ISSN 1808-3765

VIABILIDADE DA CALIBRAÇÃO DOS FATORES DE FORMA NA IRRIGAÇÃO POR SULCO[1]

ROBERTO VIEIRA PORDEUS[2]; JOÃO ALDIFAX CÉZAR DE ALBUQUERQUE FILHO[3]; CARLOS ALBERTO VIEIRA DE AZEVEDO[4]; SILVANETE SEVERINO DA SILVA; JOSÉ DANTAS NETO E VALÉRIA INGRITH ALMEIDA LIMA

[1] Extraído da dissertação de mestrado do segundo autor.
[2]Engenheiro Agrícola, Prof. Doutor, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, rvpordeus@gmail.com
[3]Engeneiro Agrônomo, Prof. Doutor, DTR/Universidade Federal Rural de Pernambuco, jaudifax@dtr.ufrpe.br
[4]Engenheiro Agrícola Prof. PhD, UAEA/Universidade Federal de Campina Grande, cvieiradeazevedo@gmail.com
[5]Mestranda, UAEA/ Universidade Federal de Campina Grande, silvanete.h@hotmail.com
[6]Engenheiro Agrônomo, Prof. Doutor,UAEA/Universidade Federal de Campina Grande, zedantas1955@gmail.com
[7]Eng. Agrícola, DEAG/Universidade Federal Rural do Semi-Árido, valeria_ialima@hotmail.com

1 RESUMO

Este trabalho apresenta uma equação para determinar os fatores de forma superficial e subsuperficial, expressam a forma do perfil superficial e subsuperficial da água, no cálculo do balanço de volume e do avanço na irrigação por sulcos. Embora existam equações passíveis de determinar esses fatores, a literatura tem recomendado valores estimados que oscilam de 0,70 a 0,85. Utilizando dados de campo obtidos na literatura, foram feitas simulações e os resultados obtidos demonstram a viabilidade da calibração dos fatores de forma, obtidos através de expressão baseada em balanço de volume e a aplicabilidade de fatores de forma recomendados pela literatura e os representados pela média ponderada na simulação da fase de avanço.

Palavras-chave: volume infiltrado, fase de avanço, desempenho

2 INTRODUÇÃO

O fluxo de água superficial pode ser caracterizado como não permanente e espacialmente variado, apresentando decréscimo gradual da vazão devido à infiltração. Segundo Pordeus et al. (2001) os sulcos apresentam dimensões variadas nas seções transversal e longitudinal em função da textura do solo e da cultura explorada; exige, portanto, maior atenção no seu dimensionamento. Tendo em vista a complexidade da formulação matemática para representação de fluxos não permanentes em superfície livre, as soluções das equações envolvidas requerem tratamento numérico aproximado, através de modelos computacionais. Com este enfoque pode-se destacar os modelos hidrodinâmico e zero-inércia.

Vários pesquisadores apresentaram soluções simplificadas para resolver as equações que governam o fluxo superficial em que as hipóteses básicas assumidas são: o tipo de função representada pela superfície da água durante a fase de avanço é o mesmo para todos os incrementos de tempo e a lâmina de irrigação é a lâmina normal na cabeceira da parcela determinada por uma equação de resistência para fluxo uniforme. Essas hipóteses fornecem os meios necessários para computar o volume de água superficial.

Recebido em 17/01/2014 e aprovado para publicação em 01/03/2014

O objetivo deste trabalho foi analisar o efeito de fatores de forma superficial e subsuperficial sobre a curva de avanço e a performance dos sistemas de irrigação por sulcos abertos em declive, em regime de vazão constante.

3 MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia utilizada no presente trabalho para analisar a influência dos fatores de forma dos perfis superficial e subsuperficial sobre o avanço, considera os seguintes aspectos: na fase de avanço utiliza-se a equação do balanço de volume para sulcos, apresentada por Souza (1981) e se consideram, para os fatores de forma dos perfis superficial e subsuperficial, valores estimados de acordo com as equações apresentadas por Souza (1981) e a média ponderada de fatores de forma calibrados.

Com o estabelecimento das fases de avanço através de simulação algébrica utilizando-se o modelo algébrico de Levien (1985) em conjunto com os parâmetros experimentais, obtém-se as condições necessárias e suficientes para analisar o avanço dos sistemas de irrigação por sulcos abertos em declive.

