

---

# CAPÍTULO 5

## UNIFORMIDADE E EFICIÊNCIA DA IRRIGAÇÃO

---

J. A. FRIZZONE

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

### 1 INTRODUÇÃO

O objetivo de se manter um nível adequado de água no solo, para o bom desenvolvimento das plantas, pode ser atingido pela aplicação de uma lâmina de água suficiente para não permitir área com déficit, resultando em um grau de adequação da irrigação de 100%. Entretanto, o desempenho do sistema é otimizado quando se mantém no solo um nível adequado de umidade, com mínima perda de água.

Existem muitas expressões para uniformidade e eficiência da irrigação e cada uma tem sua definição específica. Além disso, existem procedimentos apropriados para usar e obter os valores utilizados nas suas expressões matemáticas. Qualquer discussão relativa à uniformidade e eficiência de irrigação deve ser precedida de um esforço para estabelecer as definições a serem utilizadas, caso contrário pode-se resultar em diferentes valores para a mesma situação.

Neste capítulo serão apresentados cinco índices de desempenho para expressar a efetividade da irrigação na parcela: uniformidade de distribuição, eficiência de aplicação, eficiência de armazenagem, perda por percolação e perda por escoamento superficial no final da parcela. A uniformidade de distribuição avalia a variabilidade da lâmina de água infiltrada; a eficiência de aplicação refere-se à proporção da água aplicada na parcela que permanece disponível para as plantas e a eficiência de armazenagem é um índice utilizado para avaliar quanto da capacidade real de água disponível do solo foi satisfeita pela irrigação. O grau de adequação, muitas vezes avaliado pela eficiência de armazenagem, refere-se à porcentagem da área que recebe pelo menos a quantidade de água necessária para suprir a deficiência hídrica na zona radicular.

A eficiência de aplicação na parcela não pode ser confundida com a eficiência global de irrigação para o projeto. Além disso, os valores desses índices para um campo irrigado podem ser menores que os obtidos para um simples sulco, pois componentes adicionais podem causar desuniformidade ao longo do

campo, como, por exemplo, a variabilidade de solo e, portanto, a taxa de infiltração. Também, os valores para um simples evento de irrigação podem ser diferentes dos valores sazonais.

Uma combinação satisfatória desses índices pode maximizar a renda da atividade agrícola e conservar água e solo. Para estudar esses índices, considera-se que (a) a extração de água pelas plantas é uniforme em profundidade e em cada ponto na área; (b) a característica de infiltração do solo é descrita por uma única relação entre lâmina de água infiltrada e tempo; e (c) o objetivo da irrigação é repor o déficit de água na zona radicular.

### 3 DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA ÁGUA INFILTRADA

Considere uma parcela cultivada, de comprimento  $X$ , com solo e gradiente de declive uniformes, sendo irrigada por sulcos ou por faixas e drenagem livre. Durante a irrigação uma vazão constante é aplicada à montante da parcela até atingir a extremidade final, onde escoa por um determinado tempo, quando então cessa a derivação de água à parcela. Na Figura 1 mostra-se esquematicamente a distribuição espacial da água infiltrada após uma irrigação. Em decorrência das diferenças nos tempos de oportunidade de infiltração, a lâmina de água infiltrada é desuniformemente distribuída no perfil de solo, tendo uma forma assimétrica característica. Para uma largura unitária, os volumes infiltrados são calculados pelo produto entre as lâminas de água infiltradas e o comprimento da parcela.

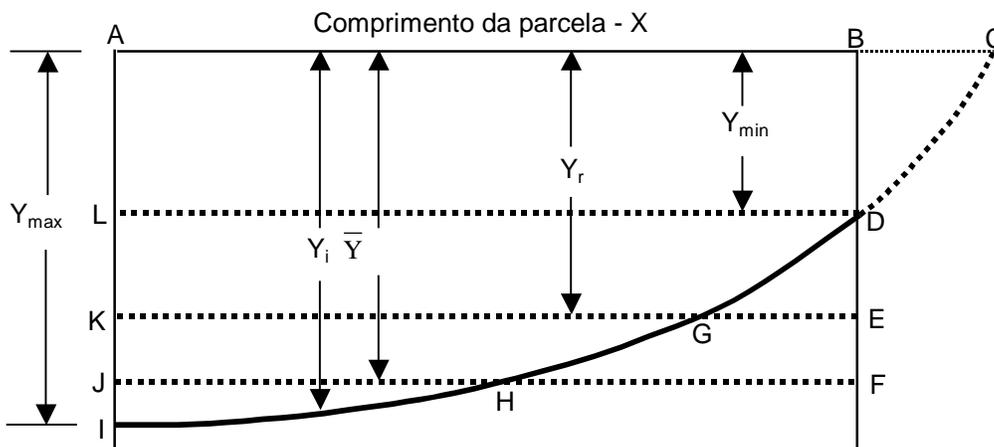


Figura 1. Representação esquemática da distribuição espacial da água infiltrada em irrigação por superfície

