



**BEATRIZ SANTOS CONCEIÇÃO**

**DINÂMICA DE ÁGUA E POTÁSSIO EM  
SUBSTRATOS COMERCIAIS**

**LAVRAS-MG**

**2013**

**BEATRIZ SANTOS CONCEIÇÃO**

**DINÂMICA DE ÁGUA E POTÁSSIO EM SUBSTRATOS COMERCIAIS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas, para obtenção do título de Mestre.

**Orientador**

Dr. Luiz Antônio Lima

**Coorientador**

Dr. Elio Lemos da Silva

**LAVRAS-MG**

**2013**

**Ficha Catalográfica Elaborada pela Divisão de Processos Técnicos da  
Biblioteca da UFLA**

Conceição, Beatriz Santos.

Dinâmica de água e potássio em substratos comerciais / Beatriz Santos Conceição. – Lavras : UFLA, 2013.

92 p. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Lavras, 2013.

Orientador: Luiz Antônio Lima.

Bibliografia.

1 Sorção. 2. Granulometria. 3. Nutriente. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 627.52

**BEATRIZ SANTOS CONCEIÇÃO**

**DINÂMICA DE ÁGUA E POTÁSSIO EM SUBSTRATOS COMERCIAIS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas, para obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 20 de março de 2013.

Dr. Elio Lemos da Silva UFLA

Dr. Mozart Martins Ferreira UFLA

Dr. Luiz Antônio Lima

**Orientador**

Dr. Elio Lemos da Silva

**Coorientador**

**LAVRAS-MG**

**2013**

A Deus, por sua presença  
constante em minha vida, ao meu noivo  
Zinho, a minha mãe e irmã, por serem meu  
porto seguro.

**DEDICO**

## AGRADECIMENTOS

A Deus, sempre presente, iluminando os meus caminhos, por todas as bênçãos e realizações concedidas;

À minha família, pela força, apoio e ajuda que sempre me ofereceram nas horas de maiores dificuldades;

Ao meu companheiro, José Antônio, pelo incentivo apoio e carinho;

À Universidade Federal de Lavras (UFLA), em especial ao Programa de Pós-Graduação Recursos Hídrico em Sistemas Agrícolas, pela oportunidade de realização do curso;

À FAPEMIG, pela concessão da bolsa de estudos;

Ao Prof. Dr. Luiz Antônio Lima, pela orientação, pelos ensinamentos e confiança depositada em mim;

Aos Profs. Dr. Luiz Coutinho e Dr. Elio Lemos da Silva, pelos ensinamentos e ao Prof. Dr. Klaus Reichardt, pelas dicas ofertadas;

A todos que desenvolvem ou atuam em trabalhos no Laboratório de Hidráulica, em especial a Zinho, Raffaella e José Luiz ,pela cooperação;

Aos meninos e agregados da República Doutor Cana, Tiago, Antônio, Paulo, Janice, Anita, Tânia e Ariane, pela convivência e amizade;

Enfim, a todos aqueles que contribuíram de alguma forma para a conclusão desse trabalho.

## LISTA DE FIGURA

### CAPITULO 1

- Figura 1 Esquema do ensaio de infiltração horizontal..... 26
- Figura 2 Curva da distribuição do teor de umidade e a variável de Boltzmann..... 29

### CAPITULO 2

- Figura 1 Funis de placa porosa usados na determinação da curva de retenção..... 44
- Figura 2 Mesa com movimento horizontal..... 47

### CAPITULO 3

- Figura 1 Equipamento usado no ensaio de infiltração horizontal..... 71
- Figura 2 Seccionamento da coluna de acrílico usada no ensaio de infiltração horizontal..... 72

## LISTAS DE GRÁFICOS

### CAPITULO 2

Gráfico 1	Curvas características de retenção de água dos substratos..	52
Gráfico 2	Curva característica de retenção de água dos substratos....	53
Gráfico 3	Liberação de potássio dos substratos.....	57
Gráfico 4	Cinética de liberação de potássio dos substratos.....	58

### CAPITULO 3

Gráfico 1	Avanço da frente de umedecimento em função da raiz quadrada do tempo, observado durante o ensaio de infiltração horizontal dos substratos estudados.....	76
Gráfico 2	Curvas da distribuição do teor de umidade em função da variável de Boltzman do ensaio de infiltração horizontal para os substratos .....	78
Gráfico 3	Curvas da distribuição do teor de umidade em função da variável de Boltzman do ensaio de infiltração horizontal para os substratos .....	79
Gráfico 4	Difusividade dos substratos .....	83
Gráfico 5	Condutividade hidráulica não saturada dos substratos .....	86
Gráfico 6	Condutividade hidráulica não saturada em função do potencial matricial .....	86

## LISTA DE TABELAS

### CAPITULO 2

Tabela 1	Proporção (v/v) dos materiais utilizados na formulação de substratos.....	42
Tabela 2	Características químicas dos substratos.....	46
Tabela 3	Resumo da análise de variância com os quadrados médios de: Porosidade total (PT), Espaço aeração (EA), Água disponível (AD), Água facilmente disponível (AFD), Água tamponante (AT) e Água remanescente (AR) para os diferentes substratos avaliados.....	48
Tabela 4	Valores médios das propriedades físicas dos substratos.....	49
Tabela 5	Parâmetros de ajuste do modelo de Genuchten (1980), para os diferentes substratos estudados.....	50
Tabela 6	Resumo da análise de variância com os quadrados médios de distribuição das partículas dos substratos em tamanho de diâmetro.....	54
Tabela 7	Valores médios da distribuição do tamanho das partículas (%), dos substratos.....	54

### CAPITULO 3

Tabela 1	Ajuste do modelo proposto obtido da adaptação da fórmula de Genuchten (1980), aos dados de umidade volumétrica ( $\theta$ ) em função de lambda ( $\lambda$ ) para os diferentes substratos estudados. Lavras – MG, 2013.....	80
Tabela 2	Dados estatísticos obtidos para a validação da adaptação da fórmula Genuchten (1980) para ajustar aos dados experimentais.....	81
Tabela 3	Dados obtidos dos Ajustes dos dados de difusividade hidráulica (D) em função da umidade volumétrica ( $\theta$ ) para os diferentes substratos estudados. Lavras – MG, 2013.....	84

## LISTA DE SÍMBOLOS

AD	Água disponível ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ );
AFD	Água facilmente disponível ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ );
AR	Água remanescente ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ );
AT	Água tamponante ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ );
d	Diâmetro médio da abertura da peneira (mm);
D	Difusividade do substrato ( $\text{cm}^2 \text{ min}$ );
DMP	Diâmetro médio de partículas (mm);
EA	Espaço aeração ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ );
$E_i$	Valor estimado;
$E_f$	Eficiência do modelo;
h	Potencial mátrico ( $\text{cm c a}$ );
K	Condutividade hidráulica não saturada ( $\text{cm s}^{-1}$ );
$K_0$	Condutividade hidráulica saturada ( $\text{cm s}^{-1}$ );
$K_t$	Quantidade de potássio liberado no tempo t ( $\text{mg kg}^{-1}$ );
$K_\alpha$	Potássio acumulado liberado até 121 horas ( $\text{mg kg}^{-1}$ );
m e n	Parâmetro da equação de Van Genuchten;
n	Número de dados;
n	Material retido na peneira (%);
$\bar{O}$	Média do valor estimado;
$O_i$	Valor observado;
$P_t$	Porosidade total (%);
Q	Densidade de fluxo de água ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-2} \text{ seg}$ );
t	Tempo de avanço da frente de umedecimento (min) ;
x	Distância horizontal (cm);
$\theta$	Umidade volumétrica ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ );
$\theta_i$	Umidade inicial ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ );
$\theta_r$	Umidade residual ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ );
$\theta_s$	Umidade de saturação ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ );
$\alpha$	Parâmetro da equação de Genutchen;
$\rho_g$	Densidade global ( $\text{g cm}^{-3}$ ) ;
$\rho_p$	Densidade de partículas ( $\text{g cm}^{-3}$ );
$\lambda$	Lambda, variável de Boltzmann ( $\text{cm min}^{-1/2}$ );
$\frac{\partial \Psi}{\partial x}$	Gradiente de potencial ( $\text{cm cm}^{-1}$ );

## SUMÁRIO

	<b>CAPÍTULO 1</b> Introdução Geral.....	13
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	14
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	16
<b>2.1</b>	<b>Substrato</b> .....	16
<b>2.2</b>	<b>Distribuição do tamanho de partículas</b> .....	18
<b>2.3</b>	<b>Nutrientes em substratos</b> .....	19
<b>2.4</b>	<b>Curva de retenção de água em substratos</b> .....	20
<b>2.5</b>	<b>Fluxo de água em meio poroso não saturado</b> .....	23
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	31
	<b>CAPÍTULO 2</b> Retenção de água em substratos.....	36
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	39
<b>2</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	42
<b>2.1</b>	<b>Caracterização Física</b> .....	42
<b>2.2</b>	<b>Distribuição do tamanho das partículas</b> .....	42
<b>2.3</b>	<b>Características químicas do substrato</b> .....	42
<b>2.3.1</b>	<b>Ajuste das curvas de retenção</b> .....	44
<b>2.3.2</b>	<b>Distribuição do tamanho das partículas</b> .....	45
<b>2.4</b>	<b>Dinâmica das características químicas do substrato</b> .....	45
<b>3</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	48
<b>3.1</b>	<b>Caracterização Física</b> .....	48
<b>3.2</b>	<b>Dinâmica das características químicas do substrato</b> .....	55
<b>4</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	59
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	60
	<b>CAPÍTULO 3</b> Difusividade e condutividade hidráulica em substratos.....	65
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	68
<b>2</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	70
<b>3</b>	<b>RESULTADO E DISCUSSÃO</b> .....	75
<b>4</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	89
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	90

## RESUMO GERAL

Para favorecer o seu desenvolvimento, as mudas precisam de um substrato que satisfaça além das exigências hídricas as suas exigências nutricionais. O conhecimento da difusividade e condutividade hidráulica insaturada contribui para compreender as condições de estresse de água e melhora a qualidade de substratos. Testes foram feitos no laboratório de hidráulica da Universidade Federal de Lavras com o objetivo de determinar a retenção e mobilidade de água em diferentes substratos por meio de curvas características de retenção de água e condutividade hidráulica parcialmente saturada, usando o método proposto por Bruce e Klute (1956), além de avaliar a cinética de liberação de potássio em diferentes substratos. As curvas de retenção de água foram elaboradas a partir do ajuste dos valores de umidade volumétrica obtidos nos percentuais de água retida por tensão. Para determinação da granulometria foram utilizadas amostras de 100 g de substrato seco ao ar. O teor de potássio solúvel em água foi determinado a partir do extrato obtido pela proporção substrato: água 1:5 (V/V). Foi realizado um ensaio de infiltração horizontal para estimar a difusividade e, por meio desta, a condutividade hidráulica não saturada. Os substratos estudados possuem diferentes capacidades de retenção de água e ar. Grande quantidade de potássio pode ser lixiviada, com diferentes comportamentos de liberação do potássio entre os substratos estudados, com a relação descrita por um ajuste linear. A condutividade hidráulica não saturada aumenta com o aumento da umidade de forma exponencial.

## ABSTRACT

For better development, seedlings need substrates that meet their water and nutritional requirements. Knowledge of diffusivity and unsaturated hydraulic conductivity contributes to understand the conditions of water stress and might help to improve quality of substrates. Tests were made at the Hydraulics Laboratory of the Federal University of Lavras in order to determine the retention and mobility of water in different substrates by evaluating water retention curves and partially saturated hydraulic conductivity, using the method proposed by Bruce and Klute (1956). Tests also allowed evaluation of kinetics of potassium release by different substrates. The water retention curves were drawn from the set of values obtained for volumetric water content at different pressure values. For determination of particle size distribution, samples were used, composed of 100g of dry substrate. Potassium content was determined by water-soluble extract obtained from the ratio substrate: water 1:5 (V / V). A test was carried to estimate the infiltration horizontal diffusivity and, through this, the unsaturated hydraulic conductivity. The substrates studied have different capacities for water retention and air. Large amounts of potassium can be leached with different release behaviors of potassium among the substrates studied, described by a linear fit. In general, unsaturated hydraulic conductivity increases exponentially with increasing in water content.

## **CAPÍTULO 1**

### **INTRODUÇÃO GERAL**

## 1 INTRODUÇÃO

O uso de substratos com características adequadas contribui para produção de plantas com melhor qualidade. Com isso conhecer as características do substrato torna-se fator essencial para o sucesso da produção (LUDWIG, 2010). Em estudos de produção de mudas é importante ressaltar também a uniformidade de aplicação de água que de acordo com Milner (2001) é bastante variável, pois a distribuição de água nas bancadas, muitas vezes irregular é dependente do manejo empregado.

Para evitar o risco de estresse hídrico para as plantas cultivadas em recipientes como tubetes é importante avaliar a curva de retenção de água aplicando-se baixas tensões (10, 20 e 50 cm), porque tensões acima destes valores pelo substrato já não representam a disponibilidade de água, para plantas cultivadas em pequenos recipientes.

O volume de água e de nutrientes disponíveis depende mais do real fluxo de umidade no meio do que da quantidade de água no recipiente. Desse modo, variáveis que caracterizam o fluxo, como condutividade ou difusividade hidráulica auxiliam no entendimento do comportamento físico do substrato. A condutividade hidráulica do meio não saturado pode indicar com maior precisão a disponibilidade de água às raízes do que a água facilmente disponível. Assim, a quantificação dos processos hidráulicos que ocorrem dentro do recipiente durante e entre irrigações é essencial para a gestão eficaz da irrigação e adubação.

Significativas mudanças na condutividade hidráulica, e conseqüentemente no fluxo de água e nutrientes são esperadas entre irrigações, mesmo que o conteúdo de água seja mantido dentro do que é denominada água facilmente disponível (AFD). O conhecimento da sua variação é importante para

um efetivo manejo da irrigação, com objetivo de prover a quantidade de água para um ótimo aproveitamento pela planta.

Tendo em vista a carência de informações relacionadas sobre a quantificação do movimento de água em substratos e admitindo que a disponibilidade de nutrientes e água para as plantas depende do efetivo fluxo de umidade para as raízes, este trabalho teve por objetivos:

- i) Determinar curvas característica de retenção de água, e sua dependência da composição e distribuição granulométrica de seis substratos amplamente utilizados na produção de mudas;
- ii) Determinar a condutividade hidráulica parcialmente saturada para diferentes substratos agrícolas, a partir da difusividade hidráulica e da curva de retenção de água.
- iii) Avaliar a cinética de liberação de potássio de seis substratos amplamente utilizados na produção de mudas;

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 Substrato**

O termo substrato se refere ao suporte físico para o crescimento de raízes de plantas cultivadas em recipientes, em substituição ao solo. Existe uma ampla oferta de matérias primas, dependendo da região de origem, que podem ser utilizadas como substrato. A escolha do substrato deve ser feita em função da disponibilidade e custo do material, suas características físicas e químicas, espécie a ser cultivada, condições de produção (sistema de irrigação, fertilização, tamanho de recipiente etc.), além de aspectos técnicos relacionados ao seu uso (SILVA et al., 2004). Os materiais mais utilizados são a casca de arroz carbonizada, bagaço de cana, cama de frango, húmus de minhoca e esterco de bovinos. Klein et al. (2002), ao avaliar as alterações das propriedades físico-hídricas de substratos comerciais, misturados com a casca de arroz carbonizada em diferentes proporções, observaram que esta pode ser utilizada para melhorar as propriedades físico-hídricas de substratos, propiciando melhor porosidade.

De acordo com Kämpf e Fermino (2000), o solo se diferencia do substrato por apresentar gênese, perfil e densidade peculiares com processos de formação envolvendo milênios, todos relacionados com a paisagem e as condições ambientais circundantes. Deste modo deve-se considerar as peculiaridades que diferenciam o cultivo em solo e substrato como o fato de que as plantas quando cultivadas no solo têm a sua disposição volumes de solo de dimensões praticamente ilimitadas para explorar. Com isso, vale lembrar que a quantidade de substrato empregada é um dos mais importantes pré-requisitos

para o sucesso na produção de mudas e plantas de qualidade (TELLES et al., 2005).

