



Difusividade e condutividade hidráulica não saturada de substratos

Beatriz S. Conceição¹, Luiz A. Lima², José A. do V. Sant'Ana³,
Elio L. da Silva⁴ & Rafaella R. Andrade⁵

¹ DEA/UFV, Viçosa, MG. E-mail: biasantos1@hotmail.com (Autor correspondente)

² DE/UFLA, Lavras, MG. E-mail: lalima@deg.ufla.br

³ DE/UFLA, Lavras, MG. E-mail: zinhojaves@yahoo.com.br

⁴ DE/UFLA, Lavras, MG. E-mail: elemos@deg.ufla.br

⁵ DE/UFLA, Lavras, MG. E-mail: rafaella_resende2@hotmail.com

Palavras-chave:

processos hidráulicos
fluxo
movimento de água

RESUMO

A quantificação dos processos hidráulicos que ocorrem dentro do recipiente durante e entre irrigações, é essencial para a gestão eficaz da irrigação e adubação em substratos. Os testes foram feitos no laboratório de hidráulica da Universidade Federal de Lavras com o objetivo de determinar a condutividade hidráulica não saturada de substratos usando-se o método proposto por Bruce & Klute (1956) em seis substratos (S1, S2, S3, S4, S5 e S6) com quatro repetições. Foram realizados ensaios de fluxo horizontal visando estimar a difusividade e, por seu meio, a condutividade hidráulica não saturada ($K(\theta)$). A taxa com que a umidade avança no espaço e no tempo ocorre de maneira diferenciada entre os substratos avaliados destacando-se os substratos S5 (casca de pinus, vermiculita e turfa) e S2 (cinza, turfa e outros materiais), que tiveram menor e maior difusividade, respectivamente. Após o aumento da tensão ocorre uma nítida diminuição da $K(\theta)$, especialmente no substrato S3 (casca de pinus e terra vegetal) enquanto para o substrato S5 os valores foram tão pequenos que não se destacam dentre os demais. A condutividade hidráulica não saturada aumenta com o aumento da umidade, de forma exponencial.

Key words:

hydraulic processes
flow
water movement

Diffusivity and hydraulic conductivity of unsaturated substrates

ABSTRACT

Quantification of hydraulic processes that occur in small plastic containers used for seedlings, during and between irrigations, is essential for effective management of irrigation and fertilization on substrates. Tests were carried at the Hydraulics Laboratory of the Federal University of Lavras, with the objective of determining the hydraulic conductivity of partially saturated substrates, using the method proposed by Bruce & Klute (1956), on six substrates (S1, S2, S3, S4, S5 e S6) with four replications. Flow tests were conducted to estimate the horizontal diffusivity and, through this, the unsaturated hydraulic conductivity ($K(\theta)$). The rate at which the moisture expands in space and time occurs differently among substrates, especially substrates S5 (pine bark, vermiculite and peat) and S2 (ash, peat and other materials), which had lower and higher diffusivity, respectively. There is a sharp decrease in $K(\theta)$ after increasing tension, especially on the substrate S3 (pine bark and topsoil), while for the substrate S5 values were so small that they do not stand out among others. The unsaturated hydraulic conductivity increases exponentially with increasing in water content.

INTRODUÇÃO

Existem diferentes tipos de substratos que, de forma isolada ou em mistura, podem ser utilizados na produção em recipiente. Um substrato agrícola deve reter água sem diminuir a disponibilidade de oxigênio para as raízes a fim de possibilitar o crescimento e a atividade do sistema radicular de plantas, entre outras propriedades físicas e químicas (Paulus & Paulus, 2007; Girardi et al., 2012).

Segundo Barreto et al. (2012) as premissas válidas em física de solos são parcialmente aplicáveis para substratos. As propriedades hidráulicas do substrato se modificam com as particularidades das partículas, com o seu conteúdo de água e com sua geometria porosa.

Muitos autores têm procurado estabelecer modelos matemáticos para estimar as propriedades hidráulicas dos meios porosos, a partir de outros modelos mais facilmente mensuráveis (Mualem, 1976; Genuchten, 1980; Prevedello & Loyola, 2005).

A teoria proposta por Mualem (1976) conduz a uma fórmula de integração capaz de gerar uma série de equações analíticas (modelos) para expressar as principais propriedades hidráulicas de meios porosos desde que a curva de retenção do meio poroso de interesse possa ser expressa analiticamente.

Em geral, os modelos resultantes contêm parâmetros independentes passíveis de serem obtidos a partir do modelo matemático adotado para ajustar a curva de retenção aos dados experimentais. A complexidade dos modelos gerados

para expressar as propriedades hidráulicas de meios porosos pela teoria de Mualem (1976) é fortemente dependente da complexidade do modelo analítico adotado para expressar a curva de retenção.

Raviv et al. (1999) ressaltam que mudanças significativas na condutividade hidráulica, no fluxo de água e nutrientes, são previstas entre irrigações, mesmo que o conteúdo de água seja mantido dentro do que é denominado água facilmente disponível. Em seu trabalho, os autores sugerem que a condutividade hidráulica do meio não saturado indica, com maior precisão, a disponibilidade de água às raízes do que mesmo a água facilmente disponível.

Wallach & Shabtai (1992) determinaram a função $K(h)$ (condutividade hidráulica em função do potencial matricial h) para compostagem de bagaço de uvas e sua mistura com turfa e observaram que alterações significativas em $K(h)$ são esperadas entre irrigações mesmo se a umidade for mantida dentro da faixa de tensão que é definida na literatura entre 1 a 5 kPa.

Caron & Elrick (2005) constataram que a condutividade hidráulica para substrato varia com o potencial de água no seu interior e que, com valores de umidade próximos à saturação, ocorre elevação acentuada da condutividade hidráulica. Esses autores ressaltam que o uso de substrato com partículas de granulometrias finas também contribui para este fenômeno. A facilidade ao molhamento deve ser atribuída sobretudo ao tamanho ou granulometria das partículas (Michel et al., 2008).

