

# ESTIMATIVA DE VELOCIDADES DE ENTRADA D'ÁGUA NA SUPERFÍCIE DO SOLO

POR

S.V.Kameswara Sarma<sup>1</sup>

RESUMO -- A avaliação de distribuição da umidade no solo na zona radicular pode mostrar um caminho para obter melhores rendimentos das culturas, através de aplicações eficientes da água de irrigação, duração de aplicação e tempo de rega, para atingir as necessidades das culturas. As reduções nas taxas de infiltração com o tempo nas camadas superiores do solo e as variações na profundidade da penetração d'água na zona radicular indicam que, somente uma porção d'água é utilizada pelas raízes, sendo a maior parte dela perdida nas profundidades mais baixas. Para evitar estas perdas, uma estimativa das velocidades de entrada d'água nos solos (areias) de texturas diferentes será útil para os agrônomos e também para os engenheiros que têm interesse no processo de recarga artificial d'água dos aquíferos rasos, nas regiões áridas e semi-áridas do globo

O método presentemente adotado utiliza o artifício de Rijtema (1965) que expressou a velocidade de fluxo entre duas camadas como função de permeabilidades variáveis, cujos valores são funções do teor de umidade nas camadas. O autor presentemente estendeu a teoria acima para os perfis realizados a vários tempos durante o processo de infiltração com o tempo, devido a um decréscimo no valor de coeficiente de difusividade do meio. Este conforme a teoria clássica do Horton (1936). Estes resultados serão úteis para os agrônomos e os engenheiros para a correta aplicação d'água, seja para uso na irrigação ou na recarga.

## INTRODUÇÃO

À semelhança de outras regiões semi-áridas do mundo, o trópicos semi-árido brasileiro apresenta solos rasos e pedregosos, com baixa capacidade de retenção d'água e baixo teor de matéria orgânica, avaliação situando-se em torno de 2000mm/ano, alta permeabilidade para erosão e temperaturas variando de 23°-28°C. Estas características associadas à instabilidade climática, representada mais pela irregularidade das chuvas e que por sua escassez, têm se contribuído no principal obstáculo à estabilização da produção de

<sup>1</sup> Professor Adjunto, Deptº da Engª Civil, UFPb, Campina Grande, Pb.

alimentos na região. (Silva, Porto, Gomes 1981).

Situada entre os paralelos 1<sup>o</sup> e 18<sup>o</sup>-20' de latitude sul e entre os meridianos 35<sup>o</sup> e 48<sup>o</sup> W Greenwich, o nordeste brasileiro (Fig. 1) é uma das grandes regiões consideradas nos estudos que cobre uma área de cerca de 1,6 milhões km<sup>2</sup> compreendendo os estados de Maranhão, Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe e Bahia. As três regiões naturais e distintas em que a área total do nordeste pode ser dividida são: 1) a região com clima amazônica ou sub-amazônica que pode ser chamado como região tropical úmida, que consiste nos estados de Maranhão e uma parte de Piauí 2) a região que se estende ao longo da costa atlântica, a partir da Paraíba e se caracteriza por possuir condições de clima e solo que permitiram desenvolver uma agricultura extremamente prospera e 3) a terceira e última que recebeu o título de 'polígono das secas', abrange as vastas extensões do interior com uma área de 1 milhão km<sup>2</sup>, nas quais a aridez em maior ou menor grau, consistiu uma constante. (Vieira, 1979).

O desenvolvimento do nordeste brasileiro, em rápida e eficaz evolução de sorte a criar estruturas que permitam alisar para sempre a angustiada pobreza de suas populações rurais e a reiterada representação do drama das secas, tem também caráter de empreendimento estratégico de primeira ordem, cujo êxito pode abrir um mundo de melhores possibilidades para o Brasil inteiro. O nordeste possui nos alguns lugares amplas manchas de solos plenamente satisfatórios e diversificados, que uma vez explorados, permitiriam alimentar população, pelo menos três ou quatro vezes maior que a atual. Isto exigirá uma exploração e valorização de novas áreas, reforma fundiária em áreas já ocupadas para uma melhor organização do pequeno e do médio produtor agrícola, uma vez que a economia depende principalmente na produtividade agro-pecuária, que é particularmente aplicável para o nordeste brasileiro.

#### O USO RACIONAL DA ÁGUA

A exploração das vazantes dos açudes, lagos e rios, permite irrigar aproximadamente 1 milhão hectares através de irrigação de salvação, sem contudo comprometer as necessidades da água das propriedades agrícolas. A exploração das vazantes, como realizada tradicionalmente, oferece limitações, devido a um inadequado manejo de solo e água. No que tange ao manejo de solo, o plantio das culturas é feito em covas abertas diretamente em solo, quando o teor da umidade está próximo da saturação. A utilização desta forma de plantio impede o manejo da água racional. (EMBRAPA, 1981).