Segundo Koyanagui et al. (2008), os elementos orgânicos recomendados para uso como substrato agrícola devem apresentar em sua estrutura física a capacidade de reter água em potencial matricial baixo para que a cultura não utilize grande quantidade de energia para absorvê-la.

Segundo Nappo, Gomes e Chaves (2001), o substrato tem a função de servir de suporte para a muda, favorecer o desenvolvimento do sistema radicular, possibilitar a formação de um torrão firme e ter capacidade de retenção de nutrientes e umidade. Contudo, é praticamente improvável encontrar todas essas características num único material, assim, a mistura de vários materiais é a opção mais viável para conseguir um substrato próximo ao ideal.

Segundo Girardi (2012), existem diferentes tipos de substratos que de forma isolada ou em mistura podem ser utilizados na produção. Entretanto, para serem utilizados de modo a obter resultados satisfatórios, devem apresentar entre outras características, baixa densidade e boa aeração e drenagem, fatores que favorecem o bom desenvolvimento das raízes. Segundo o mesmo autor muitos materiais orgânicos e inorgânicos têm sido utilizados para a formulação de substratos, para a produção de mudas, havendo assim a necessidade de se determinar o substrato mais apropriados para cada espécie de forma a atender sua demanda quanto a fornecimento de nutrientes e propriedades físicas como retenção de água, aeração, facilidade para penetração de raízes e não ser favorável à incidência de doenças.

Existem vários trabalhos cujo enfoque é o preparo de substratos alternativos, nos quais se utilizam de resíduos vegetais e excremento de animais presentes na propriedade, principalmente esterco e casca de arroz carbonizada, casca de coco e casca de pinus (SANTOS, 2008). Conforme Galvão et al. (2007), várias pesquisas já foram conduzidas, a fim de determinar qual o melhor

substrato, ou a mistura mais adequada para a produção de mudas em diferentes recipientes.

Na matriz do substrato, a água é retida entre as partículas até o equilíbrio da força de coesão da água com a força de gravidade, em que a dimensão dos poros de um substrato pode estabelecer a relação entre água e ar disponível às plantas (GRUSZYNSKI, 2002).

## **2.2 Distribuição do tamanho de partículas**

A forma complexa no comportamento do substrato pode ser observada pelas múltiplas combinações possíveis das diferentes partículas e suas distintas formas de organização. De acordo com Burés (1997), os substratos são constituídos por partículas com as mais diversas características, que se organizam de forma aleatória. Schmitz et al. (2002) afirmam que o conteúdo de água retido no substrato é diretamente correlacionado com a distribuição dos poros por tamanho.

Conforme Zanetti et al. (2001), as partículas grossas (2,00 a 0,20 mm) são responsáveis pela formação de macroporos, os quais são ocupados por ar, e, as partículas finas (0,20 a 0,05 mm), responsáveis pela formação de microporos, ocupados por água. Fermino (2003) relata que a maior proporção de partículas grossas em relação a partículas finas favorece maior espaço de aeração, enquanto que a menor proporção favorece a retenção de água, podendo acarretar falta de oxigenação para as plantas.

De acordo com Milks, Fonteno e Larson (1989), o conhecimento da distribuição das frações granulométricas de um determinado substrato permite sua manipulação e, conseqüentemente, sua melhor adaptação a diversas situações de cultivo, porque possibilita diferentes proporções entre macro e microporosidade e, conseqüentemente, diferentes relações entre ar e água.

Conforme Handreck (1983), altas proporções de partículas “grossas” tornam o meio “aberto” com alto espaço de aeração, enquanto partículas “finas” fecham os poros, aumentando a capacidade de retenção de água e diminuindo o espaço de aeração.

### **2.3 Nutrientes em substratos**

O substrato tem papel fundamental na produção de mudas de qualidade, já que exerce influência marcante na arquitetura do sistema radicular e no estado nutricional das plantas (VALE et al., 2004). Os mesmos devem ser capazes de proporcionar fornecimento constante de nutrientes para as plantas (FERMINO, 2002).

O conhecimento da composição química do substrato é importante para favorecer a recomendação e monitoramento das adubações nos sistemas de cultivo protegido, ou seja, disponibilizar os nutrientes necessários ao crescimento e desenvolvimento das mudas.

Manter o equilíbrio entre as quantidades de nutrientes fornecidas com a demanda pela planta é crucial para produção de mudas em recipientes o que torna o monitoramento deste balanço fundamental. A quantidade de nutrientes presentes na maioria dos materiais usados em substratos é geralmente baixa ou nula. As dosagens de fertilizantes usadas variam quanto aos constituintes da mistura e quanto ao crescimento da planta (MINAMI; SALVADOR, 2010). Apesar da importância desses estudos, existe pouca informação para substratos agrícolas. Informações sobre a disponibilidade de potássio em meios porosos com ênfase na necessidade da quantificação das taxas com que o potássio é liberado das formas não trocáveis para as plantas poderão melhorar o prognóstico da disponibilidade do potássio em substrato.

Segundo Patel, Prasher e Bonnel (2000), a concentração de sais em meio de crescimento de raízes, como substratos, é dependente do posicionamento da frente de saturação e do tempo de sua atuação no sistema solo-planta. A presença mais elevada da posição da frente de saturação, ou menores níveis de tensão, determinaria a diluição dos sais neste meio, reduzindo as suas concentrações.

A grande variabilidade entre os substratos utilizados na produção de mudas, a falta de critérios confiáveis para a interpretação de análises químicas dos substratos e de níveis críticos, assim como prováveis relação desses níveis com características inerentes ao substrato e às plantas é relatada por Neves, Gomes e Novais (1990) e justificam os estudos para que se faça uma adequada recomendação de adubação.

#### **2.4 Curva de retenção de água em substratos**

O volume de água disponível às plantas dentro de cada faixa de potencial matricial em uma determinada amostra do substrato, fornecida por meio da curva de retenção, é importante, pois representa a relação entre a umidade volumétrica e o potencial matricial.

O método mais difundido para a avaliação da distribuição volumétrica de ar e água nos substratos agrícolas é o desenvolvido por Boodt e Verdonck (1972). Segundo esses autores, o volume de água retido no substrato na tensão 0 hPa define a porosidade total (PT) do substrato. Sendo os poros (porosidade total) responsáveis pela retenção de água e pelo arejamento do substrato, uma elevada porosidade total apresenta, ainda que teoricamente, um fator positivo, uma vez que permite, simultaneamente, uma adequada retenção de água e um bom arejamento. Dessa forma, a dimensão dos poros é importante para estabelecer o quanto um substrato é capaz de regular o fornecimento de água e ar

às plantas (HANDRECK; BLACK, 1999). Esses poros podem ser classificados como macroporos, mesoporos, microporos e ultra microporos, segundo conceito que leva em consideração a função, estabelecido por Drzal, Cassel e Fonteno (1999). Esses autores sugerem que os macroporos sejam os poros que não retêm água sob a força exercida pela gravidade, sendo esse espaço ocupado por ar e denominado de “espaço de aeração”. Os mesoporos retêm água a tensões entre a tensão limite para o espaço de aeração (estabelecida como uma coluna de água equivalente à metade da altura de substrato) e 30 kPa. Essa é considerada como a “água facilmente disponível” para as plantas. Os microporos retêm água a tensões entre 30 kPa e 1500 kPa, sendo essa considerada como a reserva de água para as plantas. Os ultramicroporos caracterizam o espaço poroso que retém água a tensão maior que 1500 kPa, considerada por esses pesquisadores como “água indisponível” para as plantas em substrato (GRUSZYNSKI, 2002).

A tensão 1 kPa determina o volume de ar presente no substrato após cessar a livre drenagem. Esse ponto foi definido em função da altura do recipiente, pois a maioria dos cultivos em substratos era realizada em recipientes com altura entre 10 e 15 cm. Assim, a diferença entre a PT do substrato e a umidade retida a 1kPa corresponde ao espaço de aeração (EA) do substrato. Nas mesmas condições, a água disponível se refere aos microporos preenchidos com água (entre 1-10 kPa). Na metodologia proposta por Boodt e Verdonck (1972), o substrato, de cada cultivo, é caracterizado quanto à água disponível. Os teores de água são obtidos a partir de sucção referente aos pontos de tensão 0, 1, 5 e 10 kPa. Essa metodologia permite determinar a liberação de água dos substratos, podendo-se verificar o nível de energia a que a água está retida. Entretanto, dentro dessa faixa de tensão encontram-se diferentes forças de retenção de água. Assim, após observar que tensões acima de 5 kPa afetavam desfavoravelmente o desenvolvimento das plantas, definiu-se esse valor para separar o volume de água facilmente disponível (AFD) para as plantas e o volume de água

tamponante (AT) do substrato. Portanto, AFD é o volume de água retido entre a tensão de um e 5 kPa e AT, entre a tensão de 5 e 10 kPa.

A água tamponante é considerada o volume de água retido no substrato que é utilizado quando, eventualmente, ocorre alguma situação de estresse hídrico no qual a tensão matricial da água no substrato atinge valores superiores a 5 kPa. A tensão 10 kPa foi definida com base nos experimentos conduzidos com *Ficus*, nos quais se observou que as plantas não apresentaram condições ótimas de desenvolvimento quando a tensão matricial do substrato foi maior que 10 kPa. Portanto, o volume de água retido no substrato após se aplicar essa tensão corresponde ao volume de água não disponível para a planta, denominado água remanescente (AR) do substrato (CORÁ; FERNANDES, 2008).

Nos cultivos desenvolvidos em substratos, várias características são diferentes, como por exemplo, a granulometria dos substratos, a densidade, as dimensões do recipiente e as plantas cultivadas. Assim, de acordo com Corá e Fernandes (2008), os parâmetros PT, EA, AD, AFD, AT e AR, recomendado por Boodt e Verdonck (1972), podem não se adequar aos cultivos nos quais os fatores de produção são distintos daqueles descritos por esses autores. As faixas de tensão 0 a 1, 1 a 5 e 5 a 10 kPa, preconizadas por Boodt e Verdonck (1972), são amplas, perdendo-se informações importantes quanto às variações do volume de água em função da tensão matricial do substrato dentro de cada faixa. Desta forma sugere-se que se utilizem as tensões 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 e 10kPa para a determinação das curvas características de retenção de água dos substratos.

Por meio das curvas e equações ajustadas, pode-se determinar, para qualquer outro valor de tensão, qual o volume de água retido no substrato. Essa determinação possibilita uma análise contínua da variação do volume de água em função da tensão matricial de água do substrato, o que permite um manejo

racional da água disponível para as plantas nos substratos acondicionados em recipientes (CORÁ; FERNANDES, 2008).

Vários modelos empíricos têm sido propostos e empregados para a descrição da curva de retenção a partir de um determinado número de pontos medidos. Um dos modelos mais utilizados na literatura para estimar a curva de retenção é o modelo de Genuchten (1980), em que são ajustados os parâmetros  $\alpha$  e  $n$ , correlacionados, principalmente, com a textura do solo (MARTINEZ et al. 1995).

Mualem (1976) introduziu o conceito de saturação relativa ( $S_e$ ), admitindo que a saturação seja usada para quantificar a água no solo numa escala de 0 a 1, pela expressão:

$$S_e = \frac{\theta - \theta_R}{\theta_s - \theta_R} \quad (1)$$

em que  $\theta$  é a umidade com base em volume;  $\theta_R$  é a umidade residual;  $\theta_s$  a umidade de saturação .

## 2.5 Fluxo de água em meio poroso não saturado

Antes do planejamento de qualquer sistema de irrigação que venha a mostrar-se eficiente, é necessário que se tenha conhecimento do processo de infiltração. Os parâmetros físicos e físico-hídricos desempenham importantes funções nas propriedades transmissoras de água e de ar do solo; por isso seu conhecimento é essencial para solucionar problemas de irrigação, drenagem e infiltração de água.

A primeira equação que possibilitou a quantificação do fluxo de água num solo saturado foi desenvolvida por Darcy (1856), escrita na forma diferencial:

$$q_0 = -K_0 \frac{\partial H}{\partial x} \quad (2)$$

Em que  $q$  é a densidade de fluxo de água ( $\text{cm}^3/\text{cm}^2 \cdot \text{seg}$ ),  $\frac{\partial H}{\partial x}$  é o gradiente de potencial total ( $\text{cm}/\text{cm}$ ) e  $K_0$  a condutividade hidráulica ( $\text{cm}/\text{seg}$ ).

A lei de Darcy também vale para meio não saturado, ainda que a condutividade hidráulica apresente redução exponencial com a diminuição da umidade. Richards (1931) generalizou a lei de Darcy para as condições não saturadas considerando que a condutividade hidráulica é função do potencial matricial do solo.

A condutividade hidráulica refere-se à habilidade de movimentar a água (FONTENO, 1993). Assim como no solo, a condutividade hidráulica no substrato é definida pela lei de Darcy e é função do teor de água. Portanto, um decréscimo acentuado na condutividade hidráulica é esperado com a redução da umidade nos substratos que têm uma elevada percentagem de poros grandes.

Além da condutividade hidráulica existe outro parâmetro hídrico, denominado difusividade hidráulica. Este parâmetro foi introduzido da seguinte forma: para fluxo horizontal o gradiente de potencial total de água no solo é igual ao gradiente de potencial matricial, uma vez que a componente gravitacional é constante.

Portanto, para fluxo horizontal, em solo não saturado, a equação 2 pode ser reescrita da seguinte forma:

$$q = -K(h) \frac{\partial h}{\partial x} \quad (3)$$

Em que  $h$  é o potencial matricial da água no meio poroso.

Como  $h = h(\theta)$  (curva característica) é possível reescrever a equação 3 da seguinte forma:

$$q = -K \left( \frac{\partial h}{\partial \theta} \right) \left( \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) = -D \left( \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) \quad (4)$$

Em que  $D$  é o fluxo com gradiente unitário de umidade.

A condutividade hidráulica do solo não saturado pode ser descrita como uma função  $K(\theta)$ , em que  $\theta$  representa a umidade volumétrica do solo. Aliada com o conhecimento da difusidade  $D(\theta)$  que se refere à facilidade que a umidade se expande no espaço e no tempo, o conhecimento de  $K(\theta)$  oferece embasamento necessário na previsão de absorção de água pelas plantas e a evaporação de água no solo.

Por meio do arranjo experimental da Figura 1, obtém a difusão horizontal da água numa coluna de solo homogêneo semi-infinita, com um conteúdo de água uniforme  $\theta_0$ , no instante  $t = 0$  (início do processo de infiltração). Uma placa porosa de resistência desprezível, ligada a uma bureta de Mariott preenchida com água, é colocada em contato com uma das extremidades da coluna, em  $x = 0$ . O estado inicial, é aquele no qual, ao longo de toda a extensão da coluna, o conteúdo de água è uniforme  $\theta_0$  (LIBARDI, 2005). No instante  $t=0$ , inicia-se o processo de infiltração da água por meio da placa porosa com resistência desprezível. Durante todo o tempo de infiltração, a extremidade ( $x=0$ ) é mantida saturada ( $\theta_s$ ).