Fase de avanço, segundo Souza (1981) a Equação (1) estima o avanço (x_a) em função dos demais parâmetros:

$$X_a = \frac{Q.t}{A_o.r_y + A_{zo}.r_z} \tag{1}$$

em que:
x_a = Avanço;
Q = Vazão na cabeceira do sulco, (m);
t = tempo de avanço, (min);
A_o = Área da seção transversal do fluxo na entrada do sulco, (m^2);
A_{zo} = Volume infiltrado na cabeceira do sulco por unidade de comprimento, (m^2);
r_y e r_z = fatores de forma dos perfis superficial e subsuperficial, (adimensional);

Demonstra-se, nos itens seguintes, como os diversos parâmetros da Equação (1) são determinados. Neste trabalho se estimam valores para os fatores de forma, r_y e r_z, iguais a 0,70 e 0,75, respectivamente. Com esses valores se analisa o efeito das variações dos fatores de forma dos perfis superficial e subsuperficial, sobre a curva de avanço da água nos sulcos.

Souza (1981) desenvolve, no modelo hidrodinâmico, através de cálculo numérico, duas expressões para os fatores de forma r_y e r_z Equações (2) e (3), respectivamente consideradas para célula situada na extremidade da frente de avanço da água nos sulcos.

$$r_{y2} = \frac{1}{\beta(M+1)+1} \tag{2}$$

$$r_{z2} = \frac{1}{\beta.M + a + 1} \tag{3}$$

em que:
β = constante = 3/7;

M = expoente da equação da geometria do sulco;
a = expoente da equação de infiltração (Kostiakov).

Neste trabalho os fatores de forma são considerados para toda a extensão da frente de avanço.

No cálculo dos fatores de forma calibrados da curva de avanço experimental, utiliza-se expressão que é derivada da equação do Balanço de Volume, apresentada por (SOUZA, 1981):

$$x_a = \frac{Q_o \, . t}{A_o \, . r_y + A_{zo} \, . r_z} \tag{4}$$

Para um sulco de forma parabólica a área da seção transversal A_o é dada pela Equação (5) e (6):

$$A_o = \frac{B \, . \, Y}{M + 1} \tag{5}$$

$$B = C \, . \, y^M \tag{6}$$

em que:
B = largura da superfície livre da água, (m);
C e M = constantes empíricas, obtido pelo método dos dois pontos, utilizado por Walker & Skogerboe, 1987.
y = lâmina de água sobre o sulco, (m);

Por sua vez, a área infiltrada acumulada pode ser calculada pela seguinte Equação (7) (SOUZA, 1981):

$$A_z \left(y,t \right) = P_m \left(y \right) . \; Z\left(\tau \right) \tag{7}$$

em que:
P_m = perímetro molhado, (m);
$Z(\tau)$ = lâmina infiltrada acumulada expressa pela equação (10) de Kostiakov (1932), em (m^3 m^{-1});

Na Equação (7) quando a lâmina d'água y for muito pequena em relação a B, o perímetro molhado P_m poderá ser aproximado por B, isto é:

$$P_m \cong B = C \, . \, y^M \tag{8}$$

Substituindo a Equação (8) na Equação (7) pode-se determinar as áreas infiltradas acumuladas na cabeceira da parcela que em função da lâmina normal, dado pela Equação (9):

$$A_{zo} = B\left(y_n \right) . \; Z\left(\tau \right) \tag{9}$$

sendo: $Z(\tau)$ a lâmina infiltrada acumulada em m^3 m^{-1}, computado pela equação de Kostiakov (1932):

$$Z(\tau) = K \,.\, \tau^{a} \tag{10}$$

em que:
τ = tempo de oportunidade de infiltração, (min);
K e a = são constantes para um dado solo e um determinado nível de umidade, (m^3 s^{-a}) e a (empírico), Tabela 1.

Neste caso, as parábolas que envolvem os armazenamentos de água superficial e subsuperficial são de graus diferentes devido às características hidráulicas bem distintas para os dois tipos de escoamento no decorrer das irrigações; no entanto, é provável que a relação entre os fatores de forma dos perfis subsuperficial e o superficial não resulte em valor unitário, podendo ser expressa do seguinte modo:

$$\frac{r_z}{r_y} = 1 + \alpha; \quad \text{e} \quad \alpha \geq 0 \tag{11}$$

em que:
α = é o percentual de aumento do fator de forma r_z em relação a r_y.