Foi o objetivo deste trabalho conhecer o melhor manejo de solo e da água, através de aproveitamento dos solos mais adequados para o determinado fim, seja a aplicação da água para fim da irrigação ou seja o uso da mesma para recarga artificial dos aquíferos rasos, para fim de abastecimento dos reservatórios sub-terrestres, para minimizar as perdas da bombeamento da água de baixos níveis freáticos.

## PARÂMETROS FÍSICOS CONSIDERADOS NESTE ESTUDO

O presente estudo concentra sua atenção no comportamento d' água em meios porosos nas zonas saturadas e parcialmente saturadas e analisa seus parâmetros e os observa pelo ângulo de aplicação na engenharia agrícola e abastecimento público. O estudo originalmente foi desenvolvido por Sérgio Castor (1983) no laboratório, sob orientação do autor deste trabalho num modelo acrílico, capaz de simular as condições de campo, onde foram usados três tipos de areia de granulometrias diferentes, sendo areia fina considerada como protótipo (PT) para as outras areias de tipo média (ME) e grossa (GR), permitindo estabelecer as razões de escala para comparação dos fenômenos.

Os parâmetros físicos específicos de cada areia, tais como a tensão capilar (sucção), permeabilidade e difusividade como funções de teor da umidade são apresentadas na Tabela 1. A tabela mostra também as razões de escalas estabelecidas com base na ascensão capilar para cada tipo de areia usada.

### CÁLCULOS DE VELOCIDADE DE ENTRADA D'ÁGUA NO MEIO

A lei de Darcy (1865) diz que:

$$v = K \nabla \phi \quad \text{-----(1)}$$

onde  $v$  = velocidade de fluxo, cm/s,  $K$  = permeabilidade do meio, cm/s, e  $\nabla \phi = \Delta h / \Delta s$  = gradiente hidráulico, sendo  $h$  é a diferença entre cargas nas duas seções consideradas e  $s$  = comprimento ao longo da linha do fluxo. Mas a forma mais comumente usada para os meios parcialmente saturados é: (ver Figura 2)

$$v = -K \frac{\partial \psi}{\partial L} = -K \left( \frac{\psi_2 - \psi_1}{L} + 1 \right) \quad \text{-----(2)}$$

onde o potencial  $\psi$  consiste de duas partes,  $\psi$  e  $L$ , sendo  $\psi$  = sucção ou tensão capilar e a parte positiva do potencial  $Z = L = Z_1 - Z_2$ . Os valores de tensão capilar são  $\psi_1$  e  $\psi_2$  a seções 1 e 2.

Resta estabelecer o valor de permeabilidade,  $K$  que pode ser adotado na Eq. (2). Poderia ser o valor de  $K_{\text{médio}}$ , sendo médio dos valores de  $K_1$  e  $K_2$  entre as seções 1 e 2. Sabemos também que a difusividade variável,  $D$  pode ser escrito como:

$$D = \frac{\rho}{\rho_s} \cdot K \cdot \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \quad \text{-----(3)}$$

onde  $D$  = difusividade do meio poroso,  $\text{cm}^2/\text{s}$ ,  $K$  = permeabilidade do meio, cm/s,  $\frac{\partial \psi}{\partial \theta}$  = gradiente da sucção,  $\psi$  com umidade,  $\theta$ , cm e  $\rho$  e  $\rho_s$  são densidade d'água e densidade bruta do meio,  $\text{gm}/\text{cm}^3$ . Assim obteremos da Eq. (3) os valores respectivos de permeabilidade,  $K$  e difusividade,  $D$  das areias, como na Tabela (2). Entretanto, os valores de  $K_{\text{médio}}$  e  $D_{\text{médio}}$  não têm significância, pois a variação de  $K$  e  $D$  é

fortemente não linear com o teor de umidade,  $\theta$ . Portanto,  $K_{\text{médio}}$  e  $D_{\text{médio}}$  não são valores representativos de permeabilidade e difusividade do determinado meio não-saturado (a mais preferível palavra será 'parcialmente saturada', como os engenheiros preferem usar).