Com base na Figura 1, podemos definir as seguintes variáveis:

$\bar{Y}$  - lâmina média de água infiltrada;

$Y_r$  - lâmina média de água necessária para suprir o déficit de água;

$Y_i$  - lâmina de água infiltrada em qualquer ponto ao longo da parcela;

$Y_{\min}$  - lâmina mínima de água infiltrada;

$Y_{\max}$  - lâmina máxima de água infiltrada;

$V_s$  – volume útil de água armazenado na zona radicular (área ABDGK). Corresponde à fração da água aplicada que fica disponível para uso pelas plantas;

$V_d$  – volume de déficit de água (área DEG). Quantidade de água que falta para completar a capacidade real de água disponível do solo após a irrigação;

$V_p$  – volume de água perdido por percolação profunda (área GIK);

$V_e$  – volume de água escoado no final da parcela (área BCD);

$V_i$  – volume de água infiltrado (área ABDI);

$V_r$  – volume de água necessário para suprir o déficit hídrico na zona radicular (área ABEK);

### 3 UNIFORMIDADE DE DISTRIBUIÇÃO

A uniformidade de distribuição descreve quão uniformemente a água está disponível para as plantas no campo irrigado. É definida da seguinte forma (Kruse, 1978):

$$UD = \frac{Y_{\min}}{\bar{Y}} 100 \quad (1)$$

sendo:

$Y_{\min}$  – lâmina mínima de água infiltrada;

$\bar{Y}$  - lâmina média de água infiltrada.

O conceito de lâmina mínima pode ser dado de três formas (Figura 2): (a) o valor mínimo absoluto, (b) o valor médio em 25% da área que recebe as menores lâminas ( $Y_{lq}$ ), e (c) o valor médio em 50% da área que recebe as menores lâminas ( $Y_{lh}$ ). O primeiro conceito implica que nenhuma área recebe lâminas menores que a mínima; o segundo, admite que em 1/8 da área infiltram lâminas menores que  $Y_{lq}$  e o terceiro que em 1/4 da área infiltram lâminas menores que  $Y_{lh}$ . Embora existam esses três conceitos, a definição de UD tem sido padronizada com a utilização de  $Y_{yq}$ .

Idealmente, os sistemas de irrigação deveriam aplicar água uniformemente em cada planta da área. Um tal sistema produziria  $DU = 100\%$ . Entretanto, nenhum sistema de irrigação é capaz de aplicar água com grau absoluto de uniformidade, existindo sempre alguma área com excesso ou com deficiência de água. Um baixo valor de UD resulta em perda de água e energia, uma vez que certo volume adicional de água deve ser bombeado para aplicar suficiente quantidade nas regiões com deficiência hídrica.