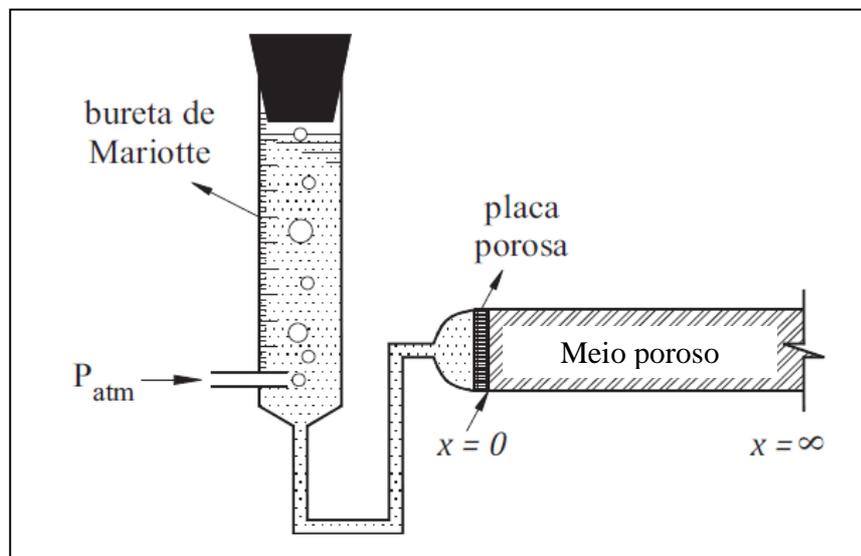


Figura 1 Esquema do ensaio de infiltração horizontal (LIBARDI, 1995)

O fluxo horizontal é induzido por meio da diferença de potencial de pressões ( $h$ ) entre dois pontos. O  $h$  é função da umidade e da posição horizontal  $x$ . A contribuição do potencial gravitacional é nula.

Bruce e Klute (1956) relatam um método para determinação da difusividade da água em solo, por meio da derivada da equação de escoamento de água em poros não saturados da lei de Darcy. Para escoamento em uma coluna horizontal, sem a componente gravitacional, pode ser escrita como:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} \right] \quad (5)$$

Em que  $\theta$  é a umidade com base em volume ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ );  $x$  é a distância

horizontal (cm);  $t$  é o tempo de avanço da frente de umedecimento e  $D$  é a difusividade do solo.

A difusividade do solo pode ser determinada segundo Klute (1965) e Pauletto et al. (1988), conforme a equação 4, da seguinte forma:

$$D(\theta) = K(\theta) \frac{\partial h}{\partial \theta} \quad (6)$$

Sendo  $k(\theta)$  a condutividade hidráulica não saturada e  $\frac{\partial h}{\partial \theta}$  a tangente da curva de retenção de água.

Klute e Dirksen (1986) admitem as condições de contorno abaixo para solucionar  $D(\theta)$  a qual descreve o fluxo horizontal, em que a umidade mantém-se constante  $\theta_s$  na entrada da coluna de solo:

$$\begin{cases} \theta = \theta_i, x > 0, & t = 0 \\ \theta = \theta_s, x = 0, & t > 0 \\ \theta = \theta_i, x \rightarrow \infty, & t > 0 \end{cases}$$

Em que  $x$  é a distância horizontal,  $t$  é o tempo de avanço,  $\theta_s$  é a umidade de saturação e  $\theta_i$  é a umidade inicial do sistema, ambas com base em volume.

A solução desse problema para um sistema infinito deve conter a variável de Boltzmann ( $\lambda$ ), igual a  $\frac{x}{\sqrt{t}}$ , para transformar a equação [6] (BRUCE; KLUTE, 1956).

A difusividade hidráulica  $D(\theta)$  pode ser determinada a partir das distribuições de umidade obtidas experimentalmente com a introdução da transformação de Boltzmann utilizadas em trabalhos de Bruce e Klute (1956):

$$D(\theta) = -\frac{1}{2} \left( \frac{d\lambda}{d\theta} \right) \int_{\theta_i}^{\theta_s} \lambda d\theta \quad (7)$$

Em que  $D$  é a difusividade,  $\lambda$  é a transformação de Boltzmann e o  $\theta$  é a umidade com base em volume.

Assim, conhecida experimentalmente a curva  $\theta(x)$  em um dado instante  $t$  é possível determinar  $D(\theta)$  em  $t$  para qualquer  $\theta$  entre  $\theta_0$  e  $\theta_s$  por meio da equação 7.

Pela metodologia proposta por Bruce e Klute (1956), obtém-se a difusividade de água no solo, por meio do ensaio de fluxo horizontal, descrito acima. Com os dados de difusividade, e da curva de retenção de água no solo, encontra-se a condutividade hidráulica não saturada.

$$K(\theta) = \frac{D(\theta)}{\frac{\partial h}{\partial \theta}} \quad (8)$$

Em que:

$\frac{\partial h}{\partial \theta}$  = Declividade da curva de retenção ( $\theta_i, h_i$ ), (Capacidade hídrica).

Segundo Klute e Dirksen (1986) e Reichardt (1985), entre outros, a representação gráfica da difusividade é dada pela umidade em função da variável de Boltzmann, conforme pode ser observado na Figura 2.

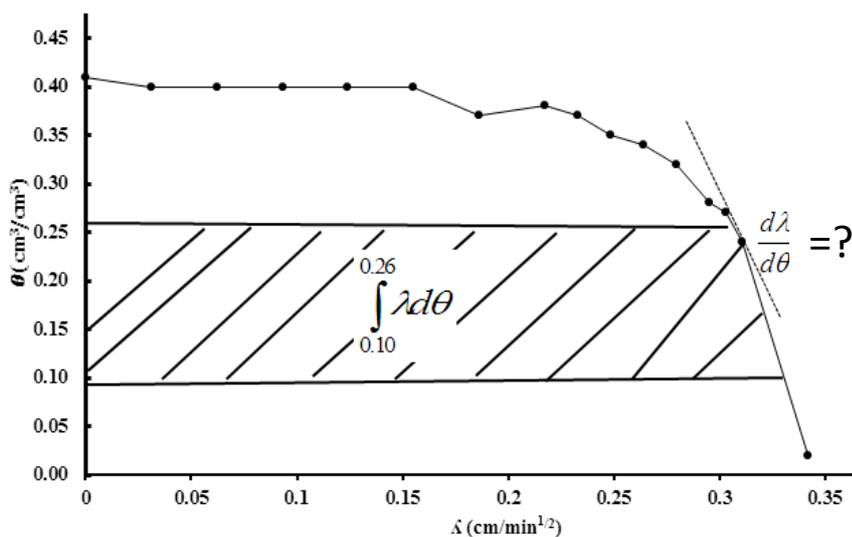


Figura 2 Curva da distribuição do teor de umidade e a variável de Boltzmann  $\lambda(x/t^{1/2})$ , de um ensaio de infiltração horizontal do substrato plantmax.

Para determinar a difusividade é preciso plotar o gráfico  $\theta(\lambda)$  e determinar para diferentes valores de  $\theta$ , a integral e derivada da curva apresentada, nota-se que não existe uma função matemática que descreve o

comportamento das duas variáveis que possa ser diretamente usada na equação 7.

Conhecida a distribuição de  $\theta$  vs  $\lambda$  (Figura 2) é possível notar que a área sob a curva representa o total de água acumulada 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  $\theta_0$  e  $\theta_s$  (equação 9).

$$I = \int_{\theta_0}^{\theta_s} \lambda(\theta).t^{1/2} d\theta \quad (9)$$

Sendo  $\lambda(\theta)$  único para cada solo, Philip (1957) apresentou o termo sortividade (capacidade de absorver líquido por capilaridade), conforme dado pela equação 10.

$$S = \int_{\theta_0}^{\theta_s} \lambda(\theta).d\theta \quad (10)$$

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, assumindo-se a expressão exponencial para  $D(\theta)$ , relacionada com a sortividade S (BRUTSAERT, 1979; REICHARDT; NIELSEN; BIGGAR, 1972; WHITE, 1987) a lâmina acumulada em função do tempo (I(t)) é determinada pela equação (PHILIP, 1957):

$$I = S_0 t^{1/2} \quad (11)$$

### REFERÊNCIAS

BOODT, M. de; VERDONCK, O. The physical properties of the substrates in floriculture. **Acta Horticulturae**, Wageningen, v. 26, p. 37-44, 1972.

BRUCE, R. R.; KLUTE, A. The measurement of soil moisture diffusivity. **Soil Science Society of America**, Madison, v. 20, p. 458-462, 1956.

BRUTSAERT, W. Universal constants for scaling the exponential soil water diffusivity. **Water Resources Research**, Washington, v. 15, p. 481-483, 1979.

BURÉS, S. **Substratos**. Madrid: Ediciones Agrotécnicas, 1997. 341 p.

CORÁ, J. E.; FERNANDES, C. Curva característica de retenção de água para substratos. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE SUBSTRATOS PARA PLANTAS, 6., 2008, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: UFCE, 2008. 1 CD-ROM.

DARCY, H. **Les fontaines publiques de la Ville de Dijon**. Paris: Dalmont, 1856. 592 p.

DRZAL, M. S.; CASSEL, D. K.; FONTENO, W. C. Pore fraction analysis: a new tool for substrate testing. **Acta Horticulturae**, Wageningen, v. 481, n. 1, p. 43-53, 1999.

FERMINO, M. H. **Métodos de análise para caracterização física de substratos para planta**. 2003. 89 f. Tese (Doutorado em Fitotecnia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

\_\_\_\_\_. O uso da análise física na avaliação da qualidade de componentes e substratos. In: FURLANI, A. M. C. (Ed.). **Caracterização, manejo e qualidade de substratos para produção de plantas**. Campinas: Instituto Agronômico, 2002. p. 29-37. (Documentos IAC, 70).

FONTENO, W. C. Problems, considerations in determining physical properties of horticultural substrates: substrates in horticulture. **Acta Horticulture**, Wageningen, n. 342, p. 197-204, 1993.

GALVÃO, R. O. et al. Desempenho de mudas de mamoeiro cv. sunrise solo sob diferentes substratos orgânicos. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 20, n. 3, p. 144-151, jul./set. 2007.

GENUCHTEN, M. T. van. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v. 44, p. 892-898, 1980.

GIRARDI, L. B. **Disponibilidade hídrica na produção de gipsofila (*Gypsophila paniculata*) em vasos com substrato de casca de arroz carbonizada**. 2012. 89 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.

GRUSZYNSKI, C. **Resíduo agro-industrial "Casca de Tungue" como componente de substrato para plantas**. 2002. 99 f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

HANDRECK, K. A. Particle-size and the physical-properties of growing media for containers. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 14, n. 3, p. 209-222, 1983.

HANDRECK, K. A.; BLACK, N. **Growing media for ornamental plants and turf**. Sydney: University of New South Wales Press, 1999. 448 p.

KLEIN, V. A. et al. Casca de arroz carbonizada como condicionador de substrato. In: FURLANI, A. M. C. (Ed.). **Caracterização, manejo e qualidade de substrato para produção de plantas**. Campinas: Instituto Agronômico, 2002. p. 115. (Documentos IAC, 70).

KLUTE, A. Laboratory measurement of hydraulic conductivity of saturated soil. In: BLACK, C. A. (Ed.). **Methods of soil analysis: part 1**. Madison: American Society of Agronomy, 1965. p. 210-221.

KLUTE, A.; DIRKSEN, C. Hydraulic conductivity and diffusivity: laboratory methods. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. 2<sup>nd</sup> ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986. p. 635-656.

KOYANAGUI, M. T. et al. Diferentes substratos na germinação de sementes e produção de mudas de romãzeira (*Punica granatum* L.). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE FRUTICULTURA, 20.; ANNUAL MEETING OF THE INTERAMERICAN SOCIETY FOR TROPICAL HORTICULTURE, 45., 2008, Vitória. **Anais...** Jaboticabal: Sociedade Brasileira de Fruticultura, 2008. 1 CD-ROM.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: EDUSP, 2005. 335 p.

LUDWIG, F. **Características dos substratos no desenvolvimento, nutrição e produção de Gérbera (gerbera jamesonii) em vaso**. 2010. 132 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual de São Paulo, Botucatu, 2010.

MARTINEZ, M. A. et al. Efeito da textura do solo sobre os parâmetros de alguns modelos matemáticos usados para estimar a curva de retenção de água no solo. **Revista Engenharia na Agricultura**, Viçosa, MG, v. 4, n. 48, p. 1-9, 1995.

MILKS, R. R.; FONTENO, W. C.; LARSON, R. A. Hydrology of horticultural substrates: I., mathematical models for moisture characteristics of horticultural container media. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, Alexandria, v. 114, n. 1, p. 48-52, 1989.

MILNER, L. Water and Fertilizers management in substrates. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF CITRUS NURSERYMEN, 6., 2001, Ribeirão Preto. **Proceedings...** Ribeirão Preto: ISCN, 2001. p. 108-111.

MINAMI, K.; SALVADOR, E. D. **Substrato para plantas**. Piracicaba: USP/ESALQ; Degaspari, 2010. 209 p.

MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. **Water Resources Research**, Washington, v. 12, n. 3, p. 513-522, 1976.

NAPPO, M. E.; GOMES, L. J.; CHAVES, M. M. F. **Reflorestamentos mistos com essências nativas para recomposição de matas ciliares**. Lavras: UFLA, 2001. 31 p. (Boletim Agropecuário, 30).

NEVES, J. C. L.; GOMES, J. M.; NOVAIS, R. F. Fertilização mineral de mudas de eucalipto. In: BARROS, N. F.; NOVAIS, R. F. (Ed.). **Relação solo-eucalipto**. Viçosa, MG: Folha de Viçosa, 1990. p. 25-98.

PATEL, R. M.; PRASHER, S. O.; BONNEL, R. B. Effect of watertable depth, irrigation water salinity, and fertilizer application on root zone salt buildup. **Canadian Agricultural Engineering**, Ottawa, v. 42, n. 3, p. 111-115, July/Sept. 2000.

PAULETTO, E. A. et al. Determinação da condutividade hidráulica a partir da curva de retenção de água. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 12, p. 189-195, 1988.

PHILIP, J. R. The theory of infiltration: 4., sorptivity and algebraic infiltration infiltration equations. **Soil Science**, Baltimore, v. 84, p. 329-339, 1957.

REICHARDT, K. **Processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera**. Campinas: Fundação Cargill, 1985. 486 p.

REICHARDT, K. D.; NIELSEN, D. R.; BIGGAR, J. W. Scaling of infiltration into homogeneous soils. **Soil Science Society of America**, Madison, v. 36, p. 240-245, 1972.

RICHARDS, L. A. Capillary conduction of liquids through porous medium. **Journal of Applied Physics**, New York, v. 1, n. 5, p. 318-333, 1931.

SANTOS, F. C. B. dos. **Produção de mudas de cupuaçuzeiro em diferentes tipos e tamanhos de recipientes, substratos e arranjos**. 2008. 92 f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) - Universidade Federal do Acre, Rio Branco, 2008.

SCHMITZ, J. A. K. et al. Propriedades químicas e físicas de substratos de origem mineral e orgânica para o cultivo de mudas em recipientes. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 32, n. 6, p. 937-944, nov./dez. 2002.

SILVA, W. et al. Índice de consumo e eficiência do uso da água em eucalipto, submetido a diferentes teores de água em convivência com a braquiária. **Floresta**, Curitiba, v. 34, n. 3, p. 325-335, set./dez. 2004.

TELLES, C. A. et al. Diferentes volumes de substrato no desenvolvimento de plantas de cravo-de-defunto (*Tagetes patula* L.). **Revista Brasileira de Horticultura Ornamental**, Campinas, v. 11, n. 1, p. 67-71, 2005.

VALE, L. S. do et al. Efeito de diferentes misturas de substrato e tamanho de recipientes na produção de mudas mamoeiro. In: BARBOSA, J. G.; MARTINEZ, H. E. P.; PEDROSA, M. W. (Ed.). **Nutrição e adubação de plantas cultivadas em substrato**. Viçosa, MG: UFV, 2004. p. 385.

WHITE, I. Comments on 'Sortivity approximations' by Kutilek and Valentova. **Transport in Porous Media**, Cambridge, v. 2, p. 317-322, 1987.

ZANETTI, M. et al. Caracterização física de substratos para a produção de mudas e porta-enxerto cítricos sob telado. **Revista Laranja**, Cordeirópolis, v. 24, n. 2, 2001. Disponível em: <[http://www.citrograf.com.br/artigos\\_tecnicos.html](http://www.citrograf.com.br/artigos_tecnicos.html)>. Acesso em: 8 mar. 2012.

