

MÉTODOS DE INFILTRAÇÃO DE ÁGUA NO SOLO PARA DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO POR SULCOS

Raimundo Nonato Távora Costa¹, Gleidson Marques Pereira², Alexsandro Oliveira da Silva¹,
Jefferson Gonçalves Américo Nobre³, Raimundo Nonato Assis Júnior¹

RESUMO

O processo de infiltração de água no solo é de fundamental importância para dimensionamento e manejo em sistemas de irrigação. O estudo teve como objetivo proceder uma análise comparativa de técnicas para estimativa da infiltração de água no solo, com vistas ao dimensionamento, manejo e avaliação de sistema de irrigação por sulcos. Os testes de campo foram realizados na Fazenda Experimental Vale do Curu, Pentecoste - CE, em cinco baterias de sulcos, onde foram realizados quatro testes para cada uma das seguintes técnicas de determinação da infiltração: cilindro-infiltrômetro, sulco-infiltrômetro, entrada-saída, balanços de volume proposto por Christiansen e balanço de volume proposto por Walker e Skogerboe. Antes das aplicações de cada técnica, foi determinada a umidade do solo para posterior avaliação de sua influência na determinação das constantes numéricas da equação de infiltração de Kostiakov. A lâmina de água infiltrada no solo apresentou um maior grau de dependência à variável preparo de solo se comparada à variável umidade no solo. As técnicas de balanço volumétrico apresentaram resultados semelhantes tanto no que diz respeito à lâmina infiltrada acumulada quanto ao regime assintótico, permitindo desta forma que se recomende a metodologia preconizada por Christiansen em situações que se apresentem limitantes ao uso da metodologia de Walker e Skogerboe.

Palavras-chave: Infiltrômetro, fluxo de água, equação de Kostiakov.

SOIL WATER INFILTRATION METHODS FOR DIMENSIONING OF FURROW IRRIGATION SYSTEM

ABSTRACT

The soil water infiltration process is very important for size and management of irrigation systems. The present study aims to carry out a comparative analysis of techniques to estimate the infiltration

¹ Eng. Agrônomo, Docente da Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Fortaleza – CE, E-mail: rntcosta@ufc.br; alexsandro@ufc.br; assisjr@ufc.br

² Eng. Agrônomo; Docente da Universidade Estadual do Pará, Centro de Ciências Naturais e Tecnologia, Marabá-PA, Email: agro_gleidson@yahoo.com.br

³ Eng. Agrônomo, Docente da Universidade de Fortaleza, Fortaleza-CE, E-mail: jeffersonnobre@hotmail.com

of water in the soil to size and value irrigation systems. The field test was carried out at the Vale do Curu Experimental Farm, Pentecoste-CE, Brazil, in five furrow with four test to different techniques infiltration: cylinder-infiltrater, furrow-infiltrater, input-output, volume balances proposed by Christiansen and volume balance proposed by Walker and Skogerboe. Before of application tests was determinate the soil moisture for evaluate of numeric constant of Kostiakov equation. The water depths infiltration in soil presented a dependence majority degree the variable soil preparation if comparative the soil moisture. The volumetric balance techniques presented similar results for the infiltration in water depths accumulated as asymptotic regime, allowed in this way, which recommends the Christiansen methodology in a situation that Walker and Skogerboe methodological do not present for use.

Keywords: Infiltrometer, water flow, Kostiakov's equation.

INTRODUÇÃO

Infiltração é o nome dado ao processo pelo qual a água penetra no solo, através de sua superfície, sendo este processo de fundamental importância para dimensionamento e manejo em sistemas de irrigação por sulcos, sistema este muito utilizado ainda em diversos perímetros irrigados da região Nordeste com valores próximos a 200.000 ha e ainda com 51% das áreas irrigadas no Brasil (TESTEZLAF, 2017).

A infiltração é um fenômeno complexo, dependente de inúmeras variáveis relacionadas às características físicas e morfológicas do solo (BAUTISTA et al., 2014; WALKER; SKROGERBOE, 1987). Pesquisas como as de Bautista et al. (2016), Fan et al. (2018) e Mattar et al. (2015) evidenciam em seus trabalhos a relação entre as características físicas do solo e suas relações intrínsecas com a taxa de infiltração, dentre estas, textura e estrutura do solo. Ressaltando que além destas variáveis, práticas culturais podem interferir no aumento ou no decréscimo da infiltração, dependendo do equipamento utilizado e da umidade do solo no momento do preparo mecânico do solo.

As características de infiltração da água no solo constituem um dos principais parâmetros requeridos para dimensionamento, operação, manejo e avaliação dos sistemas de irrigação por superfície (LIMA FILHO, 2015; SAYARI et al., 2017). Conforme estudos conduzidos por Lima Filho (2015) a avaliação

de parâmetros como a infiltração em função do tempo é essencial na determinação da quantidade de água absorvida a qualquer distância ao longo do sulco, o que auxilia na determinação do tempo de oportunidade para infiltrar a lâmina necessária de irrigação, e tais parâmetros quando corretamente determinados aumentam a eficiência do sistema de irrigação, conforme atestam Ostad-Ali-Askari e Shayannezhad (2015).