A condutividade hidráulica insaturada pode ser descrita como função $K(\theta)$, em que θ representa a umidade volumétrica do solo (Vieira & Klein, 2007). Aliado ao conhecimento da difusividade $D(\theta)$ que se refere à facilidade com que a umidade avança no espaço e no tempo, o conhecimento de $K(\theta)$ oferece o embasamento necessário à previsão de absorção de água pelas plantas.

A difusividade hidráulica da água é uma das funções mais importantes a ser determinada sendo, portanto, imprescindível na previsão da absorção de água pelas plantas estando relacionada com a evaporação de água. Diante deste contexto o objetivo com este trabalho foi determinar a condutividade hidráulica não saturada de diferentes substratos através do método proposto por Bruce & Klute (1956).

MATERIAL E MÉTODOS

Este experimento foi conduzido no Laboratório de Relação Água-Solo-Planta do setor de Engenharia de Água e Solo da

UFLA utilizando-se seis substratos comerciais denominados no estudo S1, S2, S3, S4, S5 e S6. A composição dos substratos se encontra na Tabela 1, na qual se percebe que o substrato S1 é composto de várias misturas enquanto os demais são constituídos por dois a três componentes.

A difusividade da água no solo foi determinada usando-se o método proposto por Bruce & Klute (1956).

O avanço da frente de umedecimento foi observado em uma coluna horizontal (Figura 1) que se constitui de um tubo de acrílico segmentado em anéis cilíndricos sendo que os sete primeiros anéis eram de 2 cm de comprimento, os cinco posteriores de 1 cm, mais dois subsequentes de 0,5 cm de comprimento e o último anel de 2 cm de comprimento, apenas para suporte porém com 20 cm expostos à infiltração e efetivamente considerados constituindo-se em um total de 22 cm de comprimento de coluna. O diâmetro interno da coluna foi de 41,5 mm, sendo 3,3 mm a espessura da sua parede.

Esses anéis foram montados em conjunto com fita adesiva cobrindo cerca da metade do perímetro dos anéis. Preencheu-se a coluna em camadas com quantidade de substrato igual à do volume do respectivo anel para garantir maior uniformidade de compactação e homogeneidade em toda a coluna.

Na extremidade inicial da coluna colocou-se uma placa porosa em contato com a superfície livre do substrato, conectada a uma adaptação, similar à bureta de mariotte por onde se obteve um conteúdo de água θ_i próximo à saturação em $x = 0$ mantendo-se a entrada com pressão ligeiramente negativa com uma carga constante de - 2,0 cm do centro da coluna.

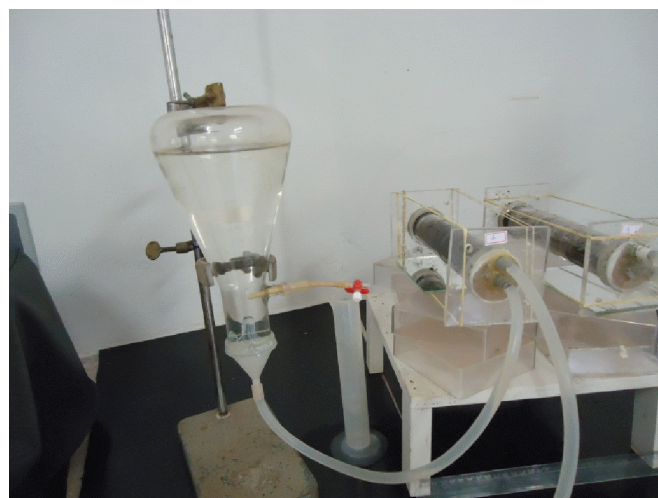


Figura 1. Equipamento usado no ensaio de infiltração horizontal

Tabela 1. Composição dos materiais utilizados na formulação de substratos

Substrato	Composição (%)											
	Cp	Es	Sg	Fc	Vm	Ge	Ca	Cz	Tv	Cv	Tf	Outros materiais
S ₁	30	7	3	30	10	4	16					
S ₂								20			40	40
S ₃	70								30			
S ₄	75				25							
S ₅	60				30						10	
S ₆	60			20						20		

S1 (Cp - Casca de pinus, Es - esterco, Sg - serragem, Fc - fibra de coco, Vm - vermiculita, Ge - gesso e Ca - casca de arroz), S2 (Cz - cinza, Tf - turfa e outros materiais derivados da mistura formada pela decomposição de restos vegetais), S3 (Cp - casca de pinus e Tv - terra vegetal), S4 (Cp - casca de pinus e Vm - vermiculita), S5 (Cp - casca de pinus, Vm - vermiculita e Tf - turfa) e S6 (Cp - casca de pinus, Fc - fibra de coco e Cv - carvão vegetal)

O intervalo de tempo foi medido desde o início do contato da coluna com a placa porosa até que o fluxo alcançasse a linha de segmento de cada anel cronometrando o tempo em que a frente de umedecimento alcançasse cada anel e o tempo acumulado até o final da coluna. O fornecimento de água na superfície de contato foi interrompido ao chegar aos 20 cm, a torneira de passagem de água foi fechada e a coluna de substrato de cada anel foi seccionada em 15 partes com o auxílio de um estilete (Figura 2). A umidade de cada anel foi determinada pelo método gravimétrico. Foram realizados 24 testes distintos, ou seja, quatro repetições para cada substrato.