Segundo Rijtema (1965), uma curva do tipo exponencial pode ser usada para interpretar a permeabilidade variável como uma função de sucção. Assim, temos:

$$K = K_0 e^{-\alpha \psi} \quad \text{----- (4)}$$

onde  $K$  = permeabilidade do meio não saturado a determinada sucção, cm/s,  $K_0$  = permeabilidade do meio saturado, cm/s,  $\psi$  = sucção a determinada teor da umidade,  $\theta$ , e  $\alpha$  = um constante da equação. Os valores respectivos de  $K$ ,  $\psi$ , e  $\alpha$  foram dados nas Tabelas (1) e (3). Assim a velocidade entre duas secções do meio pode ser expresso como:

$$v = K_0 e^{-\alpha \psi} \left( \frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \quad \text{----- (5)}$$

Integrando entre os valores  $Z_1$  e  $Z_2$ , temos que:

$$Z_1 - Z_2 = (\psi_1 - \psi_2) + \frac{1}{\alpha} \ln \left( \frac{K_0 v + e^{-\psi_1 \alpha}}{K_0 v + e^{-\psi_2 \alpha}} \right) \quad \text{---- (6)}$$

como  $Z_1 - Z_2 = L = Z = d$ ;  $e^{-\alpha \psi} = K_0 / K$ ;  $\psi = 1/\alpha (\ln K / K_0)$

$$e^{-\alpha d} = \frac{K_1 + V}{K_2 + V}$$

Assim, o valor de velocidade entre duas camadas pode ser escrito como:

$$v_d = \frac{K_2 e^{-\alpha d} - K_1}{1 - e^{-\alpha d}} = \frac{K_1 - K_2}{e^{-\alpha d} - 1} - K_1 \quad \text{----- (7)}$$

Então, para cada tipo da areia, podemos obter a velocidade de infiltração entre duas camadas (com espessura  $d$  entre delas).

#### APLICAÇÃO DE TEORIA DE RIJTEMA PARA OS TRÊS TIPOS DA AREIA

O presente utiliza os resultados das Tabelas 2 e 3 e os estende para outras curvas a fim de calcular o efeito do tempo sob as velocidades de entrada da água nas areias fina, média e grossa. Admite-se que as Figuras 1, 2 e 3 sejam respectivamente as realizadas durante o processo de infiltração vertical nos três tipos de areias estudadas. Foram calculadas as velocidades de entrada no primeiro decímetro de cada afastamento realizado (sendo de 3cm, 8cm, 13cm, 18cm e 23cm) (ver Figuras 3, 4 e 5) para mostrar o efeito de difusividade e gravidade sobre a rapidez ou lentidão no processo da infiltração. A Tabela 4 mostra os cálculos de velocidade de entrada para as diferentes curvas realizadas aos correspondentes afastamentos.

Observe-se que as velocidades nos primeiros décimos dos afastamentos reduzem com a decorrência do tempo e com o afastamento. No caso da areia fina (Prototipo, PT), a velocidade diminui de 0,364 cm/s a 13s para 0,0519cm/s a 61s e ainda reduziu para 0,0195cm/s a 462s. Assim, a diminuição foi de ordem de 95% em 449s. No caso da areia grossa, a correspondente diminuição foi de ordem de 70% em 129s. Sendo a difusão da areia grossa é maior do que a da areia fina (ver Tabela 1), a facilidade com que a fronteira úmida infiltra no caso da areia grossa é muito maior do que a areia fina. Assim, a fronteira úmida no caso da areia grossa (GR) foi atingido somente em 139s, enquanto PT tomou 462s para alcançar a mesma fronteira.

Comparando-se as velocidades de entrada da água no primeiro décimo de cada afastamento, observa-se que as velocidades no caso da areia grossa são maiores e as da areia fina são menores. Com decorrência do tempo em cada caso, as velocidades diminuíram cada vez mais, atingindo quase constantes valores. Este fenômeno conforme a teoria clássica de Horton (1936). De acordo com Horton, a precipitação que cai na superfície é diminuída de várias maneiras. Caso solo seja mais saturado, a umidade será infiltrada no solo com a taxa controlada de acordo com a variação da textura do solo, cobertura vegetal e o grau da saturação. Inicialmente, a taxa da infiltração é rápida, mas com a decorrência do tempo, a taxa rapidamente alcança um limite, onde a curva é tangente ao eixo do tempo, que pode ser definido como sendo a 'capacidade de infiltração', do determinado solo. Se a chuva exceder a capacidade da infiltração e prolongada-se ainda, então, este excesso da água vai aparecer como escoamento superficial. Os resultados atuais concordam com as observações de Horton (1936) e a teoria do Ritjema (1965), assim se verificou a validade destes resultados.

#### UTILIZAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS

A velocidade de entrada nos solos ou nas areias é um fator que influenciará a drenagem superficial, a infiltração vertical e as perdas da água aplicada em irrigação. A aplicação da rega pode ser feita com precisão, tendo informações técnicas do solo na zona de aeração. Na mesma maneira, no caso da recarga artificial dos aquíferos rasos, a seleção dos lotes adequados pode ser feita pelo conhecimento das características superficiais do solo. Caso necessário, a parte superficial de 10 ou 20cm do solo pode ser substituída por materiais mais grossos como cascalhos ou pedregulhos, para melhorar as velocidades de entrada, que influenciarão muito no processo da infiltração vertical e consequentes aumentos nos níveis freáticos. Estes resultados ajudarão os planejadores dos programas de engenharia de recursos hídricos.

#### CONCLUSÕES

O método de Ritjema (1965) é aplicável para cálculos de velocidade da entrada da água nas camadas superficiais de terras agrícolas ou nos lotes escolhidos para fim de recarga artificial, com a finalidade de manter os níveis freáticos economicamente viáveis para o bombeamento. Os parâmetros físicos do solo, tais como a permeabilidade e difusividade em função da umidade podem ser determinados no laboratório, com aparelhos simples.

## AGRADECIMENTOS

O autor agradece a Coordenação da Área de Engenharia de Recursos Hídricos do DEC/CCT/UFPb, Campus II, Campina Grande, Pb, como também ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio dado a concretização desse empreendimento.

## REFERENCIAS

1. Alvargonzalez, R. (1981). O desenvolvimento do nordeste árido. MINTER/DNOCS. Vol.1 Perfil do nordeste árido. Fortaleza, 111 pp.
2. Castor, Sergio, E de Oliveira. (1983) Estudos de infiltração uni e bidimensional em meios porosos em modelos reduzidos. Tese de Mestrado em Eng<sup>a</sup> de Rec.Hídricos, UFPb, Campus II, Campina Grande, Pb, 51 pp.
3. Embrapa. (1981) Pequeno irrigação para tropico semiárido. Vazantes e cápsulas porosos. Boletim de Pesquisa .Nº 3. 59pp.
4. Horton, R.E. (1936) Hydrologic Investigations of water and soil. -Joint Program Amer. Soil Survey Assn. & Soil Selection. American Soc of Agronomy. Washington D.C. 60 pp.
5. Rijtema, P.E. (1965) An analysis of actual evapotranspiration. Agricultural Research Report Nº 659. Predoc. Wageningen 107 pp.
6. Vieira, Vicente de P.P. Barbosa. (1979) Sistema de exploração de Perímetros irrigados no nordeste brasileiro. Aspectos administrativos, Técnicos e Socio-econômicos. Encontro Internacional de Especialistas em Rec.Hídricos. Fortaleza. 3p pp.
7. Silva, A de S; Porto, E.R. e Gomes, P.C.F. (1981). Seleção de áreas e construção de barreiras para uso de irrigações de salvação no tropico semiárido. Petrolina PE. EMBRAPA/CPATSA Boletim Tecn. Nº 3. 43pp