Estudos como os de Vanani et al. (2017), Vanani et al. (2015) e Bautista et al. (2014), apontam a infiltração da água no solo como uma das características mais difíceis de se quantificar, por apresentar grande variabilidade espacial e temporal o que dificulta sua determinação de maneira adequada, o que de forma direta afetam na definição de outros parâmetros do sistema de irrigação por superfície como comprimento dos sulcos e fase avanço. Neste aspecto, a escolha do método para determinação da infiltração pode ser um fator chave para elevar a eficiência dos sistemas de irrigação por sulcos (BAUTISTA et al., 2016; LIMA FILHO, 2015), pois cada método possui diferentes procedimentos para determinação da infiltração de água no solo, o que pode gerar erros grosseiros na lâmina infiltrada e no tempo de oportunidade.

Mediante ao fato de existir várias técnicas de determinação das características de infiltração, como o cilindro infiltrômetro, sulco infiltrômetro, entrada e saída, balanço de volume (CHRISTIANSEN et al., 1966) e balanço de volume (WALKER;

MÉTODOS DE INFILTRAÇÃO DE ÁGUA NO SOLO PARA DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO POR SULCOS

SKOGERBOE, 1987), este parâmetro ainda é muitas vezes estimado de forma imprecisa. Contudo, é presente na literatura o reconhecimento por muitos autores destas técnicas serem ainda o melhor veículo da reprodução às condições nas quais a irrigação se desenvolve e ainda serem preferidas.

Assim, o presente estudo tem como objetivo proceder a uma análise comparativa de técnicas para estimativa da infiltração de água no solo, com vistas ao dimensionamento e avaliação de sistemas de irrigação por superfície.

MATERIAL E MÉTODOS

Caracterização da área do experimento

O experimento foi realizado na Fazenda Experimental Vale do Curu, Pentecoste – CE, pertencente à Universidade Federal do Ceará. As coordenadas geográficas de referência do local são latitude 3°49'25"S, longitude 39°20'20" W e altitude média de 50 m. O solo foi classificado como Neossolo Flúvico (EMBRAPA, 2013), cujos atributos estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Atributos de Neossolo Flúvico na camada de 0 – 30 cm de profundidade localizado na Fazenda Experimental Vale do Curu, Pentecoste – CE.

Composição Granulométrica (g kg ⁻¹)				Classe Textural	Densidade do Solo (kg m ⁻³)	pH	CE (dS m ⁻¹)
Areia Grossa	Areia Fina	Silte	Argila				
180	550	210	60	Franco arenosa	1400	6,8	0,72

O delineamento experimental foi o de blocos completamente casualizados, constando de cinco tratamentos e quatro repetições. Os tratamentos referem-se às técnicas para estimativa da infiltração de água no solo: T1: Cilindro Infiltrômetro; T2: Sulco Infiltrômetro; T3: Entrada e Saída; T4: Balanço de Volume (CHRISTIANSEN et al., 1966) e T5: Balanço de Volume (WALKER; SKOGERBOE, 1987). Cada teste de

infiltração foi realizado quatro vezes com intervalos médios de nove dias (simulando eventos de irrigação) sendo quantificada a umidade volumétrica do solo em cada teste (Tabela 2). Para isto, foram coletadas amostras de solo compostas no sentido dos sulcos de irrigação para obtenção da média do conteúdo de umidade obtida pelo método padrão de estufa e a densidade do solo (MANTOVANI et al., 2009; TESTEZLAF, 2017).

Tabela 2. Conteúdo médio de umidade no solo antes da realização dos testes de infiltração de água no solo

Testes	θ (m ³ m ⁻³)
1°	0,072
2°	0,070
3°	0,043
4°	0,116

A infiltração de água no solo foi determinada através da equação de Kostiakov,

sendo sua função representada pela seguinte equação (1):

$$Z = k t^a \quad (1)$$

Em que:

Z: infiltração acumulada, $m^3 m^{-1}$

K: parâmetro dependente da condição de umidade inicial do solo;

T: =é o tempo de oportunidade, min;

a: é a constante dependente do solo.

A velocidade de infiltração foi obtida através da derivada da infiltração acumulada em relação ao tempo, conforme equações 2 e 3:

$$VI = \frac{dZ}{dt} \quad (2)$$

$$VI = a k t^{a-1} \quad (3)$$

Em que:

VI: velocidade de infiltração ($mm h^{-1}$)

Método do cilindro infiltrômetro (CI)

Para o método do CI foram utilizados dois cilindros de chapas com 0,50 e 0,25 m de diâmetro, respectivamente, ambos com 0,30 m de altura. Instalaram-se os cilindros no solo até uma profundidade de 0,10 m. Cobriu-se o fundo do cilindro central com o plástico fino, posteriormente introduziu-se água no cilindro interno e externo até próximo do bordo superior. Retirou-se o plástico e, imediatamente, fez-se à primeira leitura de lâmina infiltrada, com uma régua graduada. O nível d'água nos dois cilindros foi mantido aproximadamente igual e, sempre que este descendesse em torno de 0,05 m, reabasteciam-se ambos os cilindros.

Método do sulco infiltrômetro (SI)

Para a determinação deste método assentaram-se duas chapas metálicas de 0,30 m perpendiculares à secção transversal do sulco, a uma distância de 1,0 m, sendo o reservatório instalado próximo ao sulco infiltrômetro. Cobriu-se com uma lona plástica a secção do sulco infiltrômetro e adicionou-se água. Introduziu-se a ponta da mangueira de entrada de ar no nível d'água desejado, de forma a funcionar como um sistema de Mariotte. Retirou-se a lona plástica rápida e cuidadosamente sendo que o primeiro registro do nível d'água, no tambor (reservatório), foi

efetuado em torno de dois minutos de teste, tendo em vista a oscilação da água no reservatório. O tempo de registro de lâminas infiltradas seguiu intervalos de tempo variáveis e crescentes com o tempo até a estabilização. A análise dos valores de lâminas infiltradas (mm) e tempo (min) foi procedida da mesma forma que a descrita para o método do cilindro infiltrômetro.