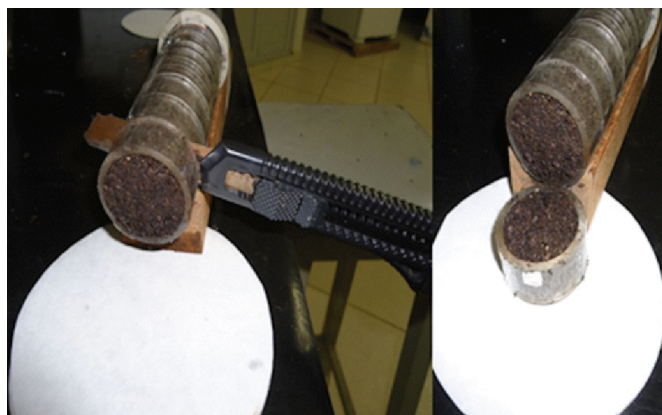


Figura 2. Seccionamento da coluna de substrato usada no ensaio de infiltração horizontal

A difusividade é função da distância e do tempo e pode ser obtida com a integração e derivação de duas funções; sua representação gráfica é dada pela umidade em função da variável de Boltzmann (Klute & Dirksen, 1986), $\lambda(x t^{1/2})$ em que lambda é dependente da distância e do tempo, razão desta incoerência em estabelecer uma função direta de lambda em função da umidade.

Observa-se, com isto, que não existe função matemática que ilustre, de forma adequada, o comportamento das duas variáveis que possam ser diretamente usadas na determinação da difusividade hidráulica e ainda que os métodos para determinar a difusividade hidráulica foram desenvolvidos para solo não havendo informações para substratos.

Neste trabalho se propõe empregar uma equação similar à equação de Genuchten para retenção de água, já que as curvas de $\theta \times \lambda$ se assemelham ao formato de curvas de retenção $\theta \times h$ permitindo que a derivada e a integral da função $\theta(\lambda)$ possam ser determinadas analiticamente.

Estabeleceu-se, assim, o mesmo modelo de ajuste para todos os substratos estudados, como:

$$\theta(\lambda) = \theta_d + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (a\lambda)^b]^b} \quad (1)$$

em que:

- λ - variável de Boltzmann ($\lambda(x t^{1/2})$) com lambda dependente da distância e do tempo)
- θ - umidade volumétrica, $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$

- θ_r - umidade residual, $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$
- θ_s - umidade de saturação, $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$
- θ_d - umidade higroscópica ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) dependente de θ_r
- a e b - parâmetros de ajuste

Os indicativos estatísticos MEA (média dos erros), RMSE (raiz quadrada da média dos quadrados dos erros) e “d” (índice de concordância de Willmott) foram utilizados na avaliação do modelo abordado além do cálculo da eficiência do modelo proposto; eles foram obtidos pelas equações abaixo relacionadas:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - E_i)^2} \quad (2)$$

$$\text{MEA} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - E_i)^2 \quad (3)$$

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|E_i - \bar{O}| + |O_i + \bar{O}|)^2} \right] \quad (4)$$

$$E_r = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^n (O_i - E_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \right] \quad (5)$$

em que:

- E_r - eficiência do modelo
- n - número de dados
- O_i - valor observado
- \bar{O} - média do valor estimado
- E_i - valor estimado

Para determinar a difusividade foi preciso plotar o gráfico $\theta(\lambda)$ e determinar, para diferentes valores de θ , a integral e a derivada da curva apresentada (Figura 3).

Conhecida a distribuição de θ vs λ (Figura 3) é possível notar que a área sob a curva representa o total de água acumulada

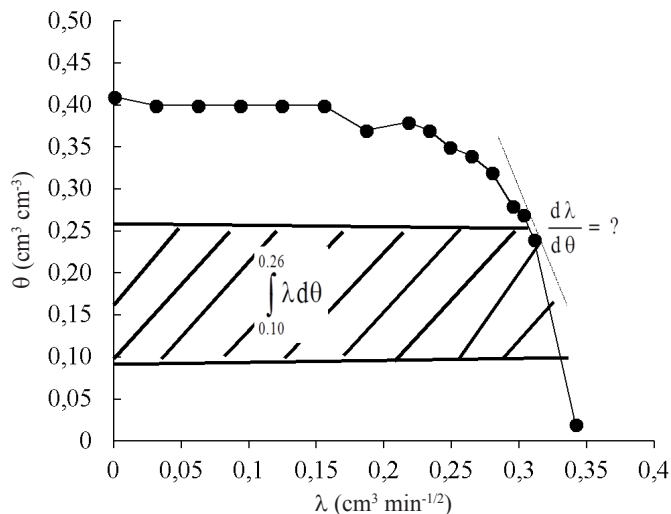


Figura 3. Curva da distribuição do teor de água e a variável de Boltzmann $\lambda(x t^{1/2})$ de um ensaio de infiltração horizontal do substrato S5

por unidade de área até o tempo t ; assim, a lâmina acumulada (I) pode ser obtida por meio do cálculo da área abaixo da curva limitada, por θ_0 e θ_s (Eq. 6).

$$I = \int_{\theta_0}^{\theta_s} \lambda(\theta) t^{1/2} d\theta \quad (6)$$

Sendo $\lambda(\theta)$ único para cada solo; Philip (1955) apresentou o termo sortividade (capacidade de absorver líquido por capilaridade) conforme dado pela Eq. 7.

$$S = \int_{\theta_0}^{\theta_s} \lambda(\theta) d\theta \quad (7)$$

em que S é a sortividade, grandeza relacionada com a capacidade de o solo homogêneo absorver água na ausência dos efeitos gravitacionais, em $\text{cm s}^{1/2}$.