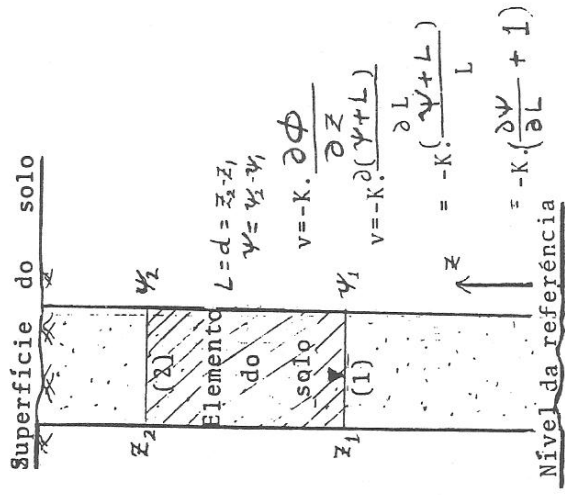


Figura 2. A Lei de Darcy para solo

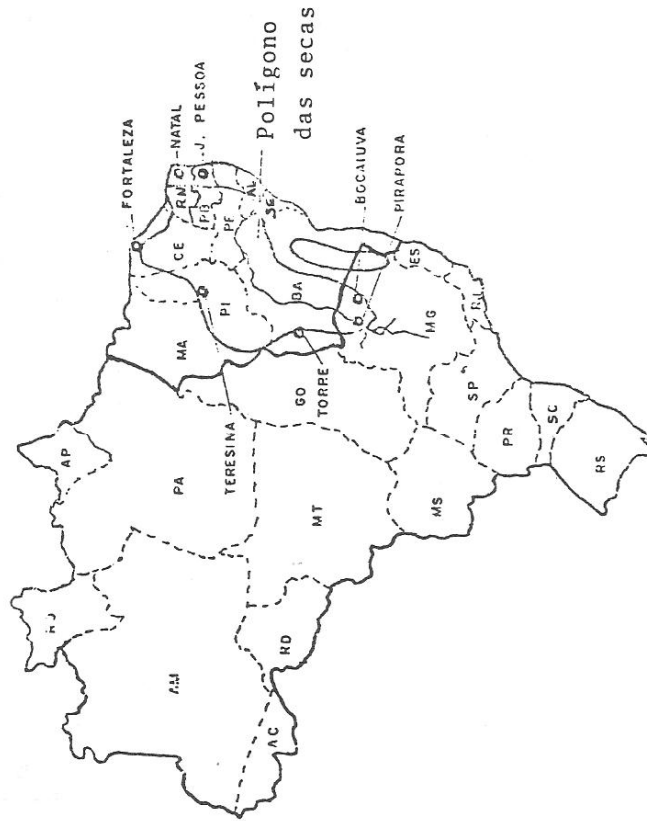


Figura 1. O Nordeste Brasileiro e O Polígono das Secas

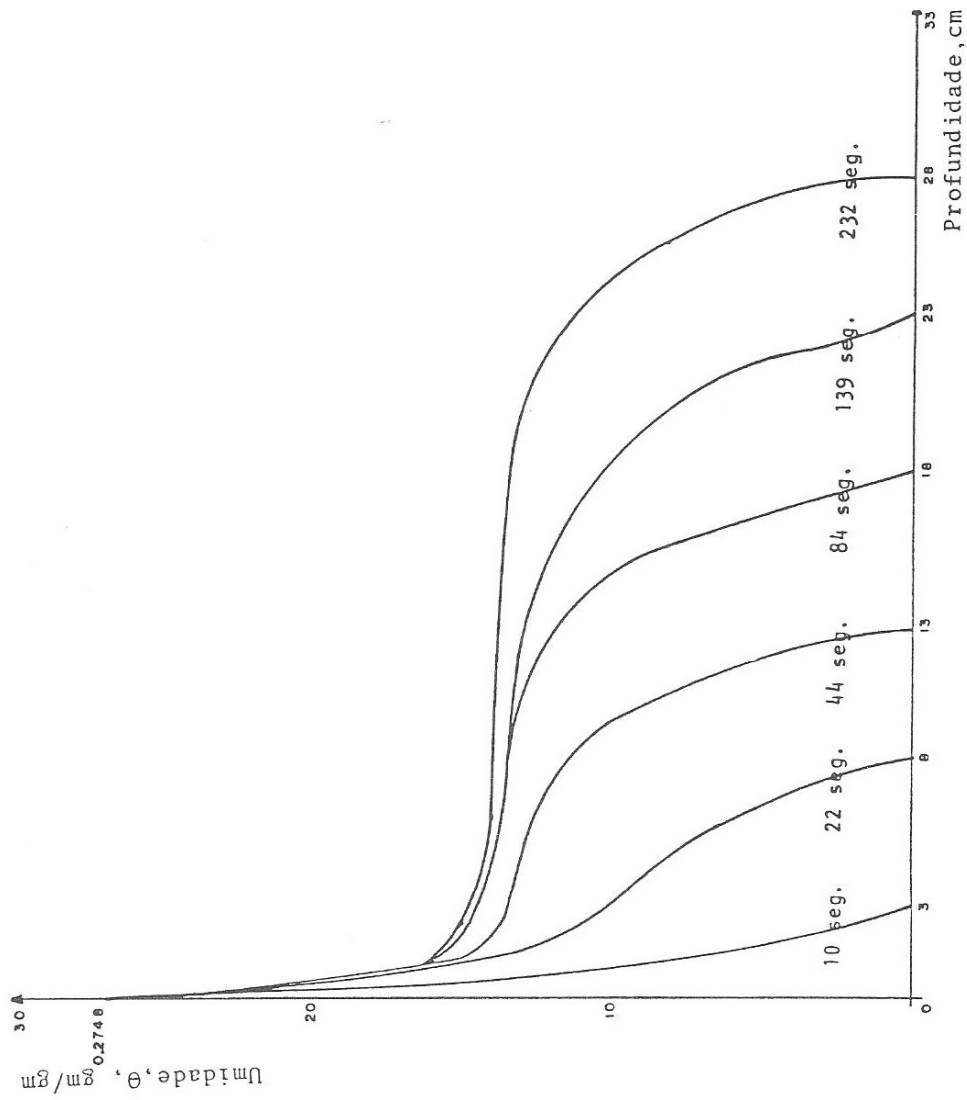


Figura 3. Teste de Infiltração-Areia Grossa (GR)