Método de entrada e saída (ES)

Assentaram-se os dois medidores Parshall, de 1" previamente calibrados em um comprimento de sulco de 80 m. Deixou-se normalizar o fluxo d'água nos medidores Parshall, para então serem tomadas as leituras de lâminas d'água, utilizando uma régua graduada, as quais foram posteriormente transformadas em vazões. Os registros foram anotados com respectivos tempos até estabilizar. A diferença entre a vazão de entrada e a vazão de saída permitiu calcular a taxa de infiltração. Procedeu-se à análise de regressão linear para obtenção das equações de infiltração.

Método do balanço de volume I (CHRISTIANSEN et al., 1966) (BVC)

Assentou-se o medidor Parshall no início do sulco para as medições das vazões de entrada. Estas medições foram realizadas de maneira semelhante à citada para a técnica de entrada e saída. Mediu-se a razão de avanço da água em cada estação. Procedeu-se à análise

MÉTODOS DE INFILTRAÇÃO DE ÁGUA NO SOLO PARA DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO POR SULCOS

de regressão linear para obtenção das equações de infiltração de acordo com a metodologia de Christiansen et al. (1966).

Método do balanço de volume II (WALKER; SKOGERBOE, 1987) (BVWS)

Foram utilizadas calhas Parshall, de 1” previamente calibradas para obtenção de hidrógrafas de entrada e de saída, tendo-se o cuidado em manter o fluxo na calha de entrada constante. De posse dos resultados, confeccionaram-se as duas hidrógrafas, e após isso, integraram-se para se obter os volumes aplicados e os volumes de runoff. Para a confecção das curvas de avanço e de recessão, instalaram-se estacas, em espaços regulares de 10 m até os 80 m de sulco. Durante a fase de avanço, registrou-se o tempo em que a água atingiu cada estação e para o registro da fase de recessão, utilizou-se como critério o momento em que a lâmina de água decresceu a mais ou menos a metade da lâmina original. Este procedimento foi utilizado para não superestimar o tempo de recessão. Após, determinou-se a umidade volumétrica do solo antes da irrigação e a geometria da seção transversal da área de fluxo. A largura da água na superfície e respectiva lâmina de água superficial no ponto médio da largura do sulco também foram medidas. Tal procedimento foi realizado a intervalos de 0,01 m na altura de água, até estabilizar. Após a coleta dos dados a campo, utilizou-se a metodologia proposta por Walker e Skogerboe (1987) para o cálculo das constantes de infiltração de Kostiakov.

Análise estatística dos resultados

Os valores de tempo acumulado e lâminas infiltradas acumuladas foram analisados através de regressão. Desta maneira obtiveram-se as equações de infiltração acumulada através do modelo proposto por Kostiakov ($Z=k t^a$). Os valores médios das constantes “k” e “a” das equações de cada tratamento foram submetidos à análise de variância (Teste F) e posteriormente, após confirmação de significância em nível de 5% de probabilidade foram submetidos ao teste média de Tukey.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Análise dos parâmetros empíricos da equação de infiltração

Na Tabela 3 apresentam-se as constantes “k” e “a” da equação de infiltração acumulada de Kostiakov, referentes aos tratamentos (técnicas de infiltração), objetos deste estudo. Dentre as técnicas de infiltração analisadas, a técnica do balanço de volume permite calcular em cada incremento do avanço, e de forma simultânea, o volume de água que entra no sulco, além do volume de água armazenado na superfície e, portanto, o volume infiltrado em cada estação. Considerando o maior refinamento da metodologia preconizada por Walker e Skogerboe (1987), a mesma foi tomada como padrão para fins de análise comparativa com as demais técnicas utilizadas no presente estudo.

Tabela 3. Constantes numéricas “k” (mm.min⁻¹) e “a” da equação de infiltração acumulada de Kostiakov para os métodos de infiltração analisados.

Repetições	Cilindro		Sulco		Entrada e Saída		BVC ⁽¹⁾		BVWS ⁽²⁾	
	Infiltrômetro		Infiltrômetro							
	k	a	k	a	k	a	k	a	k	a
1	8,14	0,60	1,34	0,60	2,93	0,84	4,2	0,34	2,8	0,41
2	5,13	0,47	0,76	0,58	1,87	0,88	1,4	0,35	1,2	0,38
3	13,90	0,45	0,81	0,56	5,99	0,64	0,7	0,53	0,8	0,59
4	4,37	0,54	2,48	0,37	3,45	0,75	1,0	0,32	0,24	0,35
Média	7,88	0,51	1,35	0,53	3,56	0,78	1,82	0,38	1,26	0,43

⁽¹⁾BVC - Método do balanço de volume (CHRISTIANSEN et al., 1966); ⁽²⁾BVWS - Método do balanço de volume(WALKER; SKOGERBOE, 1987)

Na Figura1 visualizam-se os gráficos de infiltração acumulada (Z) em função do tempo

acumulado em cada uma das repetições, das técnicas de infiltração analisados no estudo.