Assim, determinou-se, por meio da Eq. 8, a difusividade para pequenos incrementos de umidade.

$$D(\theta) = -\frac{1}{2} \left(\frac{d\lambda}{d\theta} \right) \int_{\theta_0}^{\theta_s} \lambda d\theta \quad (8)$$

em que:

- D - difusividade
- λ - transformação de Boltzmann
- θ - umidade com base em volume

Por meio do modelo proposto (Eq. 1) realizaram-se as operações de derivação necessárias para o cálculo da difusividade, conforme equações abaixo.

$$\frac{d\lambda}{d\theta} = -\frac{1}{a b^2} \left[\left(\frac{\theta_s - \theta_r}{\theta - \theta_d} \right)^{\frac{1}{b}} - 1 \right]^{\frac{1}{b}-1} \left[\frac{(\theta_s - \theta_r)^{\frac{1}{b}}}{(\theta - \theta_d)^{\frac{1}{b}+1}} \right] \quad (9)$$

em que:

- θ - umidade com base em volume
- λ - transformação de Boltzmann
- a e b - parâmetros de ajuste
- θ_d - parâmetro dependente de θ_r , equivalente à relação proposta, $\theta_d = \theta_r/1,5$

Assumindo a expressão da $D(\theta)$ relacionada com a sortividade S (Reichardt et al., 1972) calculou-se a integral necessária para determinar a difusividade (Eq. 8) por meio da sortividade (Eq. 7) relacionando-a com área abaixo da curva λ vs θ (Figura 3).

De posse desses valores empregou-se a Eq. 8, visando obter a difusividade para pequenos incrementos de umidade possibilitando gerar uma série bem mais completa de dados. Ressalta-se que para o cálculo da área abaixo da curva (integral) foi utilizado como limite inferior $0,02 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ para todos os substratos avaliados.

Com os valores da difusividade e o conhecimento da curva de retenção (Tabela 2) determinou-se a condutividade hidráulica não saturada dos seis substratos estudados (Eq. 10).

$$K(\theta) = \frac{D(\theta)}{\frac{\partial h}{\partial \theta}} \quad (10)$$

em que:

$\partial h/\partial \theta$ - declividade da curva de retenção (θ_r, h_r), (capacidade hídrica)

Tabela 2. Parâmetros de ajuste do modelo de Genuchten (1980), para os diferentes substratos estudados

Substratos	α	n	m	θ_s	θ_r	R^2
S1	0,205	1,720	0,419	0,710	0,278	0,993
S2	0,082	1,722	0,419	0,660	0,312	0,994
S3	0,118	1,507	0,337	0,590	0,287	0,992
S4	0,138	1,750	0,429	0,720	0,360	0,999
S5	0,108	2,192	0,544	0,730	0,360	0,992
S6	0,072	2,634	0,620	0,730	0,360	0,993

O ajuste dos dados de difusividade hidráulica em função da umidade volumétrica (θ) para os diferentes substratos estudados foi realizado a partir da equação abaixo:

$$D = a\theta^z \quad (11)$$

em que:

- θ - umidade com base em volume
- a e z - parâmetros de ajuste

E a capacidade hídrica dos substratos obtida pela tangente à curva de retenção no ponto (derivada $d\theta/dh$) por meio da Eq. 12.

$$\frac{\partial \theta}{\partial h} = \frac{mn \alpha^n (\theta_r - \theta_s) h^{n-1}}{[1 + (\alpha h)^n]^{m+1}} \quad (12)$$

em que:

- h - sucção (modulo do potencial matricial)
- θ - umidade volumétrica
- α, m e n - parâmetros da equação de Genuchten (1980)

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Observam-se, na Figura 4, os dados do avanço da frente de molhamento com a raiz quadrada do tempo. É possível notar que a infiltração se inicia rapidamente e diminui com a raiz quadrada do tempo, ou seja, quanto menor o coeficiente angular mais lento é o movimento de água no substrato.

Verifica-se que no substrato S_2 não foram observados sinais de dificuldade de molhamento, principalmente quando se constatou que a velocidade do avanço da frente de molhamento