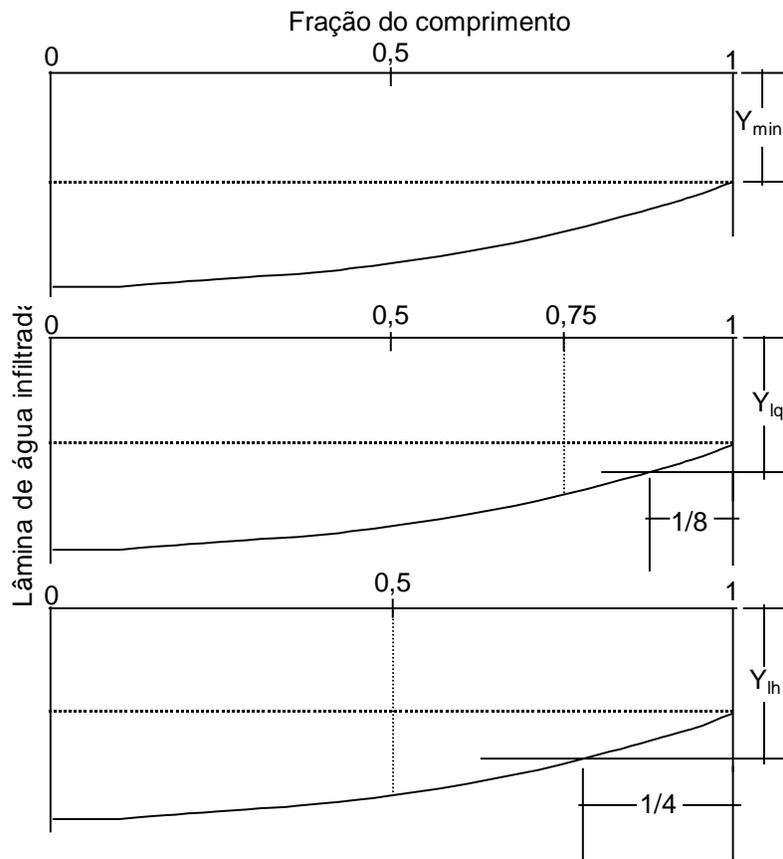


Figura 2. Os três conceitos de lâmina mínima

Deve-se observar que UD não constitui uma medida de eficiência, pois não quantifica as relações entre as quantidades de água aplicada, infiltrada, armazenada em disponibilidade para as plantas e perdida. Entretanto, para irrigação sem déficit, só é possível uma alta eficiência de aplicação com alta uniformidade de distribuição. É importante salientar que a uniformidade de distribuição atual é geralmente menor que a uniformidade de distribuição potencial (85% ou mais). Em condições de campo a UD depende de vários fatores, entre eles podem ser citados: (a) projeto e instalação do sistema de irrigação – o dimensionamento e a instalação do sistema de irrigação deve seguir critérios adequados aos objetivos do projeto; (b) condições de operação do sistema – cada sistema tem um particular conjunto de condições sob as quais opera satisfatoriamente (vide critérios de seleção de sistemas de irrigação no Capítulo 1); (c) manejo – por exemplo, vazões relativamente altas são necessárias para obter adequada taxa de avanço em sulcos.

Muitos profissionais consideram que uma uniformidade de distribuição mínima de 75% deve ser atingida em um sistema de irrigação por superfície. A uniformidade de distribuição de água é primariamente dependente da variabilidade do tempo de oportunidade de infiltração em cada ponto; varia também com a uniformidade altimétrica da superfície de escoamento e com a variabilidade espacial do solo. A Figura 3 ilustra que  $UD = 75\%$  significa que uma fração da área irrigada recebe duas vezes mais água que a outra menos irrigada. Economicamente, para a maioria das culturas, menos que 100% da área deve ser

adequadamente irrigada (grau de adequação menor que 100%). Quando a lâmina média do menor quartil ( $Y_{lq}$ ) é igual à lâmina de irrigação necessária, em aproximadamente 12,5% ocorrerá déficit de água.

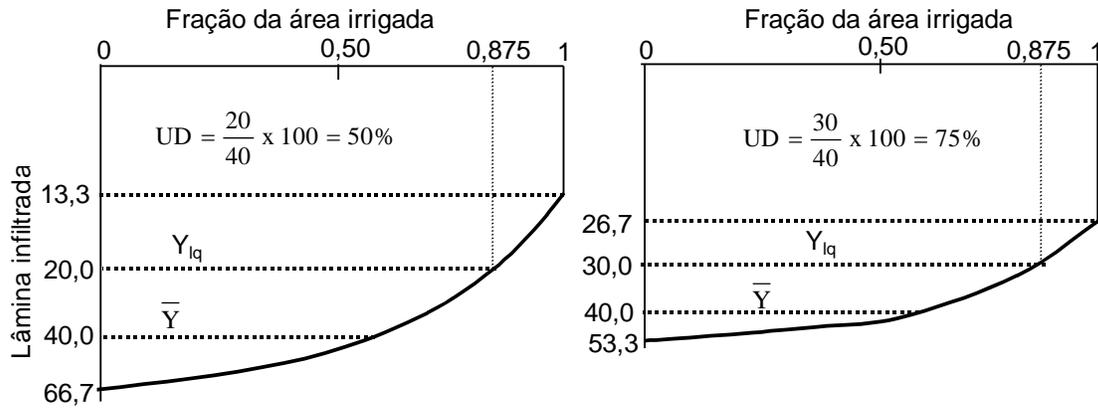


Figura 3. Modelo simplificado de infiltração com duas uniformidades de distribuição e mesma lâmina média infiltrada