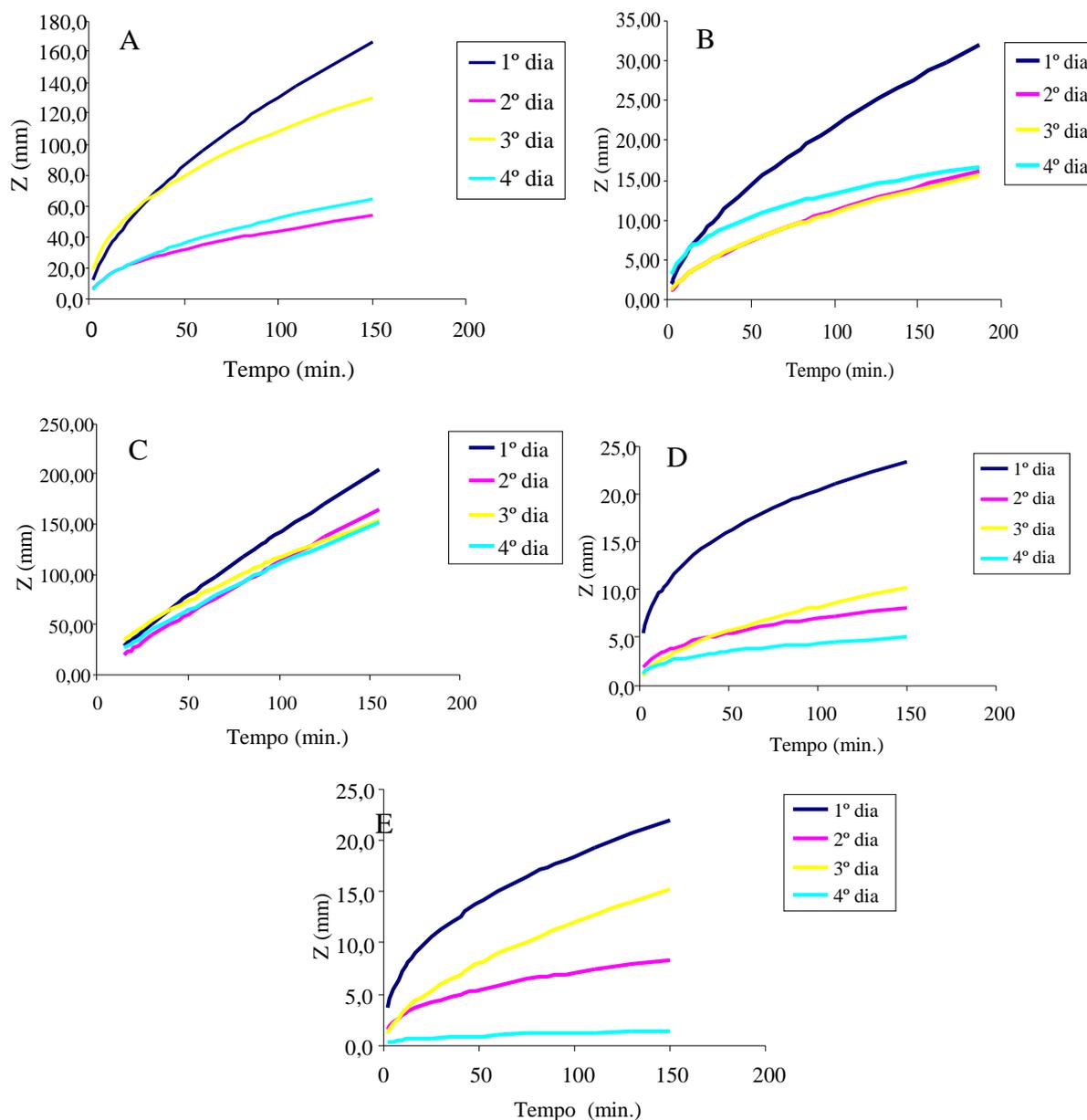


Figura 1. Infiltração acumulada em função do tempo acumulado: técnica do cilindro infiltrômetro (A), técnica do sulco infiltrômetro (B), técnica de entrada e saída (C), técnica do balanço de volume (Christiansen et al., 1966) (D) e técnica do balanço de volume (Walker e Skogerboe, 1987) (E).

Com exceção do método de entrada-saída (Figura 1C), verificaram-se grandes variabilidades entre os testes das metodologias analisadas. Observa-se, ainda, que em todos os testes avaliados, as maiores lâminas infiltradas (Z) ocorreram no primeiro dia de testes com

valores máximos de 160 mm (Figura 1A) para o CI, fato este que pode ser atribuído às condições de revolvimento do solo, sendo estes valores também afetados pela umidade inicial no solo. Lima Filho (2015) em estudos sobre eficiência de sistemas de irrigação por

MÉTODOS DE INFILTRAÇÃO DE ÁGUA NO SOLO PARA DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO POR SULCOS

sulcos observou alterações no processo de infiltração de água no solo conforme o aumento do número de irrigações, onde maiores taxas de infiltração podem ser obtidas na primeira irrigação devido ao baixo conteúdo de água no solo.