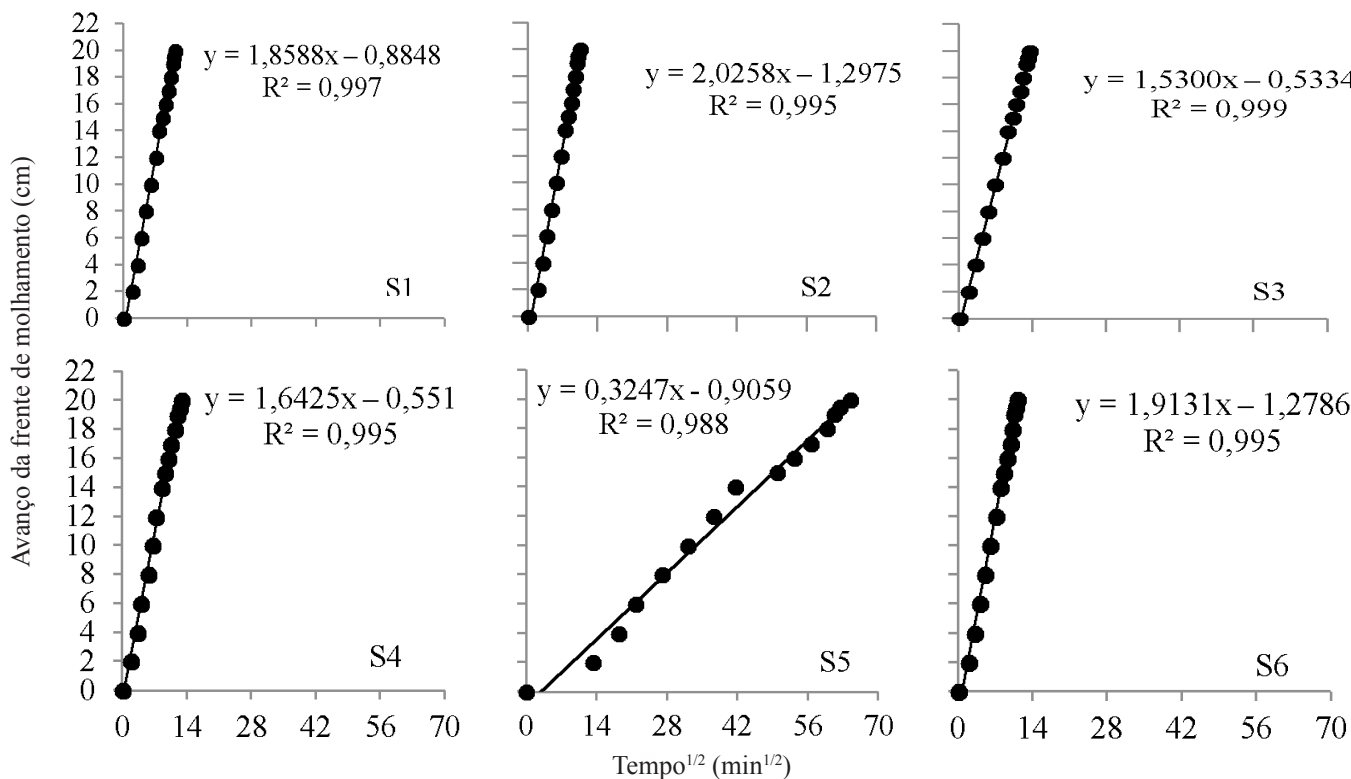


Figura 4. Avanço da frente de umedecimento em função da raiz quadrada do tempo observado durante o ensaio de infiltração horizontal dos substratos estudados. S1 (Casca de pinus, esterco, serragem, fibra de coco, vermiculita, gesso e casca de arroz), S2 (cinza, turfa e outros materiais derivados da mistura formada pela decomposição de restos vegetais), S3 (casca de pinus e terra vegetal), S4 (casca de pinus e vermiculita), S5 (casca de pinus, vermiculita e turfa) e S6 (casca de pinus, fibra de coco e carvão vegetal)

avançou mais rapidamente e aos 108,7 min a frente de molhamento atingiu o final da coluna.

Por outro lado, no substrato S₅ a frente de molhamento foi mais lenta chegando a 4.144,00 min, os baixos valores de umidade podem comprometer a eficiência de molhamento o que se deve, provavelmente, à mistura de vermiculita com turfa. Este efeito pode ser explicado com base nos relatos de Miner (1994) em que a adição de areia fina (< 1 mm) em turfa promoveu diminuição da capacidade de aeração.

Barreto et al. (2012) relatam, trabalhando com ascensão capilar de água em substrato de coco e de pinus, que no substrato grosseiro de pinus umedecido a frente de molhamento não foi efetiva em toda coluna de substrato e complementa afirmando que o substrato grosseiro de pinus não tem propriedades físicas capazes de conduzir água por uma coluna de substrato de 10 cm de altura.

Os demais substratos apresentaram valores de velocidade do avanço da frente de umedecimento intermediários nos quais está refletida a influência combinada das misturas que fazem parte da sua composição.

Os ajustes do modelo proposto cujos coeficientes de determinação são altos, sinalizam que o modelo proposto (Eq. 1) descreve relativamente bem os dados observados (Tabela 3).

Este procedimento permitiu melhor ajuste dos dados experimentais para pequenos incrementos de umidade em função de lambda, principalmente os mais próximos à umidade residual resultando em uma correlação mais completa dos dados

Tabela 3. Ajuste do modelo proposto aos dados de umidade volumétrica (θ) em função de lambda (λ) para os diferentes substratos estudados

Substratos	Modelo	R ²
S1	$\theta = 0,108 + (0,303) \left[\frac{1}{1 + (0,452 \times \lambda)^{11,659}} \right]^{11,659}$	0,995
S2	$\theta = 0,086 + (0,351) \left[\frac{1}{1 + (0,329 \times \lambda)^{6,241}} \right]^{6,241}$	0,998
S3	$\theta = 0,086 + (0,371) \left[\frac{1}{1 + (0,307 \times \lambda)^{3,081}} \right]^{3,081}$	0,999
S4	$\theta = 0,077 + (0,364) \left[\frac{1}{1 + (0,358 \times \lambda)^{4,303}} \right]^{4,303}$	0,999
S5	$\theta = 0,127 + (0,275) \left[\frac{1}{1 + (2,427 \times \lambda)^{7,435}} \right]^{7,435}$	0,999
S6	$\theta = 0,066 + (0,44) \left[\frac{1}{1 + (0,383 \times \lambda)^{7,212}} \right]^{7,212}$	0,998

S1 (Casca de pinus, esterco, serragem, fibra de coco, vermiculita, gesso e casca de arroz), S2 (cinza, turfa e outros materiais derivados da mistura formada pela decomposição de restos vegetais), S3 (casca de pinus e terra vegetal), S4 (casca de pinus e vermiculita), S5 (casca de pinus, vermiculita e turfa) e S6 (casca de pinus, fibra de coco e carvão vegetal)

estimados e observados facilitando a obtenção da inclinação da reta tangente à curva por meio da derivada da função.

Na Tabela 4 é apresentada a avaliação do modelo proposto (Eq. 1) para ajustar os dados experimentais para pequenos incrementos de umidade em função de lambda, por meio da

Tabela 4. Dados estatísticos obtidos para a validação do modelo utilizado para ajustar aos dados experimentais

Substratos	RMSE	MEA	D	E	R ²
S1	1,19.10 ⁻²	1,42.10 ⁻⁴	9,97.10 ⁻¹	9,88.10 ⁻¹	0,995
S2	7,91.10 ⁻³	6,25.10 ⁻⁵	9,99.10 ⁻¹	9,99.10 ⁻¹	0,998
S3	5,91.10 ⁻³	3,50.10 ⁻⁵	9,97.10 ⁻¹	9,99.10 ⁻¹	0,999
S4	3,75.10 ⁻³	1,41.10 ⁻⁵	9,98.10 ⁻¹	9,99.10 ⁻¹	0,999
S5	7,69.10 ⁻³	5,92.10 ⁻⁵	9,87.10 ⁻¹	9,99.10 ⁻¹	0,999
S6	9,41.10 ⁻³	8,85.10 ⁻⁵	9,97.10 ⁻¹	9,88.10 ⁻¹	0,998

S1 (Casca de pinus, esterco, serragem, fibra de coco, vermiculita, gesso e casca de arroz), S2 (cinza, turfa e outros materiais derivados da mistura formada pela decomposição de restos vegetais), S3 (casca de pinus e terra vegetal), S4 (casca de pinus e vermiculita), S5 (casca de pinus, vermiculita e turfa) e S6 (casca de pinus, fibra de coco e carvão vegetal)

raiz quadrada da média dos quadrados dos erros (RMSE), da média dos erros (MEA), do índice de concordância (d) e da eficiência do modelo (E).