#### 4 EFICIÊNCIA DE APLICAÇÃO

A eficiência de aplicação ( $E_a$ ) tem sido preconizada como um índice que representa a estimativa da fração do total da água aplicada que permanece útil para as plantas, isto é:

$$E_a = \frac{V_s}{V_a} 100 \quad (2)$$

Podemos expressar a eficiência de aplicação como uma relação entre lâminas de água, considerando-se dois casos, a saber:

1º) Toda parcela recebe no mínimo a lâmina de irrigação necessária - Nesse caso, em toda a área ocorre percolação profunda, como está esquematizado na Figura 4. A eficiência de aplicação é expressa pela relação entre a lâmina de irrigação necessária para suprir o déficit hídrico ( $Y_r$ ) na camada de solo que contém o sistema radicular e a lâmina média de água aplicada na parcela ( $Y_a$ ):

$$E_a = \frac{Y_s}{Y_a} 100 = \frac{Y_r}{Y_a} 100 \quad (3)$$

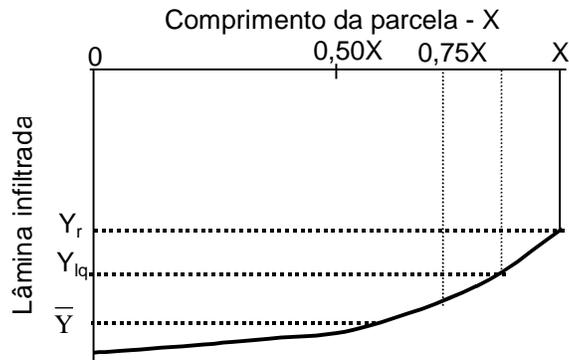


Figura 4. Representação esquemática de um perfil de infiltração em irrigação sem déficit

Caso se tenha um sistema de reutilização da água escoada no final da parcela, deve-se subtrair a quantidade de água recuperada da quantidade total de água aplicada na parcela. Neste caso, a eficiência de aplicação aumenta. A água recuperada do escoamento superficial deve ser, preferencialmente, reutilizada em outra parcela.

2º) Uma fração da parcela recebe uma lâmina de água inferior à lâmina de irrigação necessária (Figura 5) – Nesse caso tem-se:

$$E_a = \frac{Y_r \cdot X_r + Y_d (X - X_r)}{X \cdot Y_a} 100 \quad (4)$$

sendo:

$X_r$  – distância entre o início da parcela e o ponto no qual é infiltrada a lâmina de irrigação necessária;

$X$  – comprimento total da parcela;

$Y_d$  – lâmina média de água infiltrada na área com déficit.

$$Y_d = \frac{Y_r + Y_{\min}}{2} \quad (5)$$

Para irrigação com vazão constante calcula-se  $Y_a$  pela equação (6):

$$Y_a = \frac{q_s \cdot T_c}{X \cdot E} 3600 \quad (6)$$

sendo,

$Y_a$  - lâmina média de água aplicada na parcela, em mm,

$q_s$  – vazão derivada à parcela (sulco ou faixa), em l/s;

$T_c$  – tempo de corte da vazão derivada, em h;

X – comprimento da parcela (do sulco ou da faixa), em m;

E – largura da parcela (largura da faixa ou espaçamento entre sulcos), em m.

Se a irrigação se processa com redução da vazão inicial, após o tempo de avanço, tem-se:

$$Y_a = \frac{q_i \cdot T_x + q_r (T_c - T_x)}{X \cdot E} 3600 \quad (7)$$

sendo  $q_i$  a vazão inicial derivada à parcela e (l/s)  $q_r$  a vazão reduzida (l/s).

Observe que as perdas de água por percolação profunda, somadas às perdas por escoamento superficial no final da parcela são complementares à eficiência de aplicação, isto é:  $E_a(\%) + \text{perdas} = 100\%$ .

A eficiência de aplicação pode ser maior, igual ou menor que a uniformidade de distribuição. Se  $E_a$  é maior que UD, existe área com déficit. Um valor de  $E_a$  muito alto indica que quase toda água aplicada é benéficamente utilizada, o que somente é possível se praticamente não existir perda por percolação. O valor de  $E_a$  pode se aproximar de UD se a água escoada superficialmente no final da parcela for reutilizada, se as perdas por evaporação forem mínimas e o tempo de oportunidade de infiltração ao longo da parcela for adequado. O valor de  $E_a$  é menor que UD se o tempo de oportunidade de infiltração é muito grande, resultando em grande perda de água por percolação profunda em toda a área. Em irrigação por superfície, esta condição pode também ocorrer se não há reutilização da água escoada no final da parcela. A percolação lixívia sais, embora alguma lixiviação é necessária para remover o excesso de sais da zona radicular. Entretanto, o excesso de lixiviação causa desuniformidade e grande perda de fertilizantes, os quais podem contaminar o lençol freático.