Em todos os testes analisados, à exceção da metodologia do sulco-infiltrômetro (Figura 1B), verifica-se a importância dos gradientes hidráulicos no processo de infiltração de água no solo. Algumas alterações nos formatos destas curvas, analisadas sob a ótica dos gradientes hidráulicos, podem ser explicadas pelo fato da umidade no solo não se constituir numa característica isotrópica. Ainda conforme Walker e Skogerboe (1987), o principal objetivo de se avaliar um campo irrigado por superfície é identificar alternativas viáveis para melhorar o desempenho do sistema. Assim, as avaliações podem ser capazes de fornecer informações para derivar os parâmetros de infiltração utilizados para a simulação de modelos (WU et al., 2017).

Considerando pela análise dos resultados que os gradientes hidráulicos apresentaram maior influência a partir do segundo dia de testes, a técnica do balanço de volume de Walker e Skogerboe (1987) se apresentou comparativamente às demais, como a que melhor incorporou no processo de infiltração a influência desta variável.

Um comprimento de sulcos em torno de 100 m é um valor representativo para a grande maioria destes sistemas de irrigação. Para este comprimento e mesmo considerando um teor

de umidade baixo antes da irrigação e um declive do terreno adequado, estima-se que um tempo de corte de 150 minutos seja bastante razoável. Considerando, ainda, que no processo de infiltração, as curvas de infiltração acumulada tendem a se tornar assintóticas ao eixo do tempo acumulado, verifica-se para este estudo e para o tempo de infiltração anteriormente comentado, que o referido processo não ocorre ao se analisar a técnica de entrada-saída.

O tempo de estabilização do regime assintótico da curva de infiltração acumulada tem uma correlação com o gradiente hidráulico no solo antes do processo de infiltração. Assim, é que para menores valores de gradiente hidráulico espera-se a obtenção mais rápida do regime assintótico. Neste sentido verificam-se nas configurações dos gráficos contidos na Figura 1, que as duas técnicas do balanço de volume (Figura 1C e 1D), sobretudo a preconizada por Walker e Skogerboe (1987), apresentam a partir do segundo dia de testes, uma relação de dependência, tanto no que tange à lâmina infiltrada acumulada, quanto ao regime assintótico.

Contudo, nota-se que a estabilização não é total em face da própria natureza da equação utilizada.

No sentido de comparar mais detalhadamente entre si as diversas técnicas de obtenção das constantes da equação de infiltração acumulada, elaborou-se a Figura 2, que trata da representação gráfica dos dados apresentados na Tabela 3.

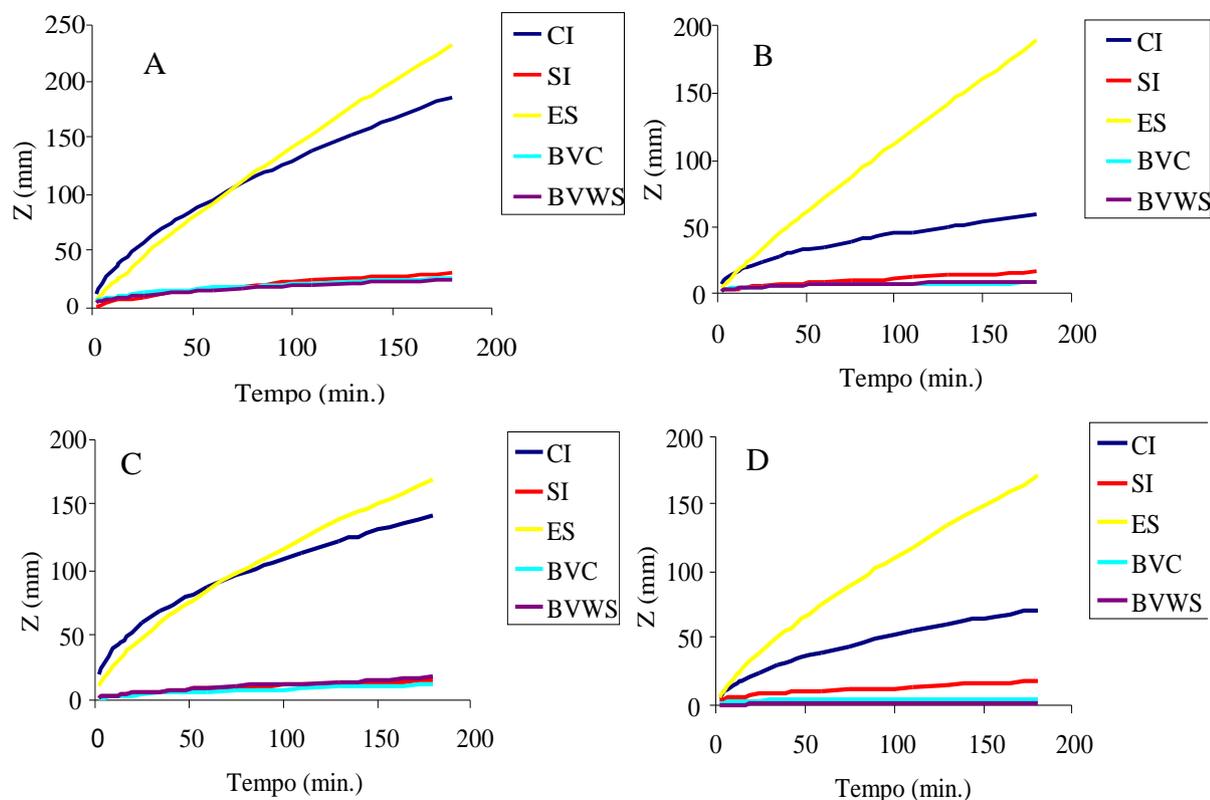


Figura 2. Infiltração acumulada em função do tempo acumulado: Teste nº 1 (A), Teste nº 2 (B), Teste nº 3 (C) e Teste nº 4 (D).