Em geral, os substratos apresentaram valores para o índice de concordância e eficiência do modelo proposto igual ou próximo à unidade (1,00) o que sinaliza o bom desempenho do modelo, sendo o mesmo comprovado pelos altos valores do coeficiente de determinação da regressão (todos acima de 99%), pela RMSE e MEA uma vez que, quanto menores os valores absolutos de RMSE e MEA melhor o ajuste do modelo (Tabela 4).

O comportamento dos valores médios de difusividade é apresentado na Figura 5. É possível observar que a difusividade aumenta expressivamente com a umidade do substrato sendo que a habilidade com que a umidade avança no espaço e no tempo ocorre de maneira diferenciada entre os substratos avaliados destacando-se os substratos S5 e S2, que tiveram menor e maior difusividade, respectivamente.

Os dados dos ajustes da difusividade hidráulica em função da umidade volumétrica (θ) são apresentados na Tabela 5, cujos coeficientes de determinação foram altos.

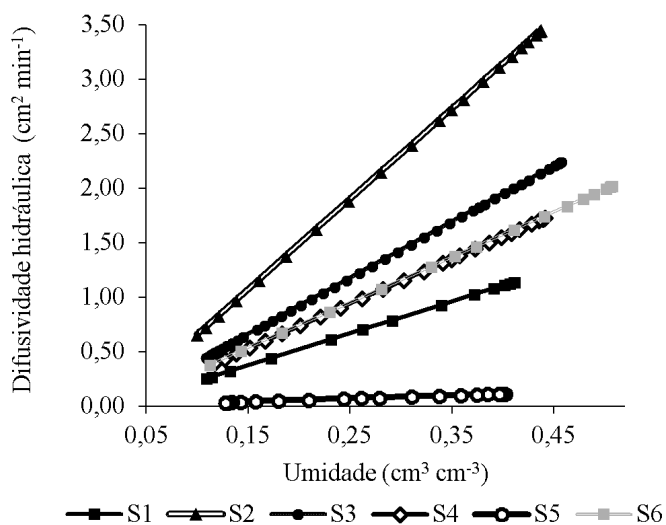


Figura 5. Difusividade dos substratos estudados. S1 (Casca de pinus, esterco, serragem, fibra de coco, vermiculita, gesso e casca de arroz), S2 (cinza, turfa e outros materiais derivados da mistura formada pela decomposição de restos vegetais), S3 (casca de pinus e terra vegetal), S4 (casca de pinus e vermiculita), S5 (casca de pinus, vermiculita e turfa) e S6 (casca de pinus, fibra de coco e carvão vegetal)

Tabela 5. Dados obtidos dos Ajustes dos dados de difusividade hidráulica (D) em função da umidade volumétrica (θ) para os diferentes substratos estudados

Substratos	Modelo	R ²
S1	$D = 3,0206 \times \theta^{1,0904}$	0,999
S2	$D = 8,5230 \times \theta^{1,0871}$	0,999
S3	$D = 5,2566 \times \theta^{1,0796}$	0,999
S4	$D = 4,1997 \times \theta^{1,0813}$	0,999
S5	$D = 0,2954 \times \theta^{0,9999}$	0,999
S6	$D = 4,1846 \times \theta^{1,0658}$	0,999

S1 (Casca de pinus, esterco, serragem, fibra de coco, vermiculita, gesso e casca de arroz), S2 (cinza, turfa e outros materiais derivados da mistura formada pela decomposição de restos vegetais), S3 (casca de pinus e terra vegetal), S4 (casca de pinus e vermiculita), S5 (casca de pinus, vermiculita e turfa) e S6 (casca de pinus, fibra de coco e carvão vegetal)

De acordo com Michel et al. (2008), a facilidade ao molhamento deve ser atribuída principalmente ao tamanho ou granulometria das partículas. O substrato S2 apresenta estrutura diferenciada dos demais por ser uma terra preparada com composto orgânico vegetal, que exerce influência nas suas propriedades físicas, químicas e biológicas, uma mistura de materiais orgânicos que é indicado também para enriquecer o solo com nutrientes e proporciona condicionamento estrutural.

Conforme Barreto et al. (2012), a natureza dos substratos determina diferenças nos processos de molhamento e secagem. Os substratos (S1, S4 e S5), que apresentaram menores valores de difusividade para uma mesma umidade foram os que contêm a vermiculita em sua composição, um mineral com a estrutura da mica que é expandida em fornos de alta temperatura, capaz de reter 4 a 5 vezes seu peso em água é muito utilizada em substrato devido à sua alta retenção de água (Melo et al., 2006) e tal ocorrência ficou expressiva no substrato S5 que, além da vermiculita, apresenta também turfa na sua composição, material com alta capacidade de retenção de água e alta porosidade interna.

O comportamento da condutividade hidráulica não saturada é apresentado na Figura 6. Nota-se que a condutividade hidráulica não saturada aumenta expressivamente com a umidade do substrato, porém de forma não linear, associada a uma relação exponencial, descrita em diversos estudos: tais como Orozco & Marfa (1995) e Raviv et al. (2002), entre outros. Esta característica pode significar enorme efeito sobre a dinâmica de água e sua disponibilidade para plantas cultivadas em recipiente, já que a disponibilidade de água depende do fluxo de água, que é afetado principalmente pelo valor da condutividade hidráulica.

O máximo valor da condutividade hidráulica foi obtido do substrato S3 correspondendo a 0,00559 cm min⁻¹ para um valor de umidade volumétrica de 0,457 cm³ cm⁻³. Este resultado é similar aos encontrados por Londra (2010), trabalhando com a determinação da condutividade hidráulica insaturada de cinco substratos.