Admite-se que, devido às elevadas taxas de infiltração no início da irrigação, ou seja, observadas durante a fase de avanço, o valor de α deve ser maior que zero.

Neste trabalho se assume, por hipótese, para facilitar o cálculo, que o valor de α é igual à zero significando dizer que na análise algébrica, a seguir, os valores dos fatores de forma r_y e r_z são iguais a r_i, isto é:

$$r_y = r_z = r_i \tag{12}$$

Substituindo a Equação (12) em (4) e se colocando o fator de forma r_i em evidência, a Equação (4) assume a Equação (13) abaixo:

$$X_{ai} = \frac{Q_o \,.\, t_{ai}}{r_i \,.\, (A_o + A_{zoi})} \tag{13}$$

Explicitando-se o valor de r_i, obtem-se a expressão do seguinte modo:

$$r_i = \frac{Q_o \,.\, t_{ai}}{X_{ai} \,.\, (A_o + A_{zoi})} \tag{14}$$

em que:
r_i = fator de forma que ajusta o modelo em cada ponto i da curva de avanço experimental;
X_{ai} e t_{ai} = distância (m) e tempo de avanço (min) em cada ponto i da curva de avanço observada.

Após a determinação de todos os fatores de forma r_i, utiliza-se a média ponderada dos r_i calculados em relação aos tempos de avanço t_{ai} observados, considerando-se que este é um valor representativo, obtendo-se:

$$r_{y3} = r_{z3} = \bar{r}_i = \frac{\sum_{i=1}^{n} t_{ai} \,.\, r_i}{\sum_{i=1}^{n} t_{ai}} \tag{15}$$

No presente trabalho os valores dos fatores de forma obtidos com a Equação (15) são utilizados para avaliar sua influência sobre o avanço da água nos sulcos.

Para maior precisão na análise da performance das curvas de avanço simuladas em relação às curvas com dados observados, emprega-se o método dos mínimos quadrados (CLÁUDIO, 1994), para estimar os tempos de avanço de todas as curvas simuladas e as de campo, o que é possível com o uso do monômio potencial dos tempos de avanço estimados em função das distâncias observadas:

$$T = \alpha . X^{\beta} \quad (16)$$

em que:
T = tempo de avanço estimado (min); X = distância observada em campo (m); α e β = constantes empíricas.

A partir dos tempos de avanço estimados para todas as curvas estudadas em relação às mesmas distâncias observadas em campo pode-se utilizar a equação estatística que determina o desvio padrão médio (BUSSAB, 1987) para avaliar o comportamento das curvas simuladas em relação às observadas. A expressão usada é a seguinte:

$$\tau = \left[\frac{\sum_{i=1}^{n} (\hat{y}_i - \hat{y}_i)^2}{n} \right]^{1/2} \quad (17)$$

em que:
$\hat{y}_i$ = ordenadas nos pontos i para as curvas de avanço simuladas; $\hat{y}_i$ = ordenadas nos pontos i para as curvas de avanço observadas em campo; n = número de pontos de coordenadas das curvas de avanço;
τ = desvio médio das curvas simuladas em relação às de campo.

Para análise dos efeitos dos fatores de forma dos perfis superficial e subsuperficial sobre a curva de avanço, apresentam-se gráficos e tabelas de resultados obtidos com dados de campo obtidos em experimentos realizados por Ramsey (1976) e Karmelli (Horticulture, 1978). Esses dados são utilizados pela precisão com que foram obtidos e por representarem condições extremas em relação aos vários parâmetros. A Tabela 1 apresenta dados de vazão (Q_o), declividade (S_o), tempo de aplicação de água (t_{co}), comprimento do sulco (L), espaçamento do sulco (E), rugosidade hidráulica de Manning (n), parâmetros de infiltração (k e a) e as constantes empíricas da equação da geometria do sulco (C e M) nos exemplos estudados.

Tabela 1. Dados de campo utilizados na viabilidade da calibração dos fatores de forma na análise da irrigação por sulcos.