## CAPÍTULO 2

### RETENÇÃO DE ÁGUA E CINÉTICA DA LIBERAÇÃO DE POTÁSSIO EM DIFERENTES SUBSTRATOS AGRÍCOLAS



## RESUMO

As mudas precisam de um substrato que satisfaça além das exigências hídricas, as suas exigências nutricionais, para favorecer o seu desenvolvimento. O objetivo com esse trabalho foi determinar curvas características de retenção de água, e avaliar a cinética de liberação de potássio de seis substratos (S1, S2, S3, S4, S5 e S6). Este experimento foi conduzido no Laboratório de Relação Água-Solo-Planta do setor de Engenharia de Água e Solo da UFLA. As curvas de retenção de água foram elaboradas a partir do ajuste dos valores de umidade volumétrica obtidos nos percentuais de água retida por tensão. Para a determinação da granulometria, foram utilizadas amostras de 100 g de substrato seco ao ar, colocada sobre um conjunto de peneiras, agitados manualmente por três minutos. O teor de potássio solúvel em água foi determinado a partir do extrato obtido pela proporção substrato: água 1:5, agitada em mesa com movimento horizontal com tempo variando de uma a trinta e seis horas. Os resultados demonstraram que os seis substratos estudados possuem diferentes capacidades de retenção de água e ar, em função, principalmente, de sua granulometria. Grande quantidade de potássio pode ser lixiviada, com diferentes comportamentos de liberação do potássio entre os substratos estudados.

**Palavras-chave:** Sorção. Granulometria. Nutriente.

## ABSTRACT

Seedlings need substrates that meet their water and nutritional requirements. The aim of this study was to determine the characteristic curves of water retention with respect to the composition and particle size distribution and evaluate the kinetics of potassium release of six substrates (S1, S2, S3, S4, S5 e S6). This experiment was conducted at the Laboratory of Soil-Plant-Water Relationship, at UFLA (Federal University of Lavras). The water retention curves were drawn from the set of values obtained in volumetric moisture percentage of water retained under different tension values. For determining the particle size distribution, samples of 100 g of substrate were dry in air, placed over a set of sieves and stirred manually for three minutes. The content of water-soluble potassium was determined from the extract obtained by the substrate water ratio: 1:5, stirred with horizontal motion with time ranging from one to thirty-six hours. The results demonstrated that all six substrates studied have different retention capacities of water and air, due primarily to its granulometry. Large amounts of potassium can be leached with different release behaviors of potassium among the substrates studied.

**Keywords:** Sorption. Granulometry. Nutrient.

## 1 INTRODUÇÃO

Os substratos para plantas são misturas à base de turfa, fibra de coco, cinza, casca de arroz, e outros materiais nos quais as raízes das plantas irão se desenvolver. Tais substratos devem apresentar as seguintes características: possuir alta capacidade de armazenamento de água, ser poroso com o intuito de facilitar a aeração, ser estável ao longo do tempo, ter alta capacidade de absorção, estar livre de patógenos, pragas, sementes de plantas infestantes e substâncias nocivas ao desenvolvimento das plantas.

Entre os diversos componentes de misturas para substratos, adquire importância a casca de arroz carbonizada, em função de suas características favoráveis. Apresenta baixa capacidade de retenção de água, drenagem rápida e eficiente, proporcionando boa oxigenação para as raízes e elevado espaço de aeração ao substrato. A escolha de um substrato com determinado valor de espaço de aeração deve ser feita considerando-se a espécie vegetal, estágio de desenvolvimento e manejo de irrigação.

A disponibilidade de água está diretamente relacionada com a capacidade do substrato em reter e liberar água, além de informar sobre o volume de água disponível (AD) às plantas em baixas tensões. A faixa de 0,24 – 0,40  $\text{cm}^{-3} \text{ cm}^{-3}$  é aquela considerada ideal para o volume de AD de substratos, quando o cultivo é realizado em recipientes (BOOT; VERDONCK, 1972).

Conforme Barreto, Testezlaf e Salvador (2012), o tamanho médio de partículas e a porosidade dos substratos condicionam as propriedades matriciais, interferindo na capacidade de retenção e de transmissão da água no meio.

Segundo Bunt (1983), substratos com partículas grosseiras acima de 25% da sua constituição apresentam reduzida fração de água facilmente disponível (volume de água retido entre a tensão de 10 e 50 hpa). De acordo com Minami e Salvador (2010) nos substratos com mais macroporos, a drenagem é

rápida e por isso, o alagamento quase nunca acontece; há também melhor respiração pelas raízes, conseqüentemente, melhor absorção de nutrientes. Contudo, materiais mais grossos apresentam menor capacidade de retenção de água, exigindo irrigações mais frequentes.

As mudas precisam de um substrato que satisfaça, além das exigências hídricas, as suas exigências nutricionais, para favorecer o seu desenvolvimento, além disso, demandam aplicações periódicas de nutrientes, que devem ser frequentes devido à alta lixiviação e do volume limitado de substrato.

As plantas utilizam a forma solúvel do potássio, que é um nutriente facilmente lixiviável em substratos. Thebaldi (2011), trabalhando com irrigação de mudas de espécies florestais produzidas em tubetes, concluiu que as subirrigações proporcionaram alterações na concentração apenas de potássio no substrato, sendo que a maioria das características químicas avaliadas nos substratos permaneceu inalterada em função das subirrigações.

De acordo com Silva et al. (2000), extrações sucessivas do potássio com extratores químicos, ajustadas por modelos matemáticos, podem simular o efeito da planta em absorver  $K^+$  do solo, disponibilizando resultados em curto prazo, isto é, permite investigar o comportamento do solo e de suas diferentes frações granulométricas quanto à capacidade de fornecimento de  $K^+$ .

Alguns ácidos fortes têm sido utilizados para estudar a cinética de liberação de potássio, mas apresentam a desvantagem de dissolver as estruturas dos minerais. Segundo Minami e Salvador (2010), quando se faz a análise do solo, usam-se extratores fortes, mas no caso de substratos, o extrator deve ser muito fraco ou até em certos casos, usar a água como extrator, porque o que realmente interessa é a parte prontamente disponível.

Dentro desse contexto, o objetivo com esse trabalho foi determinar curvas características de retenção de água, com relação à composição e

distribuição granulométrica do substrato e também avaliar a cinética de liberação de potássio de seis substratos amplamente utilizados na produção de mudas.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Localização do experimento e caracterização dos substratos

Este experimento foi conduzido no Laboratório de Relação Água-Solo-Planta do setor de Engenharia de Água e Solo da UFLA, foram utilizados seis substratos comerciais denominados no estudo de S1, S2, S3, S4, S5 e S6.

### 2.2 Composição dos Substratos

A composição dos substratos encontra-se na Tabela 1. Percebe-se que o substrato S1 é composto por varias misturas, enquanto que os demais são constituídos por dois a três componentes.

Tabela 1 Proporção (v/v) dos materiais utilizados na formulação de substratos.

Substrato	Composição										
	Cp	Es	Sg	Fc	Vm	Ge	Ca	Cz	Tv	Cv	Tf
S <sub>1</sub>	x	x	x	x	x	x	X				
S <sub>2</sub>								X			x
S <sub>3</sub>	x								x		
S <sub>4</sub>	0,75				0,25						
S <sub>5</sub>	x				x						x
S <sub>6</sub>	x			x						x	

Cp=Casca de pinus, Es=esterco, Sg= serragem, Fc- fibra de coco, Vm- vermiculita, Ge=gesso, Ca=casca de arroz, Cz= cinza, Tv= terra vegetal, Cv= carvão vegetal, Tf=turfa, x=proporção não divulgada pelo fabricante.

### 2.3 Caracterização Física

Os substratos foram secados em estufa a 60 °C (BURÉS, 1997), por 24 horas. Os substratos secos foram colocados em anéis metálicos volumétricos de 3,0 cm de altura e 3,75 cm de diâmetro, do qual foram adicionados 3,5 cm de

substrato que foi comprimido, com um suporte plano, até atingir 3,0 cm de altura. Isso foi realizado para permitir o completo preenchimento do cilindro com o substrato, por causa da granulometria mais grossa de alguns materiais, conforme Ferraz, Centurion e Beutler (2005). Nessas amostras, foram determinados os conteúdos de água retida nas tensões 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 e 100 hpa, com cinco repetições (CORÁ; FERNANDES, 2008).

Os anéis preenchidos com os substratos foram inicialmente colocados para saturar, com água destilada, em bandejas plásticas por 24 horas. Em seguida foram transferidos para os funis de tensão com base de placa porosa (Figura 1). Sobre a placa foram colocados os anéis preenchidos com os substratos e submetidos às tensões descritas acima, até atingir o ponto de equilíbrio que em geral ocorreu antes de 24 horas (SODRÉ, 2007). Depois de atingido o equilíbrio, foi retirado dos funis, pesados, determinando-se a umidade correspondente a cada tensão. Posteriormente, os substratos foram pesados e levados à estufa a 60 °C por 24 horas, para determinação dos teores de umidade.

O espaço de aeração (diferença entre a porosidade total do substrato e o volume de água retido a 10 hPa), a água disponível (volume de água retido no substrato na faixa de tensão entre 10 e 100 hPa); água facilmente disponível (volume de água retido entre a tensão de 10 e 50 hPa), água tamponante (volume de água retido entre a tensão 50 e 100 hPa) e água remanescente (volume de água que é retida no material após ter sido submetido à tensão de 100 hPa) foram determinados conforme metodologia proposta por Boodt e Verdonck (1972) e Wilson (1983). O cálculo da porosidade total foi realizado por meio da equação 12:

$$P_t = \left( 1 - \frac{\rho_g}{\rho_p} \right) \times 100 \quad (12)$$

em que  $\rho_g$  é a densidade global ( $\text{g/cm}^3$ ),  $\rho_p$  a densidade de partículas ( $\text{g/cm}^3$ ) e  $P_t$  porosidade total.



Figura 1 Funis de placa porosa usados na determinação da curva de retenção. Fonte: Foto realizada na Universidade Federal de Lavras - UFLA (2013).

### 2.3.1 Ajuste das curvas de retenção

Com os valores das umidades associadas aos seus respectivos potenciais mátricos foram obtidos os ajustes conforme os parâmetros empíricos da equação proposta por Genuchten (1980):

$$\theta = \theta_R + \frac{\theta_S - \theta_R}{[1 + (\alpha|h|)^n]^m} \quad (13)$$

em que  $\theta$  a umidade volumétrica ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ),  $\theta_r$  a umidade residual ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ),  $\theta_s$  a umidade de saturação ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ),  $h$  o potencial mátrico e  $\alpha$ ,  $m$  e  $n$  os parâmetros empíricos da equação.

### 2.3.2 Distribuição do tamanho das partículas

Para a determinação da granulometria, foram utilizadas amostras de 100 g de substrato seco ao ar, colocada sobre um conjunto de peneiras, agitados manualmente por três minutos. As malhas das peneiras empregadas foram 4,75, 2,8, 1,7, 0,85, 0,425 e 0,25 mm. Após a agitação, o material retido em cada peneira foi pesado e utilizado para calcular a porcentagem em relação ao peso da amostra (média de 5 amostras). O peso do material retido em cada peneira foi utilizado no cálculo do diâmetro médio de partículas, conforme a fórmula proposta por Kemper e Rosenau (1986):

$$DMP = \sum_{i=1}^n n_i d_i \quad (14)$$

Em que:

DMP é o diâmetro médio de ponderado (mm);

$n$  é representa a fração do material retido na peneira;

$d$  é o diâmetro médio da abertura da peneira (mm).

Os dados foram submetidos à análise de variância pelo teste F, utilizando o teste de Tukey a 5% com o uso do programa estatístico Sisvar (FERREIRA, 2000).

## 2.4 Dinâmica das características químicas do substrato

As análises químicas dos substratos realizadas pelo Laboratório de análises agrícolas e ambientais (AGRILAB) se encontram na Tabela 2. Foram utilizados seis substratos com cinco repetições.

Tabela 2 Características químicas dos substratos

Características	S1	S2	S3	S4	S5	S6
pH em água	5,0	6,45	5,42	5,95	6,24	5,6
C orgânico % (m/m)	23,49	4,48	11,77	32,34	15,32	17,9
N total (mg kg <sup>-1</sup> )	6300	6300	4900	10500	7700	6500
P (mg kg <sup>-1</sup> )	7,7	3,3	2,5	8,3	3,8	6,4
K (total) (mg kg <sup>-1</sup> )	1580	1045	450,6	597,2	619,0	500
Ca (mg kg <sup>-1</sup> )	500	924,5	170,7	751,5	888,9	108
Mg (mg kg <sup>-1</sup> )	288	319,3	44,9	223,8	848,0	665
S (mg kg <sup>-1</sup> )	56,9	62,3	19,7	40,7	101,7	24,6
B (mg kg <sup>-1</sup> )	0,40	0,47	0,5	0,35	0,33	0,1
Cu (mg kg <sup>-1</sup> )	0,11	0,12	0,15	0,11	0,19	0,1
Fe (mg kg <sup>-1</sup> )	3,80	2,47	1,05	0,59	2,78	2,51
Mn (mg kg <sup>-1</sup> )	5,32	1,74	2,54	1,41	1,75	1,95
Zn (mg kg <sup>-1</sup> )	0,76	0,29	0,30	0,12	0,29	0,59
CEe (μS cm <sup>-1</sup> )	818,6	898,7	199,5	610,2	1637,0	600,0

CEe = condutividade elétrica do extrato saturação

Para a determinação da liberação de potássio foi utilizado o método oficial europeu (COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION - CEN, 2003). O teor de potássio solúvel em água foi determinado a partir do extrato obtido pela proporção substrato: água 1:5 (V/V). Uma massa equivalente a 5g de substrato, com base na densidade atual, foi misturada a 25 mL de água destilada. Esse material foi agitado em mesa com movimento horizontal (Figura 2) e o tempo de contato de cada extração foi variável, de 1, 4, 8, 12, 16, 20, 24 e 36 horas. Posteriormente as amostras foram centrifugadas durante 10 minutos a 3.500 rpm e filtradas, obtendo-se assim o extrato desses. Retirou-se uma alíquota de 20 mL que foi utilizada para a determinação da concentração de K<sup>+</sup>.



Figura 2 Mesa com movimento horizontal. (Laboratório de Relação Água-Solo-Planta do setor de Engenharia de água e solo, UFLA, 2013)

O teor de potássio foi determinado por fotometria de chama. A relação entre a quantidade de potássio, extraída em água destilada dos substratos com o tempo de equilíbrio das amostras, foi descrita pela equação parabólica de difusão. As equações parabólicas de difusão são empregadas para descrever a cinética das reações dos constituintes dos solos (DHILLON; SIDHU; BANSAL, 1989; ELKHATIB; HERN, 1988; HAVLIN; WESTFALL; OLSEN, 1985):

$$K_t K_\alpha^{-1} = a + bt^{1/2} \quad (15)$$

Em que  $K_t$  representa a quantidade de potássio liberado no tempo  $t$  e  $K_\alpha$  o potássio acumulado liberado até 121 horas.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Caracterização Física

Na Tabela 3 encontra-se o resumo da análise de variância, determinada para os conteúdos de água, retida nas diferentes tensões avaliadas, em que se verificou efeito significativo pelo teste F a 5% de probabilidade para os parâmetros porosidade total, espaço aeração e água disponível. Fernandes, Cora e Braz (2006) também encontraram diferenças significativas nas propriedades físicas dos substratos, exceto para o volume de água tamponante.

Tabela 3 Resumo da análise de variância com os quadrados médios de: Porosidade total (PT), Espaço aeração (EA), Água disponível (AD), Água facilmente disponível (AFD), Água tamponante (AT) e Água remanescente (AR) para os diferentes substratos avaliados. Lavras – MG, 2013.