Os fertilizantes nitrogenados são particularmente suscetíveis a perda por lixiviação. Além do aspecto de contaminação das águas subterrâneas, existe um aspecto econômico importante relacionado ao custo energético para a produção de fertilizantes nitrogenados: a produção de 1 tonelada de nitrogênio necessita de aproximadamente 42 milhões de BTU's. estima-se que no "San Joaquin Valley, Califórnia, somente 54% do nitrogênio aplicado é utilizado pelas plantas; o restante é perdido por lixiviação ou volatilização. Para as condições brasileiras ainda não existem estatísticas.

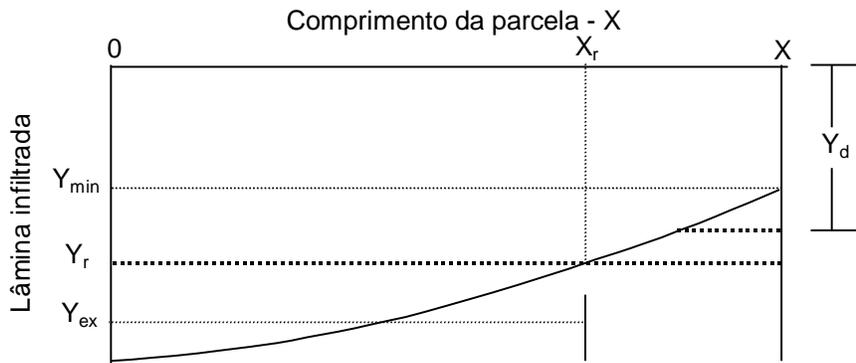


Figura 5. Representação esquemática de um perfil de infiltração em irrigação com déficit.

Uma boa eficiência de aplicação pode ser conseguida com uma boa uniformidade de distribuição, com o uso de um manejo de irrigação adequado (quando e quanto irrigar), com o uso de um tempo de oportunidade de infiltração adequado, adotando a reutilização da água escoada no final da parcela e com o uso de práticas que permitem reduzir as perdas de água por percolação profunda.

## 5 EFICIÊNCIA DE ARMAZENAGEM E PERDAS DE ÁGUA

Para melhor caracterizar a efetividade da irrigação, devem ser utilizados outros índices de desempenho. A UD proporciona informações as mínimas necessárias para se ter idéia das perdas ou do déficit de água. A eficiência de aplicação não permite quantificar as perdas de água por percolação profunda e por escoamento superficial no final da parcela e também o grau de déficit. Para quantificar esses índices, três indicadores adicionais são propostos; eficiência de armazenagem ( $E_s$ ), perda por percolação ( $P_p$ ) e perda por escoamento ( $P_e$ ). A eficiência de armazenagem, é o indicador do grau de adequação da irrigação, isto é, do reabastecimento de água na zona radicular, permitindo avaliar quanto da capacidade real de água disponível do solo foi satisfeito pela irrigação. Consideremos dois casos:

1º) Toda área recebe no mínimo a lâmina de irrigação necessária (Figura 4)

$$E_s = \frac{Y_s}{Y_r} 100 = 100\% , \text{ pois } Y_s = Y_r \quad (8)$$

$$P_p = \frac{Y_p}{Y_a} 100 = \frac{\bar{Y} - Y_r}{Y_a} 100 \quad (9)$$

$$P_e = \frac{Y_e}{Y_a} 100 = \frac{Y_a - Y_r - Y_p}{Y_a} 100 = \frac{Y_a - \bar{Y}}{Y_a} 100 \quad (10)$$

Se o perfil de infiltração puder ser considerado linear, tem-se:

$$\bar{Y} = \frac{Y_{\max} + Y_{\min}}{2} \quad (11)$$

Sendo o perfil de infiltração não linear calcula-se  $\bar{Y}$  pela equação (11) do capítulo 3.