Parâmetros de entrada	Exemplos (dados)	
	No.1 Ramsey (1976)	No.2 Karmelli (1978)
Q_o ($m^3.s^{-1}$)	0,00133	0,00081
S_o ($m.m^{-1}$)	0,001032	0,0036
t_{co} (s)	12.480	12.120
L (m)	100	175
E (m)	1,00	1,12
n	0,022	0,020
K ($m.s^{-a}$)	0,0012415	0,0008079
a	0,50	0,55
C (m^{1-M})	1,0915	0,61
M	0,4539	0,22

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na análise dos fatores de forma dos perfis superficial (r_{y1}, r_{y2}, r_{y3}), subsuperficial (r_{z1}, r_{z2}, r_{z3}) e da sua influência na curva de avanço da irrigação por sulco em declive com escoamento livre utilizaram-se dados dos experimentos citados acima. Alguns dos parâmetros para a análise nos exemplos 1 e 2 são estimados por Souza (1981) a partir das informações de campo. Os parâmetros estimados são as constantes empíricas "C" e "M" da equação da geometria do sulco; o coeficiente de Manning "n" e as constantes empíricas "k" e "a" da equação de infiltração de Kostiakov, apresentados na Tabela 1.

Para estudar a influência dos fatores de forma sobre a curva de avanço, são utilizados valores estimados e calculados apresentados na Tabela 2. Os fatores de forma estimados são constantes para os dois exemplos analisados (r_{y1} = 0,70; r_{z1} = 0,75;).

Tabela 2. Comparação dos valores dos fatores de forma superficial (r_y) e subsuperficial (r_z) estimados e os encontrados com a expressão de Souza (1981); e a média ponderada, Equação 15.

Exemplos	Estimados		(Souza, 1981)		(Média Ponderada)	
	r_{y1}	r_{z1}	r_{y2}	r_{z2}	r_{y3}	r_{z3}
Ramsey (1976)	0,70	0,75	0,62	0,59	0,72	0,72
Karmelli (1978)	0,70	0,75	0,66	0,61	0,78	0,78

Os fatores de forma calculados r_{y2} e r_{z2} (Equações 2 e 3 propostas por Souza, 1981) apresentam valores inferiores aos estimados. Neste caso, r_{y2} variou entre 0,60 a 0,66 enquanto r_{z2} variou entre 0,47 e 0,61.

Observa-se que os valores dos fatores de forma r_{y3} e r_{z3} calibrados com a Equação (14) e representados pela média ponderada em relação aos tempos de avanço correspondentes, tiveram uma variação para r_{y3} e r_{z3} entre 0,71 a 0,81. Segundo Valiantzas (1997) os fatores de forma r_y e r_z geralmente variam com o tempo. Valiantzas (1997a) obteve uma expressão analítica para estimar a variação temporal do fator de forma subsuperficial correspondente ao modelo de infiltração de Kostiakov.

De acordo com Clemmens (2007) o fator de forma superficial é a razão entre a área média da seção transversal da área de fluxo e a medida na cabeceira do campo, onde seu valor varia de 0,70 a 0,80. Enquanto o fator de forma subsuperficial é a relação entre a área média da seção transversal infiltrada (profundidade infiltrada vezes largura) e a área da seção transversal infiltrada (largura vezes profundidade) medida na cabeceira do campo.

Verifica-se, então, que os valores dos fatores de forma (r_{y1}, r_{z1}), estimados e recomendados pela literatura se encontram dentro da mesma faixa de variação dos r_{y3}, r_{z3}. De acordo com Alazba (1999) a exatidão da determinação da curva de avanço, supondo área de fluxo constante na superfície, depende unicamente da seleção correta dos fatores de forma superficial e subsuperfial. O fator de forma de superfície não apresentou efeito significativo no avanço especialmente para condições em que a superfície de entrada não muda com tempo, bem como declives íngremes e baixos coeficientes de rugosidade.

Segundo Valiantzas (1999) a solução numérica adimensional do avanço, deduzida da equação de Balanço e Volume, foi derivada supondo-se que fator de forma de superfície é invariável com o tempo. Propondo um valor mais razoável de σ_y, invariante com o tempo, mas dependente de α. Baseado nos resultados de muitas experiências de computação com o modelo mais sofisticado de Onda Cinemática (KW) que computa efetivamente o perfil da superfície obtém-se um cálculo alternativo de σ_y, independente de tempo. Bassett et al. (1983)

propuseram o valor σ_y = 0,8 enquanto Walker e Skogerboe (1987) sugeriram o valor de σ_y = 0,77.

