y_i - N \cdot A - b \sum_{i=1}^N X_i = 0 \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^N Y_i = N \cdot A + b \sum_{i=1}^N X_i \quad (10)$$

**Exemplo 2** – Desde que se tenham duas constantes a serem determinadas,  $A$  e  $b$ , os dados da Tabela 1 podem ser divididos em dois grupos e obtidos os somatórios de  $X_i$  e  $Y_i$  para cada grupo, lembrando-se que  $X_i = \log x_i$  e  $Y_i = \log T_{x_i}$ .

Para os primeiros três elementos, tem-se:

$$\sum Y_i = 4,22; \quad \sum X_i = 5,21 \quad \text{e} \quad N = 3$$

Para os últimos quatro elementos, tem-se:

$$\sum Y_i = 8,81; \quad \sum X_i = 8,83 \quad \text{e} \quad N = 4$$

Substituindo esses valores na equação (10) e formando uma equação para cada grupo, teremos:

$$\begin{cases} 4,22 = 3 A + 5,21 b \\ 8,81 = 4 A + 8,83 b \end{cases}$$

Resolvendo simultaneamente as duas equações, resulta:

$$b = 1,690; \quad A = -1,5288 \quad \text{e} \quad k = 0,030$$

**3º Método dos dois pontos** – Considere o tempo de avanço para a metade do comprimento da parcela ( $T_{0,5x}$ ) e o tempo de avanço para o comprimento total ( $T_x$ ). Esses tempos podem ser combinados de modo a definir os parâmetros  $b$  e  $k$  da equação de avanço, da seguinte forma:

$$T_x = k x^b$$

$$\frac{T_{0,5x}}{T_x} = \frac{k (0,5 x)^b}{k x^b}$$

$$\ln\left(\frac{T_{0,5x}}{T_x}\right) = \ln\left(\frac{0,5 x}{x}\right)^b$$

$$b = \frac{\ln\left(\frac{T_{0,5x}}{T_x}\right)}{\ln(0,5)} \text{ e } k = \frac{T_x}{x^b} \quad (11)$$

**Exemplo 3** – Para valores de avanço de água no sulco dados na Tabela 1 e representados na Figura 2, obtém-se  $T_{0,5x} = 77$  min e  $T_x = 250$  min. Com esses dados aplica-se a equação (11):

$$b = \frac{\ln 77 - \ln 250}{\ln 0,5} = 1,699$$

$$k = \frac{250}{210^{1,699}} = 0,028$$

**4º) Método dos mínimos quadrados** – O problema a ser resolvido é o de determinar os parâmetros A e b da equação (7), observando que  $X_i = \log x_i$ ;  $Y_i = \log T_{x_i}$  e  $A = \log k$ . Para isso aplicaremos o método dos mínimos quadrados, que tem como objetivo tornar mínima soma dos quadrados dos desvios. Suponhamos que para cada uma das variáveis mencionadas temos N valores. cada valor  $X_i$  de X corresponderá a um valor  $Y_i$  de Y, segundo a função:

$$Y_i = A + b X_i + e_i \quad (12)$$

em que o desvio ou erro  $e_i$  tem média zero e variância igual a 1.

A equação (12) fornece:

$$-e_i = A + b X_i - Y_i \quad (13)$$

Logo,

$$e_i^2 = (A + b X_i - Y_i)^2 \quad (14)$$

e a soma dos quadrados dos desvios será:

$$SQD = \sum_{i=1}^N (A + b X_i - Y_i)^2 \quad (15)$$

Para tornar mínima a soma dos quadrados dos desvios, quando variam A e b, devemos igualar a zero as derivas parciais  $\partial SQD / \partial A$  e  $\partial SQD / \partial b$ , obtendo-se:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^N X_i Y_i - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i \sum_{i=1}^N Y_i}{\sum_{i=1}^N X_i^2 - \frac{1}{N} \left( \sum_{i=1}^N X_i \right)^2} \quad (16)$$

$$A = \bar{Y} - b \bar{X} \quad (17)$$

$$k = \text{ant log } A \quad (18)$$

sendo:

$\bar{X}$  - valor médio de  $X_i$ ;

$\bar{Y}$  - valor médio de  $Y_i$ .

**Exemplo 4** – Utilizando-se os dados de avanço da água no sulco da Tabela 1, para  $N = 7$ , calculamos os valores dos componentes das equações (16) e (17) e os respectivos valores de b e k da equação de avanço, como segue.

$$\sum_{i=1}^7 X_i = 14,0428; \quad \sum_{i=1}^7 Y_i = 12,9796; \quad \sum_{i=1}^7 X_i Y_i = 27,0153; \quad \sum_{i=1}^7 (X_i)^2 = 28,7001; \quad \left( \sum_{i=1}^7 X_i \right)^2 = 197,2002;$$

$$\sum_{i=1}^7 X_i \sum_{i=1}^7 Y_i = 182,2699; \quad \bar{X} = 2,006; \quad \bar{Y} = 1,8529$$

$$b = 1,6693 ; A = -1,4881 ; k = 0,0325$$

Os quatro métodos apresentados para estimar os parâmetros da equação de avanço proporcionam valores diferentes, ambos, porém, aceitáveis uma vez que a precisão dos dados raramente excederá a exatidão por qualquer um desses métodos. Obviamente que o método dos mínimos quadrados fornece melhores estimativas, entretanto o uso de cada um dependerá da precisão e da rapidez que se deseja.