Método do cilindro infiltrômetro (CI), Método do sulco infiltrômetro (SI), Método de entrada e saída (ES); BVC - Método do balanço de volume (CHRISTIANSEN et al., 1966); BVWS - Método do balanço de volume (WALKER; SKOGERBOE, 1987).

O coeficiente “ k ” corresponde ao valor de infiltração decorrido no primeiro minuto dos testes, traduzindo o processo de infiltração na sua fase inicial. Evidencia-se nesta figura, que a técnica do cilindro infiltrômetro (Figura 2A) proporcionou os maiores valores da constante numérica “ k ”, uma vez que as curvas para o cilindro infiltrômetro estão acima das demais nos primeiros momentos do processo. Isto se deve ao método de instalação do equipamento, que por mais cuidadoso que seja, não permite uma penetração regular do cilindro medidor. Neste tipo de técnica é comum ocorrer o que se denomina “efeito parede”, ou seja; o surgimento de um fluxo preferencial junto à parede entre o cilindro e o solo.

Segundo Silva et al. (2017), os valores de infiltração neste método são bem controversos e variados, devido as diferentes

características do solo e dos cultivos adotados, tais questões também são levantadas por Zwirtes et al. (2013) em estudos utilizando o anel infiltrômetro, onde estes concluíram que este método superestima os valores de infiltração de água no solo.

Verifica-se em todos os quatro testes uma superestimativa ou tendência de uma maior lâmina infiltrada na técnica de entrada-saída (ES), comparativamente às demais técnicas.

A técnica do cilindro-infiltrômetro (CI), embora em magnitude menor que a técnica de ES, demonstrou estimativas de lâmina infiltrada bem superiores, se comparada às técnicas do sulco-infiltrômetro (SI) e às duas técnicas do balanço volumétrico (BVC e BVWS). Contudo, as técnicas BVC e BVWS demonstraram resultados semelhantes e menores do que os demais métodos.

MÉTODOS DE INFILTRAÇÃO DE ÁGUA NO SOLO PARA DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO POR SULCOS

Na Tabela 4 apresentam-se as equações de velocidade de infiltração derivadas da equação de infiltração acumulada para cada teste aplicado.

Os dados demonstram que a técnica do cilindro-infiltrômetro apresentou para o tempo de um minuto, os maiores valores de

velocidade de infiltração comparativamente aos demais tratamentos. Observa-se, ainda, que o maior valor ocorreu para a condição de maior gradiente hidráulico, demonstrando assim a importância da umidade no solo no início do processo de infiltração (LIMA FILHO, 2015).

Tabela 4. Equações de velocidade de infiltração determinadas para método de infiltração e repetição realizado.

Trat.	1º dia (mm h ⁻¹)	2º dia (mm h ⁻¹)	3º dia (mm h ⁻¹)	4º dia (mm h ⁻¹)
CI	VI = 294,24 .t ^{-0,3979}	VI = 144,23 .t ^{-0,5317}	VI = 372,29 .t ^{-0,5537}	VI = 141,32 .t ^{-0,4619}
SI	VI = 48,73 .t ^{-0,3948}	VI = 26,65 .t ^{-0,4155}	VI = 27,59 .t ^{-0,4357}	VI = 54,41 .t ^{-0,6343}
ES	VI = 148,15 .t ^{-0,158}	VI = 99,97 .t ^{-0,1116}	VI = 231,31 .t ^{-0,3564}	VI = 155,67 .t ^{-0,2492}
BVC	VI = 86,49 .t ^{-0,6568}	VI = 29,31 .t ^{-0,6511}	VI = 22,49 .t ^{-0,4645}	VI = 19,32 .t ^{-0,678}
BVWS	VI = 70,03 .t ^{-0,5898}	VI = 28,62 .t ^{-0,6129}	VI = 28,25 .t ^{-0,4115}	VI = 4,86 .t ^{-0,6506}

Método do cilindro infiltrômetro (CI), Método do sulco infiltrômetro (SI), Método de entrada e saída (ES); BVC - Método do balanço de volume (CHRISTIANSEN et al., 1966); BVWS - Método do balanço de volume (WALKER; SKOGERBOE, 1987).

Os maiores valores médios de velocidade de infiltração básica estão associados às técnicas de entrada e saída e cilindro-infiltrômetro, verificando-se ainda a influência do preparo de solo sobre este parâmetro, em todos os tratamentos analisados. Se considerarmos um tempo acumulado de infiltração correspondente a três horas, têm-se os valores médios de 50,1 e 20,1 mm.h⁻¹ para as técnicas de entrada-saída e cilindro-infiltrômetro, respectivamente. Para as técnicas do balanço de volume, os valores médios de infiltração básica foram similares (1,6 e 1,8 mm.h⁻¹).

Tais resultados para os testes de BVC e BVWS corroboram com os estudos de Canone et al. (2015) em que estes autores simulando eventos de irrigação concluem que a redução das taxas de fluxo e aumento da duração de eventos de irrigação seriam o meio viável para o aumento da eficiência da irrigação.