A comparação dos dados experimentais entre os substratos revela que, para o conteúdo de água, a condutividade hidráulica do substrato S5 foi menor, provavelmente devido ao menor raio médio dos poros. Esses resultados são de importância

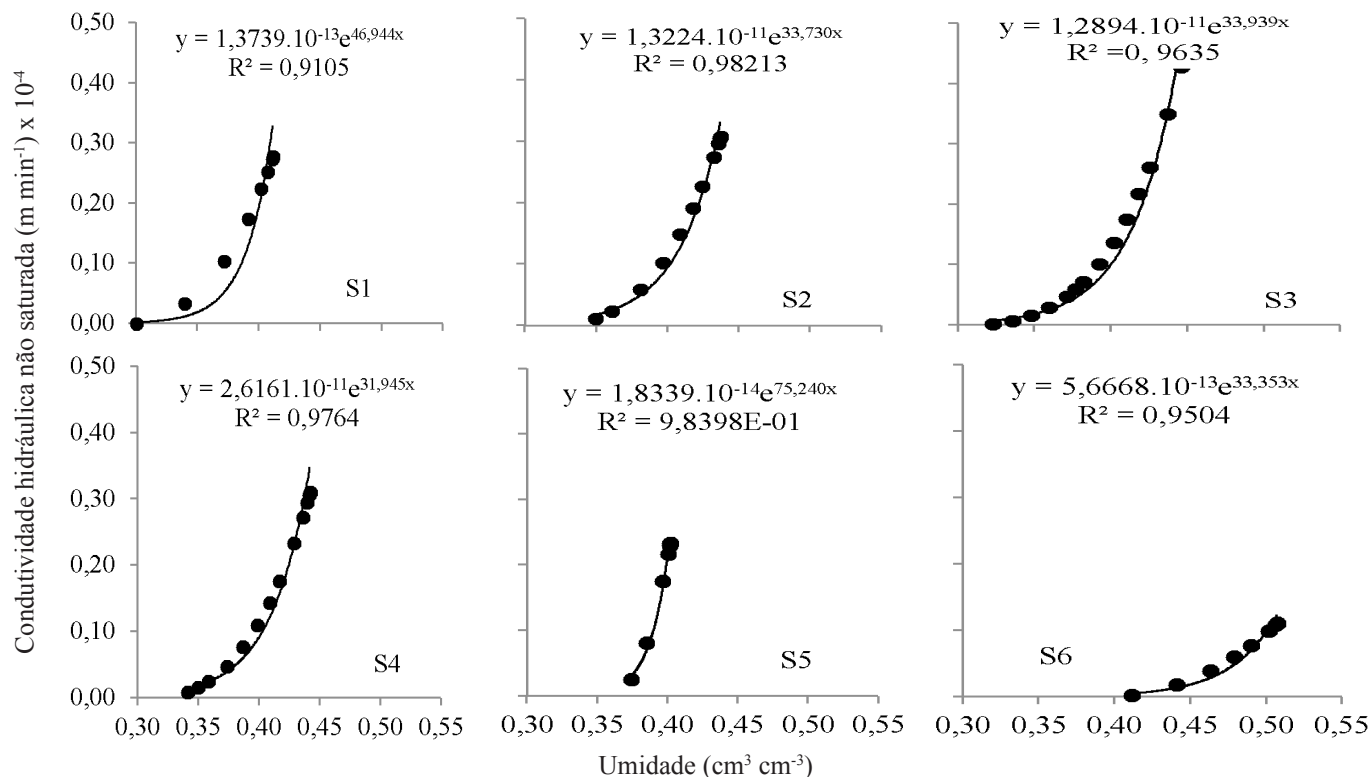


Figura 6. Condutividade hidráulica não saturada para os substratos estudados. S1 (Casca de pinus, esterco, serragem, fibra de coco, vermiculita, gesso e casca de arroz), S2 (cinza, turfa e outros materiais derivados da mistura formada pela decomposição de restos vegetais), S3 (casca de pinus e terra vegetal), S4 (casca de pinus e vermiculita), S5 (casca de pinus, vermiculita e turfa) e S6 (casca de pinus, fibra de coco e carvão vegetal)

fundamental pois, segundo a lei de Darcy, a condutividade hidráulica é função do teor de água no substrato e a mesma é dependente da geometria dos poros e das propriedades do fluido. Com a redução da umidade o movimento de água passa para poros menores e o caminho é mais tortuoso, diminuindo a condutividade hidráulica.

Ao analisar a Figura 7 nota-se que todos os substratos avaliados, com exceção do substrato S5, apresentaram decréscimo acentuado na condutividade hidráulica inicialmente elevado.

De acordo com Raviv et al. (2002), este decréscimo é esperado em substrato que têm elevada porcentagem de poros grandes, principalmente quando se diminui a saturação. Uma parte dos poros torna-se cheia de ar, de modo que o orifício condutor de água diminui, e os maiores poros se tornam não condutores.

Observa-se na Figura 7 que a condutividade hidráulica varia com o potencial de água no interior do substrato. Ocorre uma nítida diminuição do valor $K(\theta)$ após o aumento da tensão, especialmente no substrato S3 enquanto para o substrato S5 os valores foram tão pequenos que não se destacam entre os demais. Caron & Elrick (2005) afirmam que o uso de substratos com partículas de granulometrias finas também contribuiu para este fenômeno. Tal decréscimo se torna menos acentuado a partir da tensão 50 hPa. Comportamento similar foi encontrado por Caron & Elrick (2005), Londra (2010) e Raviv et al. (2002).