Fv	GI	PT	EA	AD	AFD	AT	AR
Substrato	5	0,012**	0,014**	0,005 <sup>NS</sup>	0,005 <sup>NS</sup>	0,0002 <sup>NS</sup>	0,0038**
Erro	24	0,00	0,002	0,002	0,003	0,0013	0,0004
CV (%)		4,07	40,28	23,60	36,08	64,18	6,08

\*\*,\* significativo a 1% e a 5% de probabilidade pelo teste F respectivamente e NS não significativo

São apresentados na Tabela 4 os valores médios das propriedades físicas dos substratos. Os substratos apresentaram valores de porosidade total (PT) próximo ao valor considerado ideal,  $0,85 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ , conforme Boodt e Verdonck (1972) e Schmitz et al. (2002), com ressalva para o substrato S3 e S2 com valores de  $0,604$  e  $0,65 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  respectivamente.

Tabela 4 Valores médios das propriedades físicas dos substratos estudados. Lavras – MG, 2013.

Substratos	PT	EA	AD	AFD	AT	AR
S1	0,707a	0,201 a	0,200 a	0,145 a	0,055 a	0,308 c
S2	0,65 b	0,070 b	0,231 a	0,146 a	0,059 a	0,377 ab
S3	0,604b	0,074 b	0,171 a	0,120 a	0,051 a	0,358 ab
S4	0,720 a	0,146 ab	0,231 a	0,165 a	0,066 b	0,340 ab
S5	0,726a	0,128 ab	0,245 a	0,184 a	0,060 a	0,352 ab
S6	0,720 a	0,066 b	0,264 a	0,216 a	0,048 a	0,386 a
Referência <sup>1</sup>	0,85	0,10-0,4	0,24-0,40	0,10-0,30	0,04-0,10	0,25-0,30

Médias seguidas pela mesma letra minúscula, na coluna, não diferem entre si, a 5% de probabilidade pelo teste de tukey.

<sup>1</sup> Valores conforme Boodt e Verdonck (1972), Boodt, Verdenck e Cappaert (1974), Fermino (2003) e Grassi Filho e Santos (2004).

O espaço de aeração (EA) medido, dos substratos S1, S4, e S5 está dentro da faixa de referência ( $0,10 - 0,40 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ), sugerido por Boodt, Verdenck e Cappaert (1974). O acréscimo de casca de arroz carbonizada no substrato S<sub>1</sub> provavelmente ocasionou um aumento no espaço de aeração. O substrato S<sub>2</sub> apresentou o menor valor de espaço de aeração, portanto deve-se atentar para evitar que a frequência de irrigação utilizada não proporcione escassez de oxigênio ao sistema radicular das plantas cultivada com este tipo de substrato. A falta da aeração pode provocar danos e inclusive a morte das raízes (BALLARIN, 2004).

A faixa de  $0,24 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  a  $0,40 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  é aquela considerada ideal para o volume de AD de substratos (BOODT; VERDONCK, 1972). Os substratos S1 e S3 apresentaram reduzido volume de AD, o que indica que a disponibilidade de água é um fator de restrição, principalmente o substrato S3 com o menor valor de água disponível o que proporciona rápida drenagem da água fornecida, requerendo menor lâmina e maior frequência de irrigação para evitar um possível estresse hídrico para as plantas. O teor de água facilmente disponível está dentro da faixa considerada ideal, para as plantas, ou seja, representar de 75 a 90% do valor total de água disponível.

Os substratos apresentaram valores altos para a variável água tamponante (AT), segundo Fermino (2003). O substrato S4 e S5 apresentam os maiores valores médios de água tamponante, evento que contribui para a menor oscilação da quantidade de água ofertada para a planta durante o dia, favorecendo assim seu crescimento e desenvolvimento.

Quanto ao volume de água remanescente (AR), cujo padrão ideal fica na faixa de 0,25 a 0,30 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>, os substratos apresentaram valores ligeiramente superiores ao valor considerado ideal. Esse valor, obtido na tensão de 10 kPa, pode ser um agravante para a produção de mudas, principalmente se ocorrerem erros no manejo da irrigação, uma vez que após atingir um reduzido teor de água, o substrato pode necessitar de alto volume de água para iniciar o processo de reidratação.

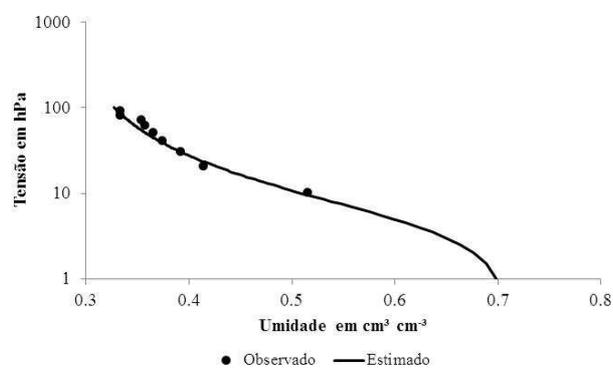
Nos gráficos 1 e 2, os ajuste dos parâmetros foram realizados a partir do modelo de Genuchten (1980), utilizando-se a ferramenta Solver do Microsoft Excel 2007, cujos coeficientes de determinação foram altos (Tabela 5).

Tabela 5 Parâmetros de ajuste do modelo de Genuchten (1980), para os diferentes substratos estudados. Lavras – MG, 2013.

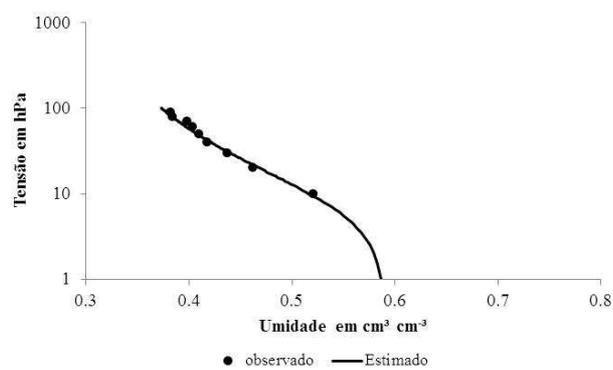
Substratos	$\alpha$	n	m	$\theta_s$	$\theta_R$	R <sup>2</sup>
S1	0,205	1,720	0,419	0,710	0,278	0,993
S2	0,082	1,722	0,419	0,660	0,312	0,994
S3	0,118	1,507	0,337	0,590	0,287	0,992
S4	0,138	1,750	0,429	0,720	0,360	0,999
S5	0,108	2,192	0,544	0,730	0,360	0,992
S6	0,072	2,634	0,620	0,730	0,360	0,993

Avaliando-se as curvas características de retenção de água (Gráfico 1 e 2), referente à umidade média das 5 repetições de cada sucção, ajustadas pelo modelo de Genuchten (1980), verifica-se que a perda de água dos substratos não foi uniforme na faixa de tensão entre 0 e 10 hPa, com variações mais acentuadas

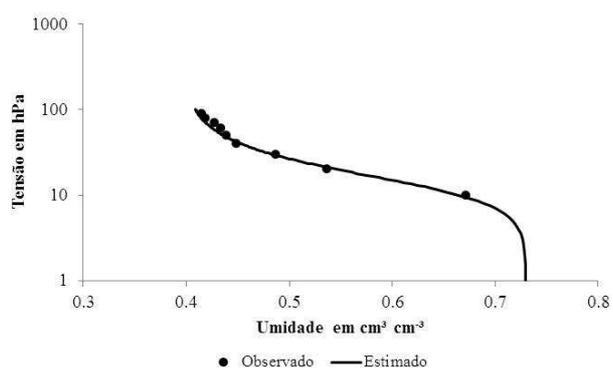
para os substratos S3 e S2. O substrato S5 e S6 expuseram características semelhantes quanto à perda de água nessa faixa de tensão (0 a 10 hPa).



(S1)

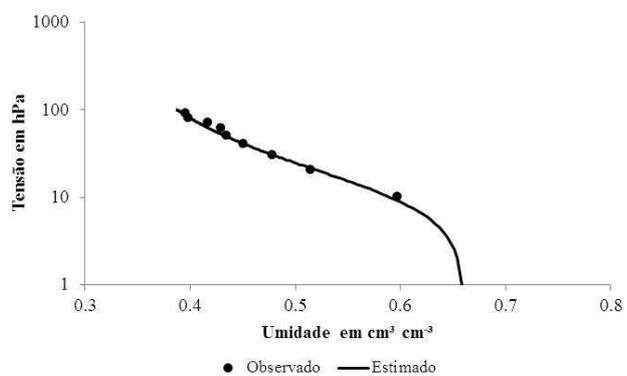


(S2)

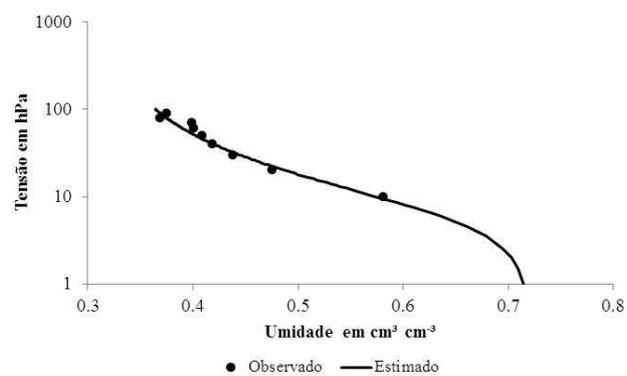


(S3)

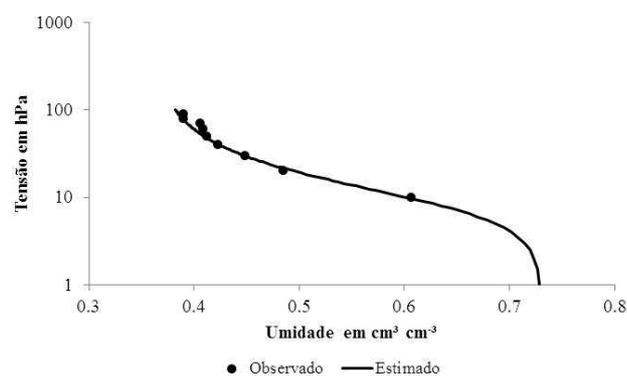
Gráfico 1 Curvas características de retenção de água dos substratos.



(S4)



(S5)



(S6)

Gráfico 2 Curvas características de retenção de água dos substratos.

Nota-se na Tabela 6 que houve efeito significativo dos diferentes substratos pelo teste F a 5% de probabilidade para distribuição das partículas dos substratos em tamanho de diâmetro, corroborando com Fermino (2003) que encontrou interação significativa entre os materiais e substratos estudados e as malhas das peneiras.

Tabela 6 Resumo da análise de variância com os quadrados médios de distribuição das partículas dos substratos em tamanho de diâmetro (mm). Lavras – MG, 2013.

Fv	Gl	>0,250	0,250-0,425	0,425-0,850	0,850-1,700	1,700-2,800	2,800-4,750	<4,75
Subst.	5	69,8*	9,31 <sup>NS</sup>	45,8*	135*	99,53*	8,780*	362,939*
Erro	24	10,718	14,939	11,585	17,818	7,330	2,927	19,467
CV(%)		21,45	26,25	20,01	20,59	18,05	18,23	44,57

\* significativo a 1% de probabilidade pelo teste F e NS não significativo

Os substratos avaliados apresentaram diferente distribuição do tamanho de partículas (Tabela 7).

Tabela 7 Valores médios da distribuição do tamanho das partículas (%), nos substratos. Lavras – MG, 2013.

Substrato	> 0,250	0,250-0,425	0,425-0,850	0,850-1,700	1,700-2,800	2,800-4,750	<4,750
S1	13,56ab	13,61a	19,23ab	24,423a	20,137a	6,885a	2,2bc
S2	15,21ab	13,564a	14,842ab	12,09c	9,115c	9,640ab	26,020a
S3	10,884b	16,244a	16,178ab	15,515bc	11,875bc	10,362a	19,020a
S4	19,120a	15,62a	21,272a	20,617ab	14,323ab	8,461ab	0,9978c
S5	20,152a	15,538a	16,582ab	23,041ab	10,657bc	9,116ab	4,948bc
S6	11,974b	12,856a	13,294b	23,235a	18,951a	9,884ab	10,822b

Médias seguidas pela mesma letra minúscula, na coluna, não diferem entre si, a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

A caracterização da distribuição do tamanho das partículas evidenciou que no substrato S6 um grande número de partículas entre 0,850 e 1,7 mm. De acordo com Abad, Noguera e Carrión (2004), partículas com diâmetro maior que 1,0 mm formam poros responsáveis pelo armazenamento de ar e partículas com diâmetro entre 0,25 mm e 1,0 mm formam poros responsáveis pelo armazenamento de água facilmente disponível às plantas.

O substrato S1 foi o que apresentou maior valor médio de espaço aeração entre os substratos estudados, provavelmente a mistura de diversos componentes, tenha contribuído para este resultado, haja vista que segundo Paiva e Gomes (2000), a aeração do substrato depende da quantidade e do tamanho das partículas que definem a sua textura. Deve-se considerar ainda que a composição e a forma das partículas dos substratos têm influência na porosidade de aeração.

Os resultados encontrados mostram que os substratos apresentaram algumas propriedades físicas próximas ao indicado para determinadas plantas e que estas propriedades variam em função da constituição, da granulometria do substrato (BELLÉ; KÄMPF, 1994; FERRAZ; CENTURION; BEUTLER, 2005; SANTOS; CASTILHO; DUARTE, 2002). Contudo, somente por meio da avaliação do desenvolvimento das plantas nos diferentes substratos é presumível inferir se as propriedades físicas desses substratos estão apropriadas ou não. Ainda, nesse aspecto, deve-se considerar que é difícil obter um substrato que atenda todas as características físicas ideais para determinada cultura, devendo-se selecionar as características mais importantes do substrato para o crescimento de cada espécie vegetal (FERRAZ; CENTURION; BEUTLER, 2005).

### 3.2 Dinâmica das características químicas do substrato

Observa-se no Gráfico 3 que a maioria dos substratos avaliados apresentou perfil de liberação de potássio praticamente constante, ou seja, o substrato já teria liberado o máximo de  $K^+$  na primeira hora de extração. Segundo Broschat (1995), a lixiviação de potássio é relativamente constante, entretanto os substratos S5 e S1 apresentaram um aumento significativo da liberação de K com o passar das horas, sendo mais expressivo no substrato S1, esse evento pode ser explicado pelo alto valor de potássio presente neste substrato (Tabela 2), e também pela diversidade de matérias que fazem parte da sua composição, como a presença de fibra da casca de coco e vermiculita. Noguera, Abad e Noguera (2000) relatam grande variação nos teores de potássio em fibra da casca de coco, variando de 116,0 a 2.059,0  $mg\ kg^{-1}$ . Fochesato et al. (2008), trabalhando com alterações das características químicas de três substratos comerciais na produção de mudas cítricas na fase de repicagem, encontraram valores variando de 274,0 a 742,0  $mg\ kg^{-1}$ .

O substrato S3 foi o que liberou a menor quantidade de potássio até 36 h, provavelmente o mesmo deve apresentar baixa quantidade de potássio trocável.

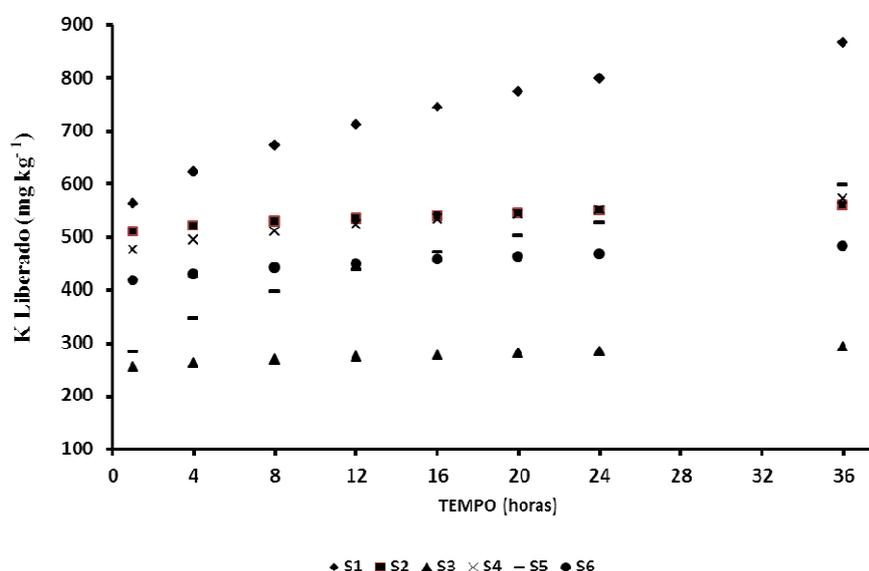


Gráfico 3 Liberação de potássio dos substratos S1, S2, S3, S4, S5 e S6, em função do tempo.