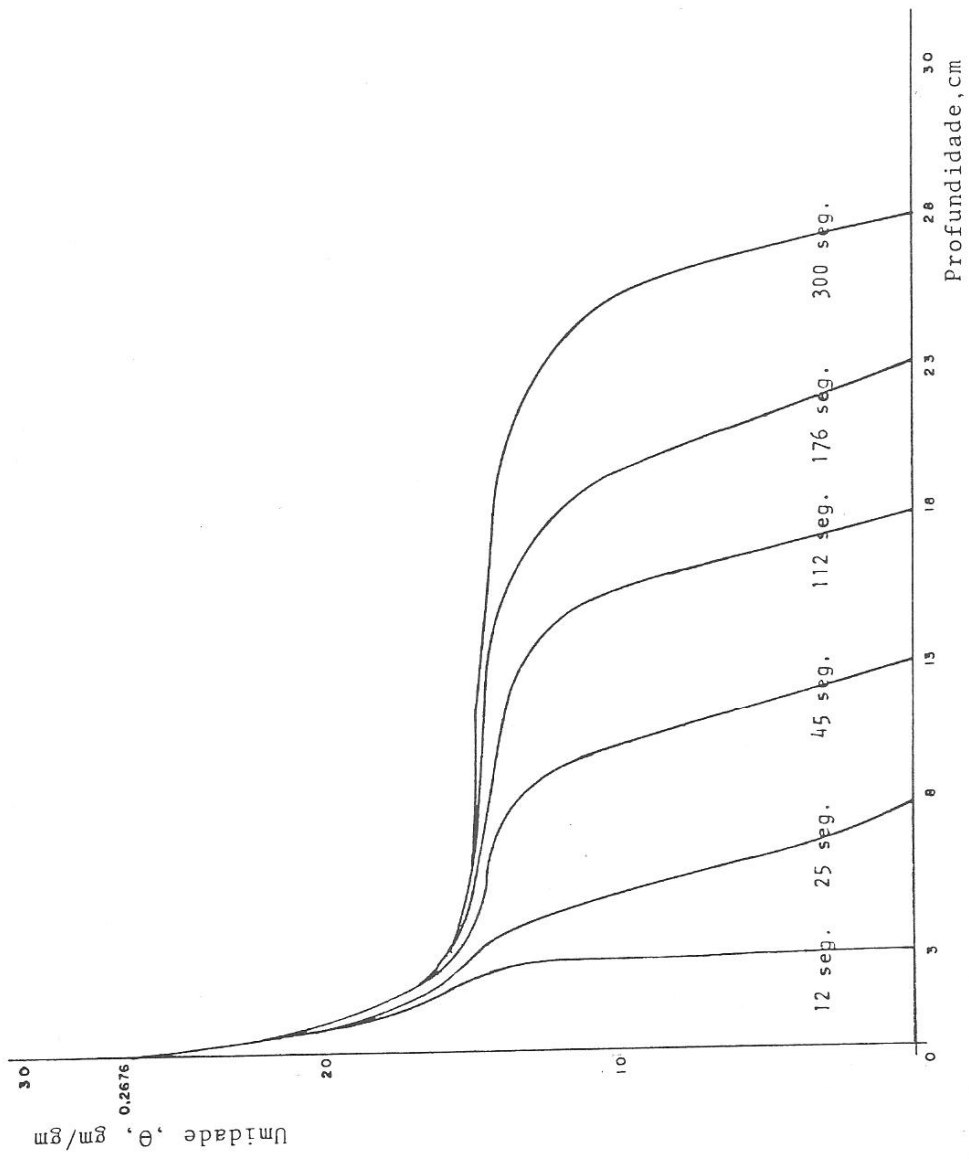


Figura 4. Teste de Infiltração-Areia Média (ME)