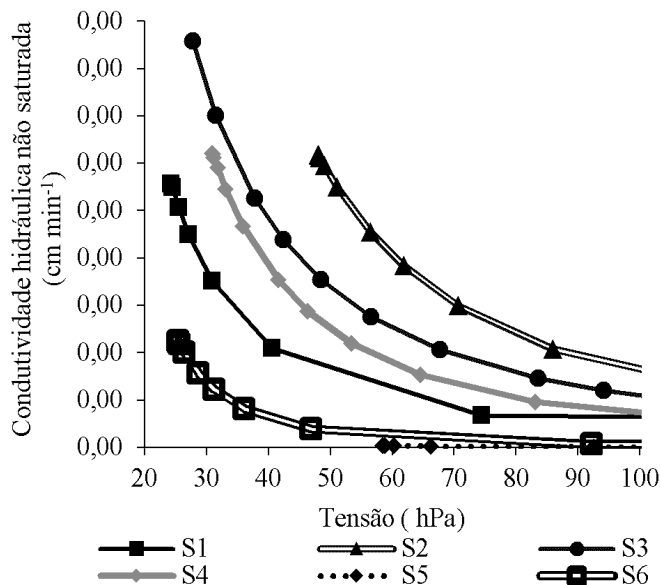


Figura 7. Condutividade hidráulica não saturada (cm min⁻¹) em função do potencial matricial (hPa) para os diferentes substratos estudados. S1 (Casca de pinus, esterco, serragem, fibra de coco, vermiculita, gesso e casca de arroz), S2 (cinza, turfa e outros materiais derivados da mistura formada pela decomposição de restos vegetais), S3 (casca de pinus e terra vegetal), S4 (casca de pinus e vermiculita), S5 (casca de pinus, vermiculita e turfa) e S6 (casca de pinus, fibra de coco e carvão vegetal)

CONCLUSÕES

1. A determinação de $d\theta/d\lambda$ e da sortividade pode ser realizada analiticamente, a partir do modelo matemático proposto.

2. Ocorre uma nítida diminuição na condutividade hidráulica não saturada após o aumento da tensão especialmente no substrato S3 (casca de pinus e terra vegetal) enquanto para o substrato S5 (casca de pinus, vermiculita e turfa) os valores foram tão pequenos que não se destacam entre os demais.

3. A condutividade hidráulica não saturada aumenta com o aumento da umidade de forma exponencial.

LITERATURA CITADA

- Barreto, C. V. G.; Testezlaf, R.; Salvador, C. A. Ascensão capilar de água em substratos de coco e de pinus. *Bragantia*, v.71, p.385-399, 2012.
- Bruce, R. R.; Klute, A. The measurement of soil moisture diffusivity. *Soil Science Society of America*, v.20, p.458-462, 1956.
- Caron, J.; Elrick, D. Measuring the unsaturated hydraulic conductivity of growing media with a tension disc. *Soil Science Society American Journal*, v.69, p.783-793, 2005.
- Genuchten, M. T. V. van. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society America Journal*, v.44, p.892-898, 1980.
- Girardi, L. B.; Peiter, M. X.; Bellé, R. A.; Backes, F. A.; Soares, F. C.; Valmorbidia, I. Disponibilidade hídrica e seus efeitos sobre o desenvolvimento radicular e a produção de gipsofila envasada em ambiente protegido. *Irriga*, v.17, p.501-509, 2012.
- Klute, A.; Dirksen, C. Hydraulic conductivity and diffusivity: laboratory methods. In: Klute, A. (ed.). *Methods of soil analysis: Part 1*. 2.ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986. p.687-732.
- Londra, P. A. Simultaneous determination of water retention curve and unsaturated hydraulic conductivity of substrates using a steady-state laboratory method. *HortScience*, v.45, p.1106-1112, 2010.
- Melo, G. W. B.; Bortolozzo, A. R.; Vargas, L. Produção de morangos no sistema semi-hidropônico. Bento Gonçalves: Embrapa Uva e Vinho, 2006. 24p.
- Michel, J. C.; Naasz, R.; Charpentier, S.; Morel, P.; Rivière, L. M.; Caron, J. Water repellency of organic growing media and its consequences on their hydraulic properties. *Acta Horticulturae*, v.779, p.121-129, 2008.
- Miner, J. A. *Substratos: Propiedades y caracterización*. Madrid: Mundi Press, 1994. 172p.
- Mualem, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, v.12, p.513-522, 1976.
- Orozco, R.; Marfa, O. Granulometric alteration, air entry potential and hydraulic conductivity in perlites used in soilless cultures. *Acta Horticulturae*, v.408, p.147-161, 1995.
- Paulus, D.; Paulus, E. Efeito de Substratos agrícola na produção de mudas de hortelã propagadas por estaquia. *Revista Horticultura Brasileira*, v.25, p.594-597, 2007.
- Philip, J. R. Numerical solution of equations of the diffusion type with diffusivity concentration-dependent. *Transactions of the Faraday Society*, v.51, p.885-892, 1955.
- Prevedello, C. L.; Loyola, J. M. T. Modelagem numérica para o processo da evaporação da água do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.29, p.669-675, 2005.
- Raviv, M.; Wallach, R.; Silber, A.; Medina, S.; Krasnovsky, A. Effect of hydraulic characteristics of volcanic materials on yield of roses grown in soilless culture. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, v.124, p.205-209, 1999.
- Raviv, M.; Wallach, R.; Silber, A.; Scher, B. T. *Substrates and their analysis: A agricultural research organization*. Wageningen: Department of Ornamental Horticulture, 2002. 77p.
- Reichardt, K. D.; Nielsen, D. R.; Biggar, J. W. Scaling of infiltration into homogeneous soils. *Soil Science Society of America*, v.36, p.240-245, 1972.
- Vieira, M. L.; Klein, V. A. Propriedades físico-hídricas de um Latossolo Vermelho submetido a diferentes sistemas de manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.31, p.1271-1280, 2007.
- Wallach, R.; Shabtai, R. Modeling surface runoff contamination by chemicals under transient water infiltration. *Journal of Hydrology*, v.132, p.263-281, 1992.