A quantificação da liberação do potássio nos substratos apresentou altos valores (MINAMI; SALVADOR, 2010), ou seja, 253 a 864 mg kg<sup>-1</sup> para os tempos de uma e trinta e seis horas de ensaio, respectivamente. Este evento pode ser explicado pela alta mobilidade do potássio no substrato, um dos nutrientes mais extraídos pelas plantas (MALAVOLTA, 1980), facilmente lixiviável principalmente na forma solúvel, forma em que as plantas o utilizam.

Segundo Minami e Salvador (2010), a maioria dos produtores que usa substrato em recipiente, irriga mais do que o necessário, deixando um pouco de água escorrer. Isso provavelmente arrasta nutriente, e se a água contém algum tipo de nutriente solúvel, perde-se por excesso. Deste modo as plantas demandam aplicações periódicas de nutrientes, que devem ser frequentes devido à alta lixiviação dos mesmos.

A descrição da cinética de liberação do potássio pela equação parabólica de difusão (FEIGENBAUM; EDELSTEIN; SHAINBERG, 1981) indicou que

durante os períodos de ensaios, ocorreram diferentes comportamentos de liberação do nutriente entre os substratos estudados (Gráfico 4).

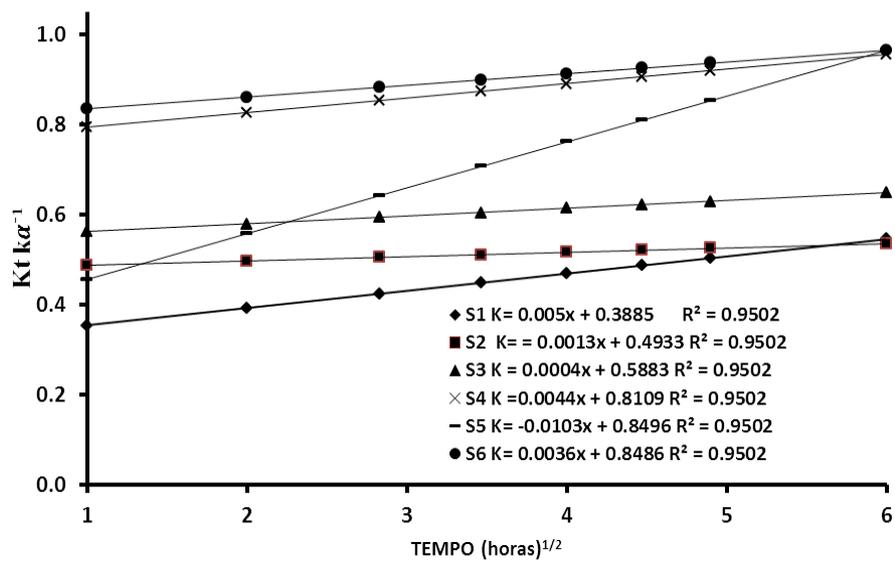


Gráfico 4 Cinética de liberação de potássio dos substratos S1, S2, S3, S4, S5 e S6, descrita pela equação parabólica de difusão.

#### **4 CONCLUSÕES**

Os seis substratos estudados possuem diferentes capacidades de retenção de água e ar, em função, principalmente, de sua granulometria.

Após análises dos resultados de liberação do potássio conclui-se que grande quantidade de potássio pode ser lixiviada, com diferentes comportamentos de liberação do nutriente entre os substratos estudados.

Contudo, somente por meio da avaliação do desenvolvimento das plantas nos diferentes substratos é presumível inferir se as propriedades físicas e químicas desses substratos estão apropriadas ou não.

## REFERÊNCIAS

ABAD, M. B.; NOGUERA, P. M.; CARRIÓN, C. B. Los sustratos en los cultivos sin suelo. In: URRESTARAZU, M. G. (Ed.). **Tratado de cultivo sin suelo**. Madrid: Mundi, 2004. p. 113-158.

BALLARIN, M. C. C. Nutricion mineral y abonado para cultivo em sustratos de baja actividad química. In: BARBOSA, J. et al. (Ed.). **Nutrição e adubação de plantas cultivadas em sustratos**. Viçosa, MG: UFV, 2004. p. 92-105.

BARRETO, C. V. G.; TESTEZLAF, R.; SALVADOR, C. A. Dinâmica do potencial matricial em sustratos de pinus e coco sob ação da capilaridade. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 30, n. 1, p. 26-31, 2012.

BELLÉ, S.; KÄMPF, A. N. Utilização de casca de arroz carbonizada como condicionador hortícola para um solo orgânico. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 29, n. 8, p. 1265-1271, ago. 1994.

BOODT, M. de; VERDONCK, O. The physical properties of the substrates in floriculture. **Acta Horticulturae**, Wageningen, v. 26, p. 37-44, 1972.

BOODT, M. de; VERDENCK, O.; CAPPAERT, I. Method for measuring the wasterreleases curve of organic substrates. **Acta Horticulturae**, Wageningen, v. 37, p. 2054-2062, 1974.

BROSCHAT, T. K. Nitrate, phosphate and potassium leaching from container-grown plants fertilized by several method. **HortScience**, Alexandria, v. 30, n. 1, p. 75-78, Feb. 1995.

BUNT, A. C. Physical properties of mixtures of peats and minerals of different particle size and bulk density for potting substrates. **Acta Horticulturae**, Wageningen, v. 150, p. 143-153, 1983.

BURÉS, S. **Sustratos**. Madrid: Ediciones Agrotécnicas, 1997. 341 p.

CARNEIRO, J. G. de A. **Produção e controle de qualidade de mudas florestais**. Curitiba: UFPR/FUPEF, 1995. 451 p.

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION. **EN 13651**: soil improvers and growing media: extraction calcium chloride/DTPA (CAT) soluble elements. Brussels, 2003. 20 p.

CORÁ, J. E.; FERNANDES, C. Curva característica de retenção de água para substratos. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE SUBSTRATOS PARA PLANTAS, 6., 2008, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: UFCE, 2008. 1 CD-ROM.

DHILLON, S. K.; SIDHU, P. S.; BANSAL, R. C. Release of potassium from some benchmark soils of India. **Journal of Soil Science**, London, v. 40, p. 783-797, 1989.

ELKHATIB, E. A.; HERN, J. L. Kinetics of potassium desorption from Appalachian soils. **Soil Science**, Baltimore, v. 145, p. 11-19, 1988.

FEIGENBAUM, S.; EDELSTEIN, R.; SHAINBERG, I. Release rate of potassium and structural cations from micas to ion exchangers in dilute solutions. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v. 45, p. 501-506, 1981.

FERMINO, M. H. **Métodos de análise para caracterização física de substratos para planta**. 2003. 89 f. Tese (Doutorado em Fitotecnia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

FERNANDES, C.; CORA, J. E.; BRAZ, L. T. Alterações nas propriedades físicas de substratos para cultivo de tomate cereja, em função de sua reutilização. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 24, n. 1, p. 94-98, 2006.

FERRAZ, M. V.; CENTURION, J. F.; BEUTLER, A. N. Caracterização física e química de alguns substratos comerciais. **Acta Scientiarum. Biological Sciences**, Maringá, v. 27, abr./jun. 2005. Disponível em: <<http://redalyc.uaemex.mx/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=187117421003>>. Acesso em: 10 mar. 2013.

FERREIRA, D. F. Análises estatísticas por meio do SISVAR para Windows versão 4.0. In: REUNIÃO ANUAL DA REGIÃO BRASILEIRA DA SOCIEDADE INTERNACIONAL DE BIOMETRIA, 45., 2000, São Carlos. **Anais...** São Carlos: UFSCar, 2000. p. 255-258.

FOCHESATO, M. L. et al. Alterações das características químicas de três substratos comerciais na produção de mudas cítricas. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 4, p. 1040-1046, jul./ago. 2008.

GENUCHTEN, M. T. van. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v. 44, p. 892-898, 1980.

GRASSI FILHO, H.; SANTOS, C. H. Importância da relação entre os fatores hídricos e fisiológicos no desenvolvimento de plantas cultivadas em substratos. In: BARBOSA, J. G. et al. (Ed.). **Nutrição e adubação de plantas cultivadas em substrato**. Viçosa, MG: UFV, 2004. p. 78-91.

HAVLIN, J. L.; WESTFALL, D. G.; OLSEN, S. R. Mathematical models for potassium release kinetics in calcareous soils. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v. 49, p. 371-376, 1985.

KEMPER, W. D.; ROSENAU, R. C. Aggregate stability and size distribution. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods**. 2<sup>nd</sup> ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986. p. 425-442.

MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1980. 251 p.

MINAMI, K.; SALVADOR, E. D. **Substrato para plantas**. Piracicaba: USP/ESALQ; Degaspari, 2010. 209 p.

NOGUERA, P.; ABAD, M.; NOGUERA, V. Coconut coir waste, a new and viable ecologically-friendly peat substitute. **Acta Horticulturae**, Wageningen, v. 517, n. 34, p. 279-286, Mar. 2000.

PAIVA, H. N.; GOMES, J. M. **Viveiros florestais**. Viçosa, MG: UFV, 2000. 56 p.

SANTOS, F.; CASTILHO, R.; DUARTE, E. Caracterização físico-química de sete componentes de substratos recomendados para uso em floricultura. **Cultura Agrônômica**, Ilha Solteira, v. 11, n. 1, p. 81-92, 2002.

SCHMITZ, J. A. K. et al. Propriedades químicas e físicas de substratos de origem mineral e orgânica para o cultivo de mudas em recipientes. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 32, n. 6, p. 937-944, nov./dez. 2002.

SILVA, V. A. et al. Cinética de liberação do potássio em solos de regiões cafeeiras: efeito de ácidos orgânicos. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 1., 2000, Poços de Caldas. **Resumos Expandidos...** Brasília: EMBRAPA Café; Belo Horizonte: MINASPLAN, 2000. p. 1408-1411.

SODRÉ, G. A. **Substratos e estaquia na produção de mudas de cacauero**. 2007. 84 f. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) - Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2007.

THEBALDI, M. S. **Irrigação de mudas de espécies florestais nativas produzidas em tubetes**. 2011. 93 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.

WILSON, G. C. S. The physico-chemical and physical properties of horticultural substrates. **Acta Horticulturae**, Wageningen, v. 150, p. 19-33, 1983.

### **CAPÍTULO 3**

#### **DIFUSIVIDADE E CONDUTIVIDADE HIDRAULICA DE SUBSTRATOS PARCIALMENTE SATURADOS**

## 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. Os testes foram feitos no laboratório de hidráulica da Universidade Federal de Lavras, com o objetivo de determinar a condutividade hidráulica de substratos parcialmente saturada, usando o método proposto por Bruce e Klute (1956), em diferentes substratos. Foram realizados ensaios de fluxo horizontal para estimar a difusividade e, por meio desta, a condutividade hidráulica não saturada. O ajuste da umidade em função da variável de Boltzman foi realizado por meio do modelo matemático similar de Genuchten (1980), para facilitar as operações de derivações necessárias aos cálculos da difusividade, já que os dados apresentaram comportamento similar. Há influência da combinação das misturas na composição dos substratos, no avanço da frente de umedecimento. Em geral, os substratos apresentaram valores para o índice de concordância e eficiência do modelo igual ou próximo à unidade (1,00), o que sinaliza para o bom desempenho do modelo proposto, sendo o mesmo comprovado pelos altos valores do coeficiente de determinação da regressão (todos acima de 99%). A taxa com que a umidade se expande 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. Ocorre uma nítida diminuição da  $K(\theta)$  após o aumento da tensão, especialmente, no substrato S3, enquanto que para o substrato S5 os valores foram tão pequenos que não se destacam entre os demais. A condutividade hidráulica não saturada aumenta com o aumento da umidade de forma exponencial.

**Palavras-chave:** Substrato. Fluxo. Movimento.

## 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. Tests were carried at the Hydraulics Laboratory of the Federal University of Lavras, in order to determine the hydraulic conductivity of partially saturated substrates, using the method proposed by Bruce and Klute (1956), on different substrates. Flow tests were conducted to estimate the horizontal diffusivity and, through this, the unsaturated hydraulic conductivity. Fitting of water content versus Boltzmann variable was performed using a mathematical model that facilitate the operations required for calculating diffusivity. There were influence of the combination of mixtures in the composition of the substrates upon the advance behavior of the wetting front. In general, the substrates had values for the index of concordance and efficiency of the model equal or close to unity (1.00), which signals to the good performance of the proposed model, the same being proved by the high coefficient of determination regression (all above 99%). The rate at which the moisture expands in space and time occurs differently among substrates, especially substrates S2 and S5, which had lower and higher diffusivity, respectively. There is a sharp decrease in K after increasing tension, especially on the substrate S3, 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.

**Keywords:** Substrate. Flow. Movement.

## 1 INTRODUÇÃO

Muitos autores têm procurado estabelecer modelos matemáticos para estimar as propriedades hidráulicas dos meios porosos a partir de outros modelos mais facilmente mensuráveis.

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. Os modelos resultantes geralmente contêm parâmetros independentes que podem ser 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. As premissas válidas em física de solos são parcialmente aplicáveis para substratos. A condutividade hidráulica do substrato modifica-se com as particularidades das partículas, com o seu conteúdo de água e com a sua geometria porosa.

Quando ocorre a contração das raízes e do substrato com o secamento, reduz-se o contato substrato-raiz, o que aumenta às resistências a absorção, pois os poros grandes, onde a força da capilaridade é relativamente menor, são esvaziados primeiramente. Baixas temperaturas e aeração deficiente também reduzem a permeabilidade das raízes, aumentando a resistência à entrada da água (KRAMER; BOYER, 1995). Raviv et al. (1999) ressaltam que significativas mudanças na condutividade hidráulica, no fluxo de água e nutrientes são esperadas entre irrigações, mesmo que o conteúdo de umidade seja mantido dentro do que é denominado água facilmente disponível. Em seu

trabalho, sugerem que a condutividade hidráulica do meio não saturado indica com maior precisão a disponibilidade de água às raízes do que a água facilmente disponível, essa última estabelecida a uma predeterminada faixa de sucção sem levar em consideração as características hidráulicas do material.

Wallach et al. (1992) determinaram a função a  $K(h)$  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 como 1 a 5 kPa. Caron e 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 acentuada elevação da condutividade hidráulica. Os mesmos autores afirmam que o uso de substrato com partículas de granulometrias finas também contribui para este fenômeno. A facilidade ao molhamento deve ser atribuída principalmente ao tamanho ou granulometria das partículas (MICHAEL et al., 2008).

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

A difusividade hidráulica da água é uma das funções mais importantes a ser determinada, sendo necessária na previsão da absorção de água pelas plantas (FEDDES et al., 1976) e estando relacionada com a evaporação de água. Diante deste contexto o objetivo com este trabalho foi determinar a condutividade hidráulica de diferentes substratos parcialmente saturados.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

Neste estudo foram utilizados seis substratos (S1, S2, S3, S4, S5 e S6) usados na produção de mudas em recipiente por possuírem diferentes características físico-hídricas. Os testes foram feitos no Laboratório de Hidráulica da Universidade Federal de Lavras. A difusividade da água no solo foi determinada usando o método proposto por Bruce e Klute (1956).

O avanço da frente de umedecimento foi observado em uma coluna horizontal (Figura 1). A coluna constituiu-se 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, para suporte apenas, porém com 20 cm expostos a 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.