A Tabela 03 mostra os resultados dos fatores de forma r_i calibrados com a Equação (14), correspondentes aos tempos e distâncias de avanço observados com os exemplos estudados. Observa-se a variação de 0,71 a 0,80 para os r_i calculados, resultando no coeficiente de variação CV = 4, 5% computados com os dados observados de Ramsey (1976). No entanto, com os dados observados de Karmelli (1978), os r_i, calculados variam entre 0,73 a 1,03 resultando no valor do coeficiente de variação CV = 12%. Por definição, fator de forma é a relação entre o volume de água (ou área média) compreendido entre as parábolas que delimitam os armazenamentos de água superficial ou subsuperficial e os compreendidos entre os retângulos circunscritos nas distâncias correspondentes.

Nos dados de Karmelli (1978), Tabela 3, observa-se, no ponto da curva de avanço (25,00; 4,70) que o r_i calculado é de 1,03, caso em que para a distância considerada seria provável que os armazenamentos de água dos perfis superficial e subsuperficial se aproximassem da forma retangular; no entanto, quando os r_i calculados se aproximam de 0,5 os perfis apresentam uma forma próxima da triangular.

Tabela 3. Fatores de forma (r_i) correspondentes aos dados observados de Ramsey (1986) e Karmelli (1978), calibrados com a equação (14).

RANSEY			**KARMELLI**		
Distância (m)	Avanço (min)	Fator de forma (r_i)	Distância (m)	Avanço (min)	Fator de forma (r_i)
0,00	0,00	-	0,00	0,00	-
9,09	1,05	0,793	25,00	4,70	1,034
18,18	2,35	0,796	50,00	10,20	0,878
27,27	3,60	0,757	75,00	17,30	0,819
36,36	5,00	0,741	100,00	26,20	0,790
45,45	6,50	0,730	125,00	38,00	0,785
54,54	8,05	0,719	150,00	50,40	0,767
63,64	9,65	0,708	175,00	61,50	0,734
72,73	11,55	0,709			
81,82	13,60	0,712			
90,91	15,65	0,711			
100,00	17,95	0,714			

É importante salientar que as Equações (2) e (3), propostas por (SOUZA, 1981) para calcular os fatores de forma dos perfis superficial e subsuperficial, foram desenvolvidas para a célula situada na extremidade da frente de avanço de um modelo hidrodinâmico cuja solução matemática é baseada em método numérico para intervalos de tempo muito pequenos; no presente caso essas equações são utilizadas para todo o perfil do avanço em um tempo relativamente grande.

Convém ressaltar que, comparando-se os valores dos fatores de forma estudados, os r_{y2} e r_{z2} são os menores. Isto implica em distâncias de avanço maiores para o mesmo tempo devido ao princípio do balanço de volume; como consequência, os tempos de avanço serão menores para as mesmas distâncias consideradas.

As performances das curvas de avanço simuladas estão intimamente relacionadas aos valores numéricos dos fatores de forma. No balanço de volume, Equação (3), as áreas médias do armazenamento de água superficial e subsuperficial são substituídas pelas áreas na cabeceira da parcela, multiplicadas por fatores de forma, adequados. Por sua vez, as Equações (5) e (9) do modelo, que permitem estimar as áreas na cabaceira da parcela, são concebidas assumindo-se que o perímetro molhado é substituído pela largura da superfície livre da água. É provável que esta hipótese subestime o valor dessas áreas e, como consequência para as estimativas dos volumes, deveria ser recomendado usar valores estimados para os fatores de forma superiores aos calculados através de expressões algébricas.

As estimativas dos tempos de avanço em função das distâncias observadas nos experimentos estudados, para todas as curvas simuladas e as observadas em campo, permitiram o emprego da Equação (17) na determinação dos desvios médios das ordenadas (tempo) das curvas de avanço simuladas em relação às curvas medidas em campo, apresentados na Tabela 4.

Os valores dos desvios médios apresentados na Tabela 4, possibilitam melhor compreensão na avaliação da performance das curvas de avanço simuladas em função da variação dos fatores de forma estudados.Observando os resultados da Tabela 4, conclui-se que os fatores de forma r_{y3}, r_{z3} e os fatores de forma estimados r_{y1} e r_{z1}, proporcionam melhor performance das curvas de avanço simuladas; no entanto, os fatores de forma $r_{y2;}$ r_{z2}, favorecem maiores desvios médios das curvas de avanço simuladas em relação às curvas medidas em campo.

Tabela 4. Desvio médio das estimativas das curvas de avanço simuladas com fatores de forma variados, em relação às de campo ajustadas, com os exemplos estudados especificados.