Nas Tabelas 5 e 6 apresentam-se, respectivamente, as análises de variância dos valores das constantes numéricas “k” e “a”, e nas Tabelas 7 e 8, os testes de Tukey para médias de tratamentos destas constantes numéricas.

Tabela 5. Análise de Variância para os valores médios da constante numérica k para os métodos utilizados na obtenção da infiltração de água no solo.

Causas de Variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	Valor F	Prob.>F
Blocos	3				
Tratamento	4	124,7912	31,1978	5,951	0,00449
Resíduo	12	78,63940	5,2426		
Total	19				

Tabela 6. Análise de Variância para os valores médios da constante numérica a para os métodos utilizados na obtenção da infiltração de água no solo.

Causas de Variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	Valor F	Prob.>F
Blocos	3				
Tratamento	4	0,37183	0,92957	9,277	0,00056
Resíduo	12	0,15030	0,10020		
Total	19				

Observa-se, com base nos resultados das análises estatísticas que as duas variáveis respostas analisadas, ou seja; os parâmetros empíricos da equação de Kostiakov foram significativos em nível de 1% de probabilidade ($p < 0,01$). O valor médio de “ k ” para a técnica do cilindro infiltrômetro foi bem superior aos valores obtidos para os demais tratamentos analisados, só não diferindo estatisticamente em nível de 5% de probabilidade ($p < 0,05$) para o valor obtido pela técnica de entrada-saída.

De acordo com a Tabela 7 os valores médios de “ k ” dos tratamentos CI e ES não diferem estatisticamente em nível de 5% pelo teste de Tukey e apresentam os maiores valores, se comparados aos demais tratamentos, fato este que pode estar associado às condições de instalação do cilindro e da calha de saída.

Já os demais tratamentos, além de não diferirem estatisticamente entre si ($p < 0,05$), apresentam os menores valores médios da constante “ k ”.

Tabela 7. Teste de comparação de média da constante numérica k para os métodos utilizados para obtenção da infiltração de água no solo.

Tratamentos	Nº Repetição	Médias
Cilindro infiltrômetro	4	7,8895 A
Entrada e saída	4	3,5600 AB
BVC	4	1,8250 B
Sulco infiltrômetro	4	1,3492 B
BVWS	4	1,2600 B

BVC - Método do balanço de volume (CHRISTIANSEN et al., 1966); BVWS - Método do balanço de volume (WALKER; SKOGERBOE, 1987). * Médias seguidas pela mesma letra na vertical não diferem entre si em nível 5% de significância pelo teste de Tukey

Trabalhos como os de Silva et al. (2017) e Zwirter et al. (2013) já demonstram a variabilidade do método de CI, sendo que tais valores para determinação de equações de infiltração deste método podem superestimar o dimensionamento de sistemas de irrigação por sulcos, podendo acarretar uma série de problemas quando associados a outros parâmetros como a declividade. Dentre as principais limitações de uma superestimativa no dimensionamento de sulcos, pode-se citar a

excessiva percolação, o que acarreta a baixa eficiência de sistemas de irrigação (OSTAD-ALI-ASKARI; SHAYANNEZHAD, 2015) e a transposição de sedimentos (KING et al., 2016) interferindo assim na conservação do solo. De acordo com a Tabela 8, os menores valores para a constante “ a ” associam-se às metodologias de balanço volumétrico de Christiansen et al. (1966) e de Walker e Skogerboe (1987), se comparados aos valores médios dos demais tratamentos.

MÉTODOS DE INFILTRAÇÃO DE ÁGUA NO SOLO PARA DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO POR SULCOS

Tabela 8. Teste de comparação de média da constante numérica a para os métodos utilizados para obtenção da infiltração de água no solo.

Tratamentos	Nome	Nº Repetição	Médias	5%
3	Entrada e saída	4	0,7812	A
2	Sulco infiltrômetro	4	0,5299	B
1	Cilindro infiltrômetro	4	0,5137	B
5	BVC	4	0,4337	B
4	BVWS	4	0,3874	B

BVC - Método do balanço de volume (CHRISTIANSEN et al., 1966); BVWS - Método do balanço de volume (WALKER; SKOGERBOE, 1987). * Médias seguidas pela mesma letra na vertical não diferem entre si em nível 5% de significância pelo teste de Tukey

Este fato demonstra que as metodologias de balanço volumétrico apresentam um tempo de resposta menor ao processo físico da infiltração de água no solo, porquanto para as condições do experimento, num tempo de irrigação de 90 minutos, as curvas de infiltração do balanço de volume atingiram o regime assintótico. Os maiores valores para a constante numérica “ a ” estão associados às técnicas de entrada-saída, sulco e cilindro-infiltrômetro, demonstrando assim uma superestimativa da infiltração acumulada, se comparada às técnicas do balanço de volume.

CONCLUSÕES

A lâmina de água infiltrada no solo apresentou um maior grau de dependência à variável preparo de solo se comparada à variável umidade no solo. As técnicas de BVC e BVWS apresentaram resultados semelhantes tanto no que diz respeito à lâmina infiltrada acumulada quanto ao regime assintótico.

As técnicas de entrada-saída e cilindro-infiltrômetro apresentaram valores de infiltração acumulada superestimados se comparados aos demais tratamentos analisados, sobretudo às metodologias de balanço volumétrico.