## 2.4 Determinação da fase de avanço

Para determinar a taxa com que a água escoar sobre a superfície do solo, deve-se colocar estacas ao longo da parcela, em espaçamentos equidistantes e cronometrar o tempo gasto pela frente de avanço para atingir as sucessivas distâncias em relação ao início da parcela. Os espaçamentos comumente usados entre estacas são 20m ou 30m, exceto para parcelas curtas, em que o espaçamento deve ser menor, de forma a proporcionar seis ou mais pontos de medição. Em irrigação por sulcos o número de sulcos necessários para o teste não pode ser facilmente definido, pois depende da disponibilidade de material e mão-de-obra, tipo e uniformidade do solo, uniformidade do declive na parcela e, entre outros, uniformidade de forma e condições de rugosidade da superfície do solo. Nesses testes é comum obter a cota da superfície de escoamento nas seções correspondentes a cada estaca, o perímetro molhado, a largura da superfície de escoamento e a altura da lâmina superficial. Na Tabela 2 apresenta-se uma planilha para registro dos dados de campo; em cada linha são anotados os valores dos tempos de avanço e recesso obtidos em cada estação de medição e os parâmetros da geometria do sulco.

Tabela 2. Planilha para registro dos dados de avanço, recesso e geometria do sulco.

Umidade inicial do solo:						Data: ___/___/___	
Densidade global:						Local:	
Estação	Avanço					Recesso	
	Tempo		Geometria do sulco			Tempo	
	Instantâneo (horas)	Acumulado (minutos)	B (cm)	D (cm)	P <sub>m</sub> (cm)	Instantâneo (horas)	Acumulado (minutos)

B – largura da superfície do solo

D – altura da lâmina superficial

P<sub>m</sub> – Perímetro molhado

## 2.5 Exercício proposto

Considere os dados de avanço da água no sulco apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Tempo de avanço da água em um teste de campo (Vazão = 0,8l/s; Declividade = 0,8%)

Distância do início do sulco (m)	Tempo de avanço (min)	Distância do início do sulco (m)	Tempo de avanço (min)
0	0	120	48,0
20	5,0	140	60,5
40	10,5	160	68,0
60	19,2	180	81,3
80	30,0	200	93,5
100	37,9		

Pede-se:

- determinar a equação de avanço;
- conhecendo-se a equação de infiltração acumulada da água no sulco:  $I_{(cm)} = 0,18 T_{(min)}^{0,62}$ , calcular o tempo necessário para infiltrar uma lâmina de irrigação de 40 mm;
- determinar o comprimento do sulco considerando-se que a frente de avanço da água deve atingir o seu final em  $\frac{1}{4}$  do tempo para infiltrar a lâmina de irrigação de 40 mm;
- considerando-se que a lâmina de irrigação de 40 mm será infiltrada no final do sulco, qual a lâmina infiltrada no seu início?
- considerando-se que 40 mm corresponde a lâmina de irrigação real necessária a ser infiltrada no final do sulco e que o perfil de infiltração no solo possa ser considerado linear, qual o volume médio de água percolado por hectare?

## 3 FASES DE REPOSIÇÃO, DEPLEÇÃO E RECESSO

### 3.1 O processo de reposição

Quando a frente de avanço atinge o final da parcela, verifica-se, nesse instante, a ocorrência do escoamento superficial nesta extremidade, podendo caracterizar ou não uma perda de água, dependendo se existe sistema de reutilização da água. A fase de reposição compreende o intervalo de tempo entre o início do

escoamento no final da parcela e o instante em que é cessada a derivação de água à mesma, definindo o tempo de corte (Figura 1). Ao final desta fase deve-se garantir que grande parte da área tenha recebido a lâmina de irrigação necessária.

O desempenho satisfatório de um sistema de irrigação por sulcos está na dependência da duração da fase de reposição. Como a distribuição da água ao longo do sulco não é completamente uniforme, pode ocorrer que em alguns locais existe deficiência de água ao final dessa fase. Esta condição reduz consideravelmente a eficiência de armazenamento. Deve-se observar que, enquanto a uniformidade de distribuição e a eficiência de armazenamento aumentam em função do aumento do tempo de reposição, a eficiência de aplicação reduz-se com o aumento do tempo de ocorrência do escoamento superficial no final da parcela e com o aumento do tempo que ocorre percolação profunda nos locais onde o tempo de infiltração excede o tempo para aplicar a lâmina de irrigação real necessária.

O tempo de oportunidade de infiltração de água em um ponto qualquer  $i$  ao longo do sulco é calculado da seguinte forma:

$$T_{o(i)} = T_c - T_{x(i)} + T_d + T_{rec(i)} \quad (19)$$

observando-se que  $T_r = T_c - T_x$ , sendo  $T_x$  o tempo de avanço para o comprimento total  $x$  da parcela.