2º) Uma fração da área recebe uma lâmina de água inferior à lâmina de irrigação necessária (Figura 5)

$$E_s = \frac{Y_r \cdot X_r + Y_d (X - X_r)}{X \cdot Y_r} 100 \quad (12)$$

$$P_p = \frac{X_r (Y_{\text{ex}} - Y_r)}{X \cdot Y_a} 100 \quad (13)$$

$$P_e = \frac{Y_a - Y_s - Y_p}{Y_a} 100 \quad (14)$$

$$P_e = \frac{X \cdot Y_a - [X_r \cdot Y_r + Y_d (X - X_r) + X_r (Y_{\text{ex}} - Y_r)]}{X \cdot Y_a} 100 \quad (15)$$

**Exemplo 1.** Considere os seguintes dados para sulcos de irrigação com declividade de 0,5%:

Equação de infiltração da água no solo:  $Y(T) = 0,182 T^{0,621}$  sendo  $Y(T)$  em cm e  $T$  em min;

Equação de avanço:  $T_x = 0,087 x^{1,316}$  com  $T_x$  em min e  $x$  em m;

Comprimento do sulco: 200 m;

Espaçamento entre sulcos: 1 m;

Vazão derivada ao sulco: 0,8 l/s;

Lâmina de irrigação necessária: 37 mm;

Tempo de reposição no final do sulco: 80 min;

Calcular:

Uniformidade de distribuição;

Eficiência de aplicação;

Eficiência de armazenagem;

Perda de água por percolação;

Perda de água por escoamento superficial.

Solução:

O comprimento da parcela foi dividido em 20 segmentos de 10 m de comprimento e os tempos de avanço e de oportunidade de infiltração foram calculados para cada ponto. Pela média aritmética foram calculados os tempos médios de infiltração e a lâmina média infiltrada em cada trecho (Tabela 1). A lâmina média infiltrada no sulco (37,7 mm) foi calculada pela equação 11 do capítulo 3. A lâmina de irrigação necessária é infiltrada a 120 m do início do sulco; logo, 40% do sulco recebe déficit de água.

Tabela 1. Cálculos para o exemplo 3

X (m)	T <sub>x</sub> (min)	T <sub>o</sub> (min)	T <sub>o</sub> médio (min)	Y(T) (mm)
0	0	172,8		
10	1,8	171,0	171,9	44,5
20	4,5	168,3	169,0	44,0
30	7,6	165,2	166,8	43,7
40	11,2	161,6	163,4	43,1
50	15,0	157,8	159,7	42,5
60	19,2	153,6	155,7	41,8
70	23,3	149,5	151,6	41,1
80	27,8	145,0	147,3	40,4
90	32,3	140,6	142,8	39,6
100	37,3	135,5	138,1	38,8
110	42,3	130,5	133,0	37,9
120	47,4	125,4	128,0	37,0
130	52,7	120,1	122,8	36,1
140	58,1	114,7	117,4	35,1
150	63,6	109,2	112,0	34,1
160	69,2	103,6	106,4	33,0
170	75,0	97,8	100,7	31,9
180	80,8	92,0	94,9	30,8
190	86,8	86,0	89,0	29,6
200	92,8	80,0	83,0	28,3
Média				37,7

Uniformidade de distribuição - equação (1)

$$UD = \frac{\left( \frac{28,3 + 29,6 + 30,8 + 31,9 + 33,0}{5} \right)}{37,7} \cdot 100 = 81,5\%$$

Eficiência de aplicação – equação (4)

$$Y_d = \frac{37,0 + 28,3}{2} = 32,7 \text{ mm}$$

$$Y_a = \frac{0,8 \times 172,8}{200 \times 1} \times 60 = 41,5 \text{ mm}$$

$$E_a = \frac{37 \times 120 + 32,7 (200 - 120)}{200 \times 41,5} 100 = 85,0\%$$

Eficiência de armazenagem – equação (12)

$$E_s = \frac{37 \times 120 + 32,7 (200 - 120)}{200 \times 37} 100 = 95,4\%$$

Perda por percolação profunda – equação (13)

$$Y_{ex} = \frac{44,5 + 44,0 + \dots + 37,0}{12} = 41,2 \text{ mm}$$

$$P_p = \frac{120 (41,2 - 37)}{200 \times 41,5} 100 = 6,1\%$$

Perda por escoamento superficial no final do sulco

$$Y_e = 41,5 - 37,7 = 3,8 \text{ mm}$$

$$P_e = \frac{3,8}{41,5} 100 = 9,2\%$$