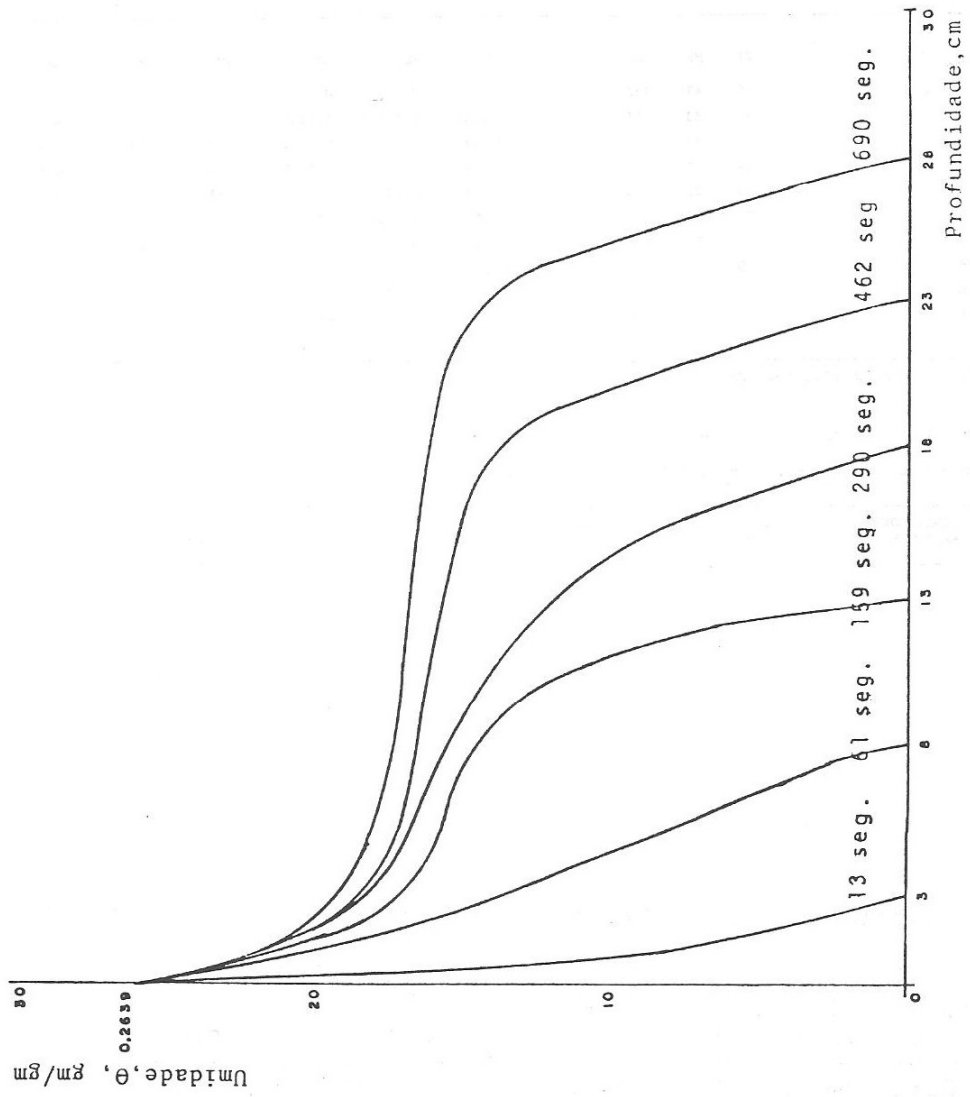


Figura 5. Teste de Infiltração-Areia Fina(Protipo-Pf)

Tabela 1. Características Físicas das Areias Fina, Média e Grossa

TIPO DE UNIDADE $\theta$ , GR/GR	ALTURA DE SUÇÃO $\psi$ , CM			COEFICIENTE DE DIFUSIVIDADE D, $CM^2/S$			COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE $K = D \frac{\partial w}{\partial \theta}$ , CM/S		
	PT	ME	GR	PT	ME	GR	PT	ME	GR
0	225	147	132	0	0	0	-	-	-
0,04	145	83	55	0.0249	0.0825	0.1155	-	-	-
0,08	53	47	28	0.0643	0.1825	0.3270	16A	18A	24A
0,12	34	30	13	0.2188	0.6025	2.3220	36A	60A	80A
0,16	23	21	10	0.5945	1.0815	3.070	38A	12B	65B
0,20	21	17	9	1.1000	3.0780	17.00	14B	22B	141B
0,24	13	11	7,5	1.5125	6.784	21.00	32B	120B	710B
0,2639	0			3.8			110B		
0,2676		0			11,0			660B	
0,2748			0			89,0			0.256
				A = 0.00001		B = 0.0001			