Estes anéis foram montados em conjunto com fita adesiva, que cobriram cerca de metade do perímetro dos anéis. Preencheu-se a coluna em camadas, com quantidade de substrato igual ao 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 a bureta de marionete por onde se obteve um conteúdo de água  $\theta_i$  próximo à saturação em  $x=0$ , mantendo-se a entrada com pressão ligeiramente negativa com uma carga constante de  $-2,0$  cm no do centro da coluna.



Figura 1 Equipamento usado no ensaio de infiltração horizontal

Foi medido o intervalo de tempo, 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 que a para 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, à torneira de passagem de água foi fechada e a coluna de substrato foi seccionada em 15 partes, de cada anel, com auxílio de um estilete (Figura 2). A umidade de cada anel foi determinada pelo processo gravimétrico. Foram realizados 24 testes distintos, ou seja, quatro repetições para cada substrato.

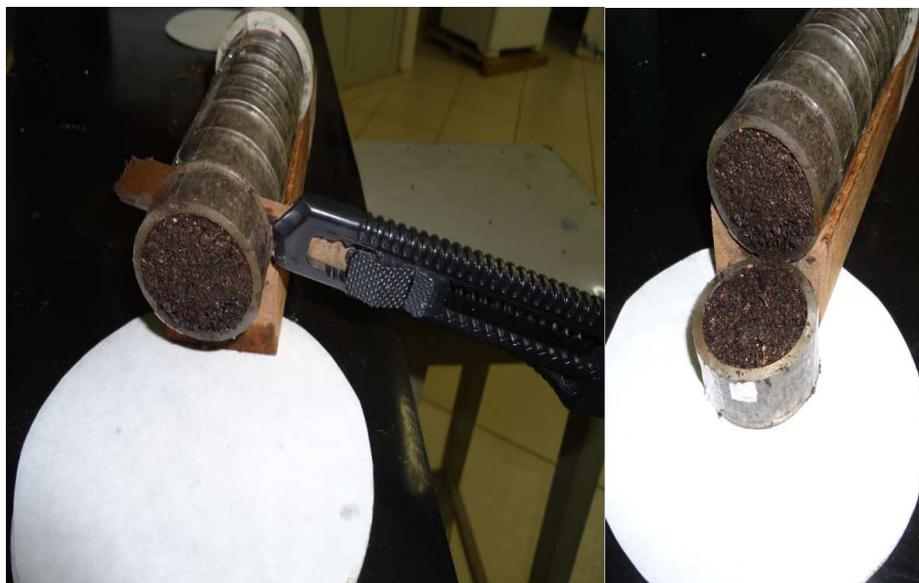


Figura 2 Seccionamento da coluna de substrato usada no ensaio de infiltração horizontal.

A difusividade é função da distância e do tempo, e pode ser obtida com a integração e derivação de duas funções. A 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, por isso há incoerência em estabelecer uma função direta de lambda em função da umidade. Com isso percebe-se que não existe função matemática que ilustre de forma adequada o comportamento das duas variáveis que possa ser diretamente usada 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, propõe-se empregar uma equação similar à equação de Genuchten para retenção de água, já que as curvas de  $\theta \times \lambda$  assemelham-se ao

formato de curvas de retenção  $\theta \times h$ . Isto permite que a derivada e a integral da função  $\theta(\lambda)$  possam ser determinadas analiticamente.

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 estimados e observados e facilitando a obtenção da inclinação da reta tangente a curva por meio da derivada da função. Estabeleceu-se assim, o mesmo modelo de ajuste para todos os substratos estudados. Como:

$$\theta(\lambda) = \theta_d + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (a\lambda)^b]^b} \quad (16)$$

Em que  $\lambda$  é a variável de Boltzmann,  $\lambda(x t^{-1/2})$ , com lambda dependente da distância e do tempo,  $\theta$  a umidade volumétrica ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ),  $\theta_r$  a umidade residual ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ),  $\theta_s$  a umidade de saturação ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) e  $\theta_d$  é a umidade higroscópica ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) dependente de  $\theta_r$ ,  $a$  e  $b$  são 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:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - E_i)^2} \quad (17)$$

$$MEA = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - E_i)^2 \quad (18)$$

$$d = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|E_i - \bar{O}| + |O_i + \bar{O}|)^2} \right] \quad (19)$$

$$E_f = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^n (O_i - E_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \right] \quad (20)$$

Onde,

$E_f$  = eficiência do modelo;

$n$  = número de dados;

$O_i$  = valor observado;

$\bar{O}$  = média do valor estimado;

$E_i$  = valor estimado.

Assim, determinou-se por meio da equação 7 a difusividade para pequenos incrementos de umidade. Com os valores da difusividade e o conhecimento da curva de retenção, determinou-se a condutividade hidráulica não saturada dos seis substratos estudados.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

No Gráfico 1 observa-se os dados do avanço da frente de molhamento com a raiz quadrada do tempo. É possível notar que a infiltração inicia rapidamente e diminui com a raiz quadrada do tempo; quanto menor for o coeficiente angular mais lento é o movimento de água no substrato.

Verifica-se que no substrato  $S_2$  não foi observado sinais de dificuldade de molhamento, principalmente quando se constatou que a velocidade do avanço da frente de molhamento avançou mais rapidamente, revelando boa capacidade de molhamento ao longo da coluna, e aos 108,7 min a frente de molhamento atingiu o final da coluna. Por outro lado, no substrato  $S_5$ , a frente de molhamento foi muito mais lenta, chegando a 4.144,00 min, os baixos valores de umidade podem comprometer a eficiência de molhamento, o que provavelmente se deve à mistura de vermiculita com turfa. Esse efeito pode ser explicado com base nos relatos de Miner (1994) em que a adição de areia fina ( $< 1$  mm) em turfa promoveu uma diminuição da capacidade de aeração.

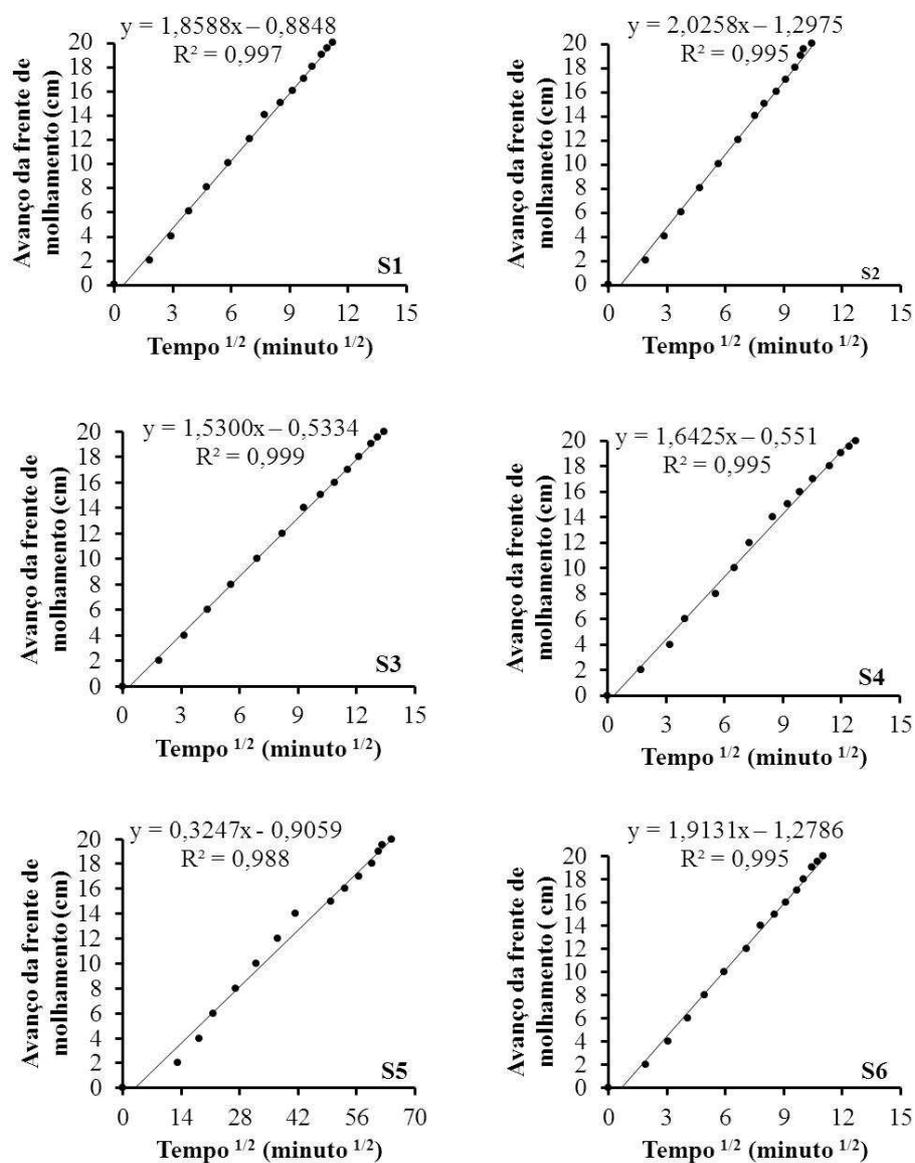


Gráfico 1 Avanço da frente de umedecimento em função da raiz quadrada do tempo, observado durante o ensaio de infiltração horizontal dos substratos estudados.

Barreto, Testezlaf e Salvador (2012), trabalhando com ascensão capilar de água em substrato de coco e de pinus, relatam 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 composição destes.

Calculou-se a variável de Boltzmann por meio dos dados de distância e do tempo, correspondente as distâncias da frente de umedecimento cujo comportamento está apresentado nos Gráfico 2 e 3, onde pode-se observar diferenças nas taxas de movimentação da água nos diferentes substratos avaliados em que os valores de umidade variaram de acordo com os diferentes tipos de substratos, em intervalos de 0,24 a 0,51 cm cm<sup>3</sup>. Os valores estimados (linha contínua) foram obtidos pela equação 16.

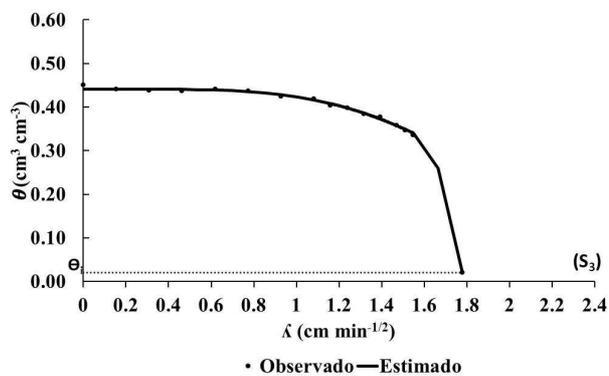
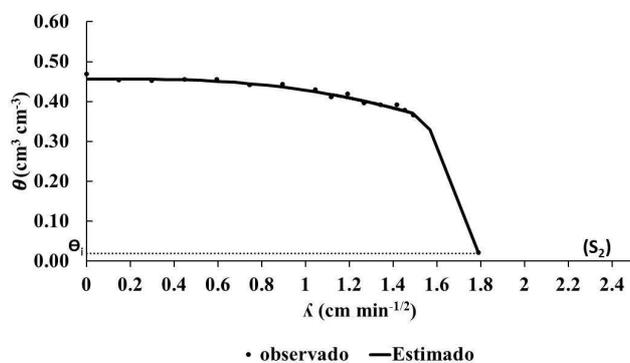
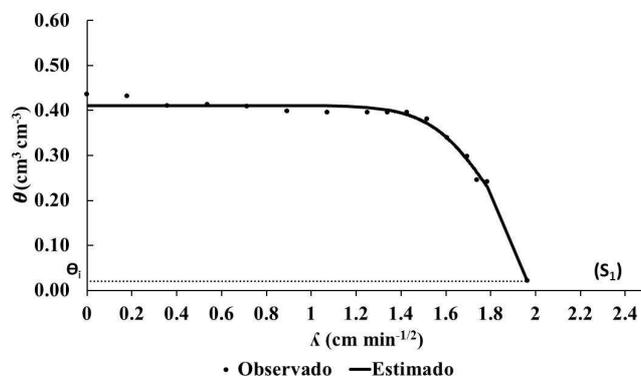


Gráfico 2 Curvas da distribuição do teor de umidade em função da variável de Boltzman do ensaio de infiltração horizontal para os substratos S1, S2 e S3.

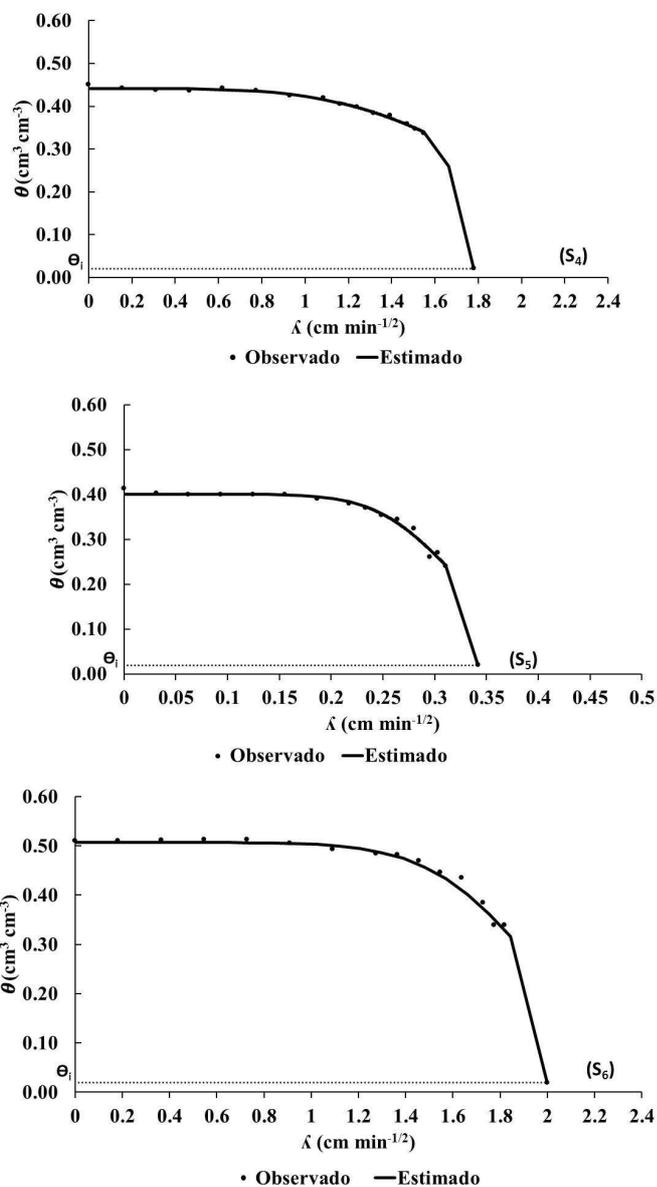


Gráfico 3 Curvas da distribuição do teor de umidade em função da variável de Boltzman do ensaio de infiltração horizontal para os substratos S4, S5 e S6.

Nos gráficos 2 e 3, os ajustes do modelo proposto foram feitos a partir da ferramenta Solver do Microsoft Excel 2007, cujos coeficientes de determinação altos, mostram que o modelo proposto (equação 16) descreve relativamente bem os dados observados (Tabela 1).

Tabela 1 Ajuste do modelo proposto aos dados de umidade volumétrica ( $\theta$ ) em função de lambda ( $\lambda$ ) para os diferentes substratos estudados. Lavras – MG, 2013.

Substratos	Modelo	R <sup>2</sup>
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

Na Tabela 2 é apresentada a avaliação do modelo proposto (equação 16) para ajustar os dados experimentais para pequenos incrementos de umidade em função de lambda, por meio da raiz quadrada da média dos quadrados dos erros (RMSE), na média dos erros (MEA), no índice de concordância (d) e na 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 2).