Recomenda-se a metodologia preconizada por Christiansen (BVC) em situações que se apresentem limitantes o uso da metodologia de Walker e Skogerboe (BVWS).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BAUTISTA, E. WARRICK, A. W.; SCHLEGEL, J. L.; THROP, K. R.; HUNSAKER, D. J. Approximate furrow infiltration model for time-variable ponding depth. **Journal Irrigation and Drainage Engineering**, v.142, n. 11, p. 04016045-11, 2016.
<https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29IR.1943-4774.0001057>.
- BAUTISTA, E.; WARRICK, A. W.; STRELKOFF, T. S. New result for an approximate method for calculating two-dimensional furrow infiltration. **Journal Irrigation and Drainage Engineering**, v. 140, n. 10, p.04014032-10, 2014.
<https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29IR.1943-4774.0000753>.
- CANONE, D.; PREVIATI, M.; BEVILACQUA, I.; SALVAI, L.; FERRARIS, S. Field measurements based model surface irrigation efficiency assessment. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 156, p. 30-42, 2015.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2015.03.015>.
- CHRISTIANSEN, J.E.; BISHOP, A.A.; KIEFER, F.W & FOK, YU-SI. Evaluation of intake rate constants to related do advance of water in surface irrigation. **Transactions of the American Society Agricultura**

Engineers, Chicago, p. 671-674. 1966.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Manual de métodos de análise de solo** / Centro Nacional de Pesquisa de Solos. 3. ed. Rio de Janeiro: Embrapa, 2013. 353 p.

FAN, Y.; HUANG, N.; GONG, J.; SHAO, X.; ZHANG, J.; ZHAO, T. A simplified infiltration model for predicting cumulative infiltration during vertical line resource irrigation. **Water**, v. 10, n.1 p. 1-12, 2018. <https://doi.org/10.3390/w10010089>.

KING, B. A.; BJORNEBERG, D. L.; TROUT, T. J.; MATEOS, L.; ARAÚJO, D.; COSTA, R. N. Estimation of furrow irrigation sediment loss using artificial neural network. **Journal Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v.142, n.1, p. 04015031-8, 2016. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000932](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000932).

LIMA FILHO, A. F. Determinação analítica da performance da irrigação por sulcos abertos e em declive. **Revista Ceres**, v. 62, n. 3, p. 251-258, 2015. <http://dx.doi.org/10.1590/0034-737X201562030004>.

MANTOVANI, E. C.; BERNARDO, S.; PALARETTI, L. F. **Irrigação: princípios e métodos**. 3ª Ed. Viçosa: Editora UFV, 2009. 355p.

MATTAR, M. A.; ALAZBA, A. A.; EL-ABEDIN, T. K. Z. Forecasting furrow irrigation infiltration using artificial neural networks. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 148, p. 63-71, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2014.09.015>.

OSTAD-ALI-ASKARI, K.; SHAYANNEZHAD, M. Developing an optimal design model of furrow irrigation based on the minimum cost and maximum irrigation efficiency. **International Bulletin**

of Water Resources & Development, v. 3, n. 2, p. 18-24, 2015.

SAYARI, S.; RAHIMPOUR, M.; ZOUNEMAT-KERMANI, M. Numerical modeling based on a finite element method for simulation of flow in furrow irrigation. **Paddy Water Environmental**, v. 15, p. 879-887, 2017.

SILVA, N. F.; CUNHA, F. N.; CABRAL FILHO, F. R.; MORAIS, W. A.; CUNHA, E. S.; ROQUE, R. C.; ALVES, D. K. M.; TEIXEIRA, M. B. Métodos para estimativa da infiltração de água em um latossolo sob plantio direto e convencional. **Global Science na Technology**, v. 10, n.1, p. 169-176, 2017.

TESTEZLAF, R. **Irrigação: métodos, sistemas e aplicações**. Campinas: Unicamp/FENAGRI, 2017, 215p.

VANANI, H. R.; TODESHKI, A. R. S.; ASKARI, K. O. A.; SHAYANNEJAD, M. The effect of heterogeneity due to inappropriate tillage on water advance and recession in furrow irrigation. **Journal of Agricultural Science**, Ottawa, v. 7, n. 6, p. 127-137, 2015.

VANANI, H. R.; SHAYANNEJAD, M.; TUDESHKI, A. R. S.; OSTAD-ALI-ASKARI, K.; ESLAMIAN, S.; MOHRI-ESFAHANI, E.; HAERI-HAMEDANI, M.; JABBARI, H. Development of new method for determination of infiltration coefficients in furrow irrigation with natural non-uniformity of slope. **Sustainable Water Resources Management**, v. 3, p. 163-169, 2017.

WALKER, W. R., SKOGERBOE, G. V., **Surface irrigation: theory and practice**. New Jersey: Prentice-Hall, 386p, 1987.

WU, D.; XUE, J.; BO, X.; MENG, W.; WU, Y.; DU, T. Simulation of irrigation uniformity and optimization of irrigation technical in the sirmod model under

MÉTODOS DE INFILTRAÇÃO DE ÁGUA NO SOLO PARA DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO POR SULCOS

alternate furrow irrigation. **Irrigation and Drainage**, v. 66, p. 478-491, 2017. ZWIRTES, A. L.; SPOHR, R. B.; BARONIO, C. A.; MENEGOL, D. R.; ROSA, G. M.; MORAES, M. T. Utilização do infiltrômetro

de cornell e dos anéis concêntricos para determinação da infiltração de água em um latossolo vermelho. **Semina: Ciências Agrária**, v. 34, n. 6, p. 3489-3500, 2013.