Tradicionalmente utiliza-se o critério proposto por Criddle et al. (1956) para definir a duração da fase de reposição: *a duração da fase de reposição deve ser suficiente para que a quantidade de água necessária à irrigação seja infiltrada no final da parcela*. Esse critério favorece a obtenção de elevados níveis de uniformidade de distribuição de água, porém tem como consequência a perda de água por percolação profunda ao longo de toda a parcela. A perda de água por escoamento superficial pode ser minimizada pela redução gradual da vazão derivada, a medida que a taxa de infiltração média ao longo de todo o comprimento molhado vai sendo reduzida. Entretanto, a alternativa de redução da vazão inicial requer maior utilização de mão-de-obra, o que nem sempre é bem aceita pelos irrigantes podendo comprometer o desempenho do sistema.

A rigor, a duração da fase de reposição é uma decisão econômica. A aplicação de água ao sulco deve continuar enquanto o acréscimo nos benefícios superar o acréscimo nos custos, por unidade de volume de água aplicada, onde a água é um fator escasso e a terra é abundante, ou por unidade de área onde a terra é escassa e a água é abundante. Nessa análise pode-se considerar que os benefícios sejam aqueles advindos da produtividade da cultura em função da incorporação de maior quantidade de água disponível ao solo, o que reduziria a área de déficit hídrico e aumentaria a eficiência de armazenamento. Os custos estariam relacionados, principalmente, às perdas de água decorrentes de uma maior duração da fase de reposição.

Considerando-se as dificuldades em se utilizar um critério econômico, Scaloppi (1986) sugere um critério técnico pelo qual o tempo de reposição no final da parcela deve se prolongar até que a vazão útil

infiltrada na área seja igual à soma das vazões perdidas por percolação profunda e por escoamento superficial no final da parcela. Isso significa que, enquanto o acréscimo na eficiência de armazenamento superar o decréscimo na eficiência de aplicação, a irrigação deve continuar. No momento em que se verificar igualdade dessas taxas de variação, deve-se encerrar a derivação de água ao sulco.

Salienta-se, entretanto, que os critérios propostos assumem que a duração das fases de depleção e de recesso não deve modificar significativamente o perfil de infiltração ao longo do sulco. Isso pode se verificar quando o volume de água armazenado sobre a superfície de escoamento, no instante do corte da derivação de água, for pequeno em relação ao volume infiltrado. O volume de água armazenado sobre a superfície aumenta com a redução do gradiente de declive e com o aumento da vazão derivada e da resistência ao escoamento superficial. Em sulcos de infiltração com gradientes de declive superiores a 0,4%, pode-se assumir que o volume de água existente sobre a superfície de escoamento, no momento do corte da vazão, é insignificante em relação ao volume infiltrado. Por outro lado, esta hipótese não é igualmente verdadeira para faixas com gradiente de declive muito reduzido ou nulo.

### **3.2 O processo de depleção**

A fase de reposição prolonga-se até que a quantidade de água infiltrada, em grande parte do comprimento do sulco, seja aproximadamente igual à necessária. A interrupção no fornecimento de água determina o início da fase de depleção. Esta é geralmente a fase de menor duração e, em irrigação por sulcos, é praticamente imperceptível podendo, por isso, ser desprezada.

Assumindo como referência o início da parcela, o término dessa fase ocorre quando, neste ponto, toda a água foi removida da superfície por escoamento superficial ou infiltração, determinando o início da fase de recesso. Algumas análises teóricas simplificadas assumem que o tempo de corte no fornecimento de água à parcela marca o início da fase de recesso.

### **3.3 O processo de recesso**

A duração da fase de recesso está condicionada ao deslocamento progressivo de uma ou mais frentes recessivas na superfície de escoamento. Quando toda a água superficial for removida por escoamento no final do sulco e por infiltração ao longo deste, terminam a fase de recesso e o processo de irrigação.

Em condições normais, o recesso inicia-se junto ao ponto de derivação de água à parcela mas, às vezes, pode ocorrer também outra fase recessiva no final da parcela, que avança à montante, de encontro com a primeira, terminando irrigação quando a lâmina de água desaparece da superfície do solo.

Na Figura 1 pode-se observar que o intervalo de tempo decorrido entre a chegada da frente de avanço e a passagem da frente recessiva, para um determinado ponto na superfície, determina o tempo de infiltração e

a lâmina infiltrada nesse ponto. Em sulcos com reduzida seção de escoamento e moderado gradiente de declive, a fase de recesso é moderadamente rápida, podendo ser considerada desprezível. A medida que aumenta a seção de escoamento e diminuem o gradiente de declive e a razão de infiltração, o recesso é mais demorado. Para simplificar, sua representação pode ser aproximada por uma reta, não acarretando, em geral, sérios inconvenientes nos cálculos das lâminas infiltradas ao longo do sulco do comprimento da parcela, ao final do processo de irrigação.

As características do fluxo de recesso são as mesmas do fluxo de avanço durante as irrigações, isto é, o escoamento é não permanente e espacialmente variado.