Tabela 2 Dados estatísticos obtidos para a validação do modelo utilizado para ajustar aos dados experimentais

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

Por meio do modelo proposto realizaram-se as operações de derivações necessárias para o cálculo da difusividade, conforme equações abaixo.

$$\frac{d\lambda}{d\theta} = -\frac{1}{a * b^2} \left[ \left( \frac{\theta_s - \theta_r}{\theta - \theta_d} \right)^{\frac{1}{b}} - 1 \right]^{\frac{1}{b}-1} * \left[ \frac{(\theta_s - \theta_r)^{\frac{1}{b}}}{(\theta - \theta_b)^{\frac{1}{b}+1}} \right] \quad (21)$$

Em que  $\theta$  é a umidade com base em volume;  $\lambda$  é a variável de Boltzmann a e b, são parâmetros de ajuste e  $\theta_d$  é o parâmetro dependente de  $\theta_r$ , equivalente à relação proposta,  $\theta_d = \frac{\theta_r}{1,5}$ .

Assumindo-se a expressão da  $D(\theta)$ , relacionada com a sortividade S por Brutsaert (1979), Reichardt, Nielsen e Biggar (1972) e White (1987), calculou-se a integral necessária para determinar a difusividade (equação 7), por meio da sortividade (equação 10), relacionando-a com área abaixo da curva  $\lambda$  vs  $\theta$  (gráfico 2 e 3).

De posse desses valores, empregou-se a equação 7, para obter a difusividade, para pequenos incrementos de umidade, possibilitando gerar uma série bem mais completa de dados. Vale ressaltar 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.

O comportamento dos valores médios de difusividade, são apresentados no gráfico 4. É possível observar que a difusividade aumenta expressivamente com a umidade do substrato, sendo que a habilidade com que a umidade se expande 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.

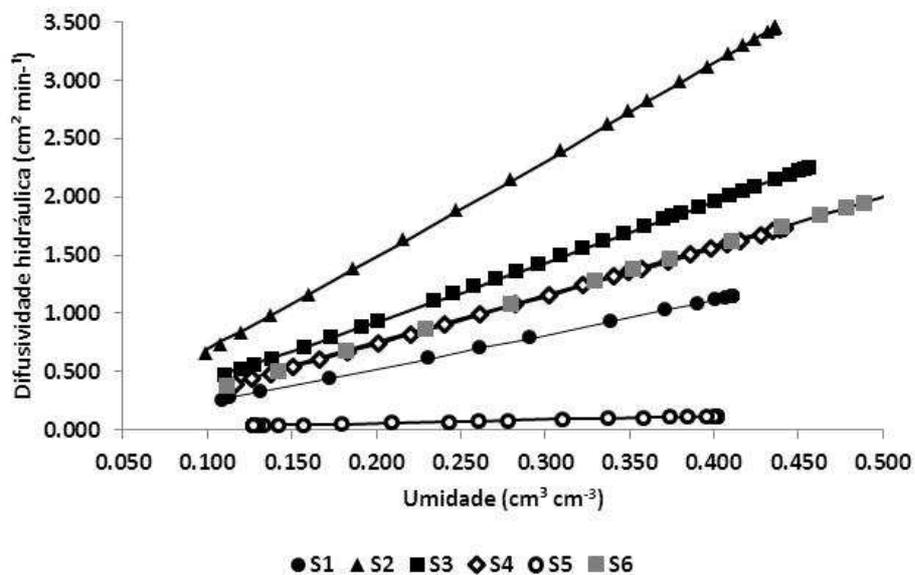


Gráfico 4 Difusividade dos substratos estudados.

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

$$D = a \times \theta^z \quad (22)$$

Em que  $\theta$  é a umidade com base em volume; a e z, são parâmetros de ajuste realizados a partir da ferramenta Solver do Microsoft Excel 2007.

Os dados dos ajustes da difusividade hidráulica em função da umidade volumétrica ( $\theta$ ) são apresentados na Tabela 3, cujos coeficientes de determinação foram altos.

Tabela 3 Dados obtidos dos Ajustes dos dados de difusividade hidráulica ( $D$ ) em função da umidade volumétrica ( $\theta$ ) para os diferentes substratos estudados. Lavras – MG, 2013.

Substratos	Modelo	R <sup>2</sup>
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

De acordo com Michael 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 exercem 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, Testezlaf e Salvador (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 (GONÇALVES, 1995), é muito utilizada em substrato devido à sua alta retenção de água (MELO et al., 2005) 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.

A condutividade hidráulica não saturada foi calculada, conhecendo-se para cada valor de umidade, a difusividade, por meio da equação 22 e a capacidade hídrica dos substratos, obtida pela tangente a curva de retenção no ponto (derivada  $d\theta/dh$ ), por meio da equação 21.

$$\frac{\partial\theta}{\partial h} = \frac{mn\alpha^n(\theta_r - \theta_s)h^{n-1}}{[1+(\alpha h)^n]^{m+1}} \quad (23)$$

Em que  $h$  é a sucção (modulo do potencial matricial),  $\theta$  e a umidade volumétrica, e  $\alpha$ ,  $m$  e  $n$  são parâmetros da equação de Genuchten.

Desta forma pode-se determinar a condutividade hidráulica não saturada (equação 7), cujo comportamento é apresentado no gráfico 5. Ao comparar as curvas com aquelas do gráfico 4 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 e Marfa (1995) e Ravivi 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  $0,00559 \text{ cm min}^{-1}$  para um valor de umidade volumétrica de  $0,457 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ . Esse resultado é similar aos encontrados por Londra (2010),

trabalhando com a determinação da condutividade hidráulica insaturada de cinco substratos.

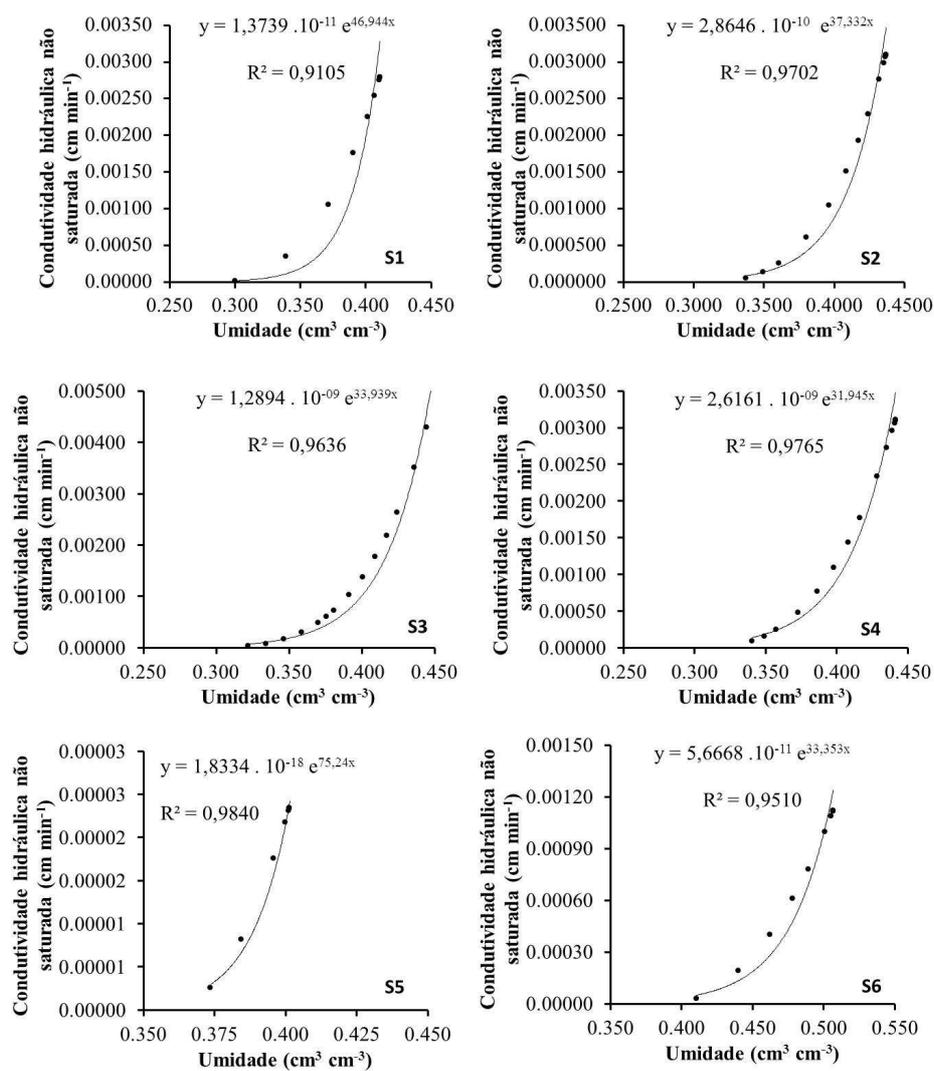


Gráfico 5 Condutividade hidráulica não saturada para os substratos estudados.

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 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 o gráfico 6 nota-se que todos os substratos avaliados, com exceção do substrato S5, apresentaram um decréscimo acentuado na condutividade hidráulica inicialmente elevado. De acordo com Ravivi 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 cheios de ar, de modo que o orifício condutor de água diminui, e os maiores poros tornam-se não condutores.

Observa-se no gráfico 6 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 que para o substrato S5 os valores foram tão pequenos que não se destaca entre os demais. Caron e Elrick (2005) afirmam que o uso de substratos com partículas de granulometrias finas também contribui para este fenômeno. Esse decréscimo se torna menos acentuado a partir da tensão 50 hPa. Comportamento similar foi encontrado por Caron e Elrick (2005), Londra (2010) e Raviv et al. (2002).

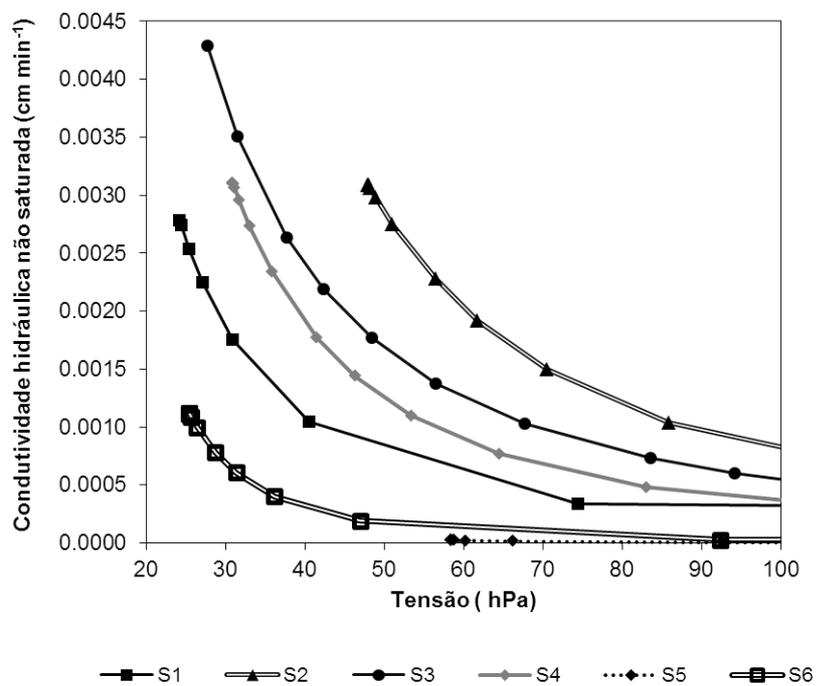


Gráfico 6 Condutividade hidráulica não saturada em função do potencial matricial para os diferentes substratos estudados.

#### 4 CONCLUSÕES

Há influência da combinação das misturas que fazem parte da composição dos substratos na velocidade do avanço da frente de umedecimento em experimento de infiltração horizontal.

A determinação de  $\frac{d\theta}{d\lambda}$  e da sortividade pode ser realizada analiticamente a partir do modelo matemático proposto. A difusividade variou com a umidade do substrato.

A capacidade com que a umidade se expande no espaço e no tempo ocorrem de maneira diferenciada entre os substratos avaliados, destacando-se os substratos S5 e S2, que tiveram menor e maior difusividade, respectivamente.

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

Ocorre uma nítida diminuição da  $K(\theta)$  após o aumento da tensão, especialmente, no substrato S3, enquanto que para o substrato S5 os valores foram tão pequenos que não se destacam entre os demais.

Os substratos apresentaram algumas propriedades físico-hídricas próximas ao indicado para determinadas plantas, estas propriedades variam principalmente em função da constituição, da granulometria do substrato. Porém, somente por meio da avaliação do desenvolvimento das plantas nos diferentes substratos é possível concluir se as propriedades físicas desses substratos estão apropriadas ou não.

## REFERÊNCIAS

BARRETO, C. V. G.; TESTEZLAF, R.; SALVADOR, C. A. Ascensão capilar de água em substratos de coco e de pinus. **Bragantia**, Campinas, v. 71, n. 3, p. 385-399, 2012.

BRUCE, R. R.; KLUTE, A. The measurement of soil moisture diffusivity. **Soil Science Society of America**, Madison, v. 20, p. 458-462, 1956.

BRUTSAERT, W. Universal constants for scaling the exponential soil water diffusivity. **Water Resources Research**, Washington, v. 815, p. 481-483, 1979.

CARON, J.; ELRICK, D. Measuring the unsaturated hydraulic conductivity of growing media with a tension disc. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 69, n. 3, p. 783-793, May 2005.

FEDDES, R. A. et al. Simulation of field water uptake plants using a soil water dependent root extraction function. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 31, p. 13-26, 1976.

GENUCHTEN, M. T. van. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v. 44, p. 892-898, 1980.

GONÇALVES, A. L. Substratos para produção de mudas de plantas ornamentais. In: KÄMPF, A. N. (Ed.). **Análise física de substratos para plantas**. Viçosa, MG: SBCS, 2001. p. 5-7. (Boletim Informativo, 26).

KLUTE, A.; DIRKSEN, C. Hydraulic conductivity and diffusivity: laboratory methods. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis: part 1**. 2<sup>nd</sup> ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986. p. 687-732.

KRAMER, P. J.; BOYER, J. S. **Water relations of plants and soils**. San Diego: Academic, 1995. 495 p.

LONDRA, P. A. Simultaneous determination of water retention curve and unsaturated hydraulic conductivity of substrates using a steady-state laboratory method. **HortScience**, Alexandria, v. 45, n. 7, p. 1106-1112, 2010.

MELO, G. W. B. et al. **Produção de morangos no sistema semi-hidropônico**. Bento Gonçalves: EMBRAPA Uva e Vinho, 2005. 24 p.

MICHEL, J. C. et al. Water repellency of organic growing media and its consequences on their hydraulic properties. **Acta Horticulturae**, Wageningen, v. 779, n. 121, p. 121-129, 2008.

MINER, J. A. **Substratos: propiedades y caracterización**. Madrid: Mundi, 1994. 172 p.

MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. **Water Resources Research**, Wasgehington, v. 12, n. 3, p. 513-522, 1976.

OROZCO, R.; MARFA, O. Granulometric alteration, air entry potential and hydraulic conductivity in perlites used in soilless cultures. **Acta Horticulturae**, Wageningen, n. 408, p. 147-161, Dec. 1995.

RAVIV, M. et al. Effect of hydraulic characteristics of volcanic materials on yield of roses grown in soilless culture. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, Alexandria, v. 124, n. 2, p. 205-209, 1999.

\_\_\_\_\_. **Substrates and their analysis: agricultural research organization**. Wageningen: Department of Ornamental Horticulture, 2002. 77 p.

REICHARDT, K. D.; NIELSEN, D. R.; BIGGAR, J. W. Scaling of infiltration into homogeneous soils. **Soil Science Society of America**, Madison, v. 36, p. 240-245, 1972.

WALLACH, R.; SILVA, F. F. da; CHEN, Y. Unsaturated hydraulic characteristics of composted agricultural wastes, tuff and mixtures. **Soil Science**, Baltimore, v. 153, n. 6, p. 434-441, June 1992.

WHITE, I. Comments on 'Sortivity approximations' by Kutilek and Valentova. **Transport in Porous Media**, Cambridge, v. 2, p. 317-322, 1987.