ALTURA DA ASCENÇÃO CAPILAR $h_c$ , CM		
$h_{(c)} PT = 32.08$		
$h_{(c)} ME = 15.70$	$L_{r1} = h_c PT/h_c ME = 2.043$	$L_{r1}^2 = 4.17$
$h_{(c)} GR = 9.50$	$L_r^2 = h_c PT/h_c GR = 3.377$	$L_{r2}^2 = 11.04$

DENSIDADE APARENTE	DENSIDADE REAL	ANÁLISE GRANULOMÉTRICA	$d_{10}$ (mm)	$d_{50}$ (mm)	$d_{60}$ (mm)

Tabela 2. Valores Médios de Difusividade e Permeabilidade

Característica da areia	PT fina	ME média	GR grossa
D média ( $cm^2/s$ )	0,0482	0,0457	0,0386
K média ( $cm/s$ )	$1.0378 \times 10^{-3}$	$5,089 \times 10^{-3}$	$2,707 \times 10^{-4}$

Tabela 3. Valores de  $\alpha$  na Equação  $K = K_{sat} \cdot e^{-\alpha \psi}$

AREA FINA (PROTÓTIPO-PT)		AREA MÉDIA (ME)		AREA GROSSA (GR)	
$\theta$ (GR/GR)	$\psi$ (cm)	$\alpha$	$\psi$ (cm)	$\alpha$	$\psi$
0,04	145	-0,1692	83	-0,3431	55
0,08	53	-0,2809	47	-0,3846	28
0,12	34	-0,3017	30	-0,4007	13
0,16	23	-0,2809	21	-0,3650	10
0,20	21	-0,1727	11	-0,2579	9
0,2748	-	-0,2430	-	-0,3507	-

$K = 3,65 \times 10^5 \times 10^{-3} = 0,011 \times 10^3$   
 $K = 2,55 \times 10^7 \times 10^{-15} = 0,066 \times 10^2$   
 $K = 5,47 \times 10^5 \times 10^{-15} = 0,256 \times 10^2$

Tabela 4. CÁLCULOS PARA VELOCIDADE DE ENTRADA NOS TRES TIPOS DE AREIA

TIPO DE AREIA	$\theta_{sat}$ gm/gm	$K_{sat}$ cm/s	Afastamentos de superfície do meio														
			3 cm		8 cm		13 cm		18 cm		23 cm						
	$\theta$ gm/gm	$V$ cm/s	$\theta$ gm/gm	$V$ cm/s	$\theta$ gm/gm	$V$ cm/s	$\theta$ gm/gm	$V$ cm/s	$\theta$ gm/gm	$V$ cm/s	$\theta$ gm/gm	$V$ cm/s					
Protótipo (PT)	0,2639	0,011	0,25	0,008	0,364	0,218	0,0020	0,052	0,219	0,009	0,035	0,212	0,002	0,021	0,200	0,0014	0,009
Média (ME)	0,2676	0,066	0,26	0,080	0,480	0,205	0,065	0,259	0,192	0,046	0,178	0,183	0,0016	0,138	0,174	0,0097	0,011
GROSSA (GR)	0,2748	0,256	0,26	0,060	2,168	0,183	0,011	1,553	0,155	0,060	0,779	0,152	0,00620	0,719	0,150	0,0050	0,644

## ESTIMATION OF ENTRY VELOCITIES OF WATER INTO SOIL SURFACE

BY

S.V.KAMESWARA SARMA<sup>1</sup>

RESUME -- The evaluation of distribution of soil moisture in the root zone may show a way to obtain better crop yields with efficient application of irrigation water, its duration and time of application, so as to meet the plant needs. The reduction of infiltration rates with time, at the top surface of soils and the varied penetration depths in the aeration zone indicate that only a portion of the water applied is utilized by plant roots, the rest being lost by way of deep percolation. In order to avoid such losses, an estimate of the entry velocities of water into soils or sands of varied textures will be useful for agronomists, as also for the water-supply engineers, whose interest lies in the recharge of water into shallow aquifers in arid and semi-arid regions of the globe.

The method presently adopted utilizes the artifice of Rijtema (1965) who expressed the velocity of flow between two soil layers as a function of the variable permeabilities of these layers, which are in turn dependent on the moisture contents within them. The author presently extended the above theory to moisture profiles obtained at various time intervals during the infiltration process, in order to assess the effect of time on rates of infiltration. The analysis shows a reduction in rates of infiltration with time, due to decreasing values of diffusivity coefficients of the porous medium. Thus, the analysis supports the classical theory of Horton (1936). These results would help the agronomers and the engineers to use judiciously the application of water, whether it is for irrigation or for recharge.

---

<sup>1</sup>Professor of Water Resources Engineering, UFPb, C. Grande, Pb.