Exemplos	**Desvio médio**		
	(r_{y1} r_{z1})	(r_{y2} r_{z2})	(r_{y3} r_{z3})
Ramsey (1976)	0,41	1,92	0,30
Karmelli (1978)	2,61	10,15	3,08

Com os dados de Ramsey (1976) obteve-se a melhor performance da curva de avanço simulada com os fatores de forma r_{y3} e r_{z3}. Neste caso, o menor desvio médio é da ordem de 0,30, correspondente ao menor coeficiente de variação CV= 4,5% para os fatores de forma calibrados com esses dados.

O maior coeficiente de variação CV = 12% para os fatores de forma r_i calibrados com a Equação (14), com os dados observados de Karmelli (1978), resulta no desvio médio em torno de 3,08 para a curva de avanço simulada com os fatores de forma r_{y3} e r_{z3}. Neste caso, verifica-se o menor desvio médio, em torno de 2,61, para a curva de avanço simulada com os fatores de forma r_{y1} e r_{z1}.

5 CONCLUSÕES

O modelo algébrico utilizado nesta pesquisa apresentou bom desempenho na performance das curvas de avanço simuladas com fatores de forma superficial e subsuperficial, compreendidos na faixa de variação 0,70 a 0,81.

Com base nos resultados do presente trabalho conclui-se a viabilidade da aplicação da Equação (14), que calibra os fatores de forma (r_i), na indicação da faixa de variação mais adequada, caso em que a média ponderada com relação aos tempos de avanço com os dados observados, proporciona valores bem representativos.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALAZBA, A.A. Simulating Furrow Irrigation with Different Inflow Patterns. Journal of Irrigation and Drainage Engineering / January/February 1999. 125:12-18

CLEMMENS, A.J. Simple approach to surface irrigation design:Theory. e-Journal of Land and Water, 2007, Vol. 1, 1-19.

BASSETT, D.L.; FANGMEIER, D.D.; STRELKOFF, T. Hydraulics of Surface Irrigation. In: Design and Operation of Farm Irrigation Systems. ASAE. Monograph nº 3, p.447-498. 1983.

BUSSAB, W.O. e Morettin, P.A. Estatística Básica. São Paulo: Atual, 1987

CLÁUDIO, D.M. & marins, j.m. **Cálculo Numérico Computacional: Teoria e Prática**. Atlas. 2.ed. 1994.

KOSTIAKOV, A.N. On the dynamics of the coefficient of water - percolation in soils and on the necessity for studying it from a dynamic point of view for purposes of ameliation. Trans. 6^{th} comm. Intern. Soc. Soil Sci., Moscou, Part A., 17-21, 1932.

KARMELI, D.; SALAZAR, J.L.; WALKER, W.R. Assessing the spatial variability of irrigation water applications. Fort Collins, USA: Department of Agricultural and Chemical Engineering. Colorado State University, 1978, 201p.

LEVIEN. S. L. A. *Desenvolvimento de um modelo matemático simplificado da irrigação por sulcos abertos em declive*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 91p. 1985.

PORDEUS, R.V.; SOUZA, F. de; AZEVEDO, C.A.V. de. Viabilidade da equação do arco da parábola no cálculo do perímetro molhado na irrigação por sulco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.5, n.2, p.192-197, 2001.

RAMSEY, M. K. – *Intake characteristics and flow resistance in irrigation furrows*. Master Master Dissertation of Science. University of Arizona, Tucson, USA. 141p. 1976.

SOUZA, F. de. *Nonlinear hydrodynamic model of furrow irrigation*. Dissertation of Doctor of Philosophy. University of California, Davis, USA. 172p. 1981.

VALIANTZAS, J. D. Explicit Time of Advance Formula for Furrow Design. Journal of Irrigation and Drainage Engineering/ January/ February 1999.125:19-25.

VALIANTZAS, J. D. Volume Balance Irrigation Advance Equation: Variation of Surface Shape Factor. Journal of Irrigation and Drainage Engineering/ July/ August 1997a.123:307-312.

VALIANTZAS, J. D. Surface Irrigation Advance Equation: Variation of Subsurface Shape Factor. Journal of Irrigation and Drainage Engineering/ July/ August 1997.123:300-306.

WALKER, W.R & SKOGERBOE, G.V. Surface Irrigation: Theory and Practice. Utah: 1987. 470p.