

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E  
AMBIENTAL**

**AVALIAÇÃO DA DINÂMICA DA ÁGUA NA ZONA VADOSA  
EM SOLOS DE DIFERENTES USOS COM O MODELO  
HYDRUS-1D**

**ALINE DE ALMEIDA MOTA**

**FLORIANÓPOLIS  
Março/2010**

**ALINE DE ALMEIDA MOTA**

**AVALIAÇÃO DA DINÂMICA DA ÁGUA NA ZONA VADOSA EM  
SOLOS DE DIFERENTES USOS COM O MODELO HYDRUS-1D**

Trabalho apresentado à Universidade  
Federal de Santa Catarina para Conclusão  
do Curso de Graduação em Engenharia  
Sanitária e Ambiental

Orientador: Prof. Masato Kobiyama, Dr.

**FLORIANÓPOLIS**  
**Março/2010**

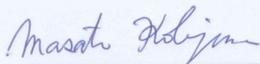
**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL**

**AVALIAÇÃO DA DINÂMICA DA ÁGUA NA ZONA VADOSA EM SOLOS DE  
DIFERENTES USOS COM O MODELO HYDRUS-1D**

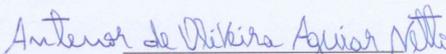
**ALINE DE ALMEIDA MOTA**

**Trabalho submetido à Banca Examinadora como parte dos requisitos para  
Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental –  
TCC II**

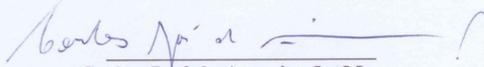
**BANCA EXAMINADORA:**



**Prof. Masato Kobiyama, Dr.**  
(Orientador)



**Prof. Antenor de Oliveira Aguiar Netto, Dr.**  
(Membro da banca)



**Carlos José de Amorim Jr, Msc.**  
(Membro da banca)

**FLORIANÓPOLIS, (SC)  
MARÇO/2010**

## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu orientador, Prof. Masato Kobiyama, pela amizade, paciência e pelos ensinamentos imprescindíveis para a realização deste trabalho.

Ao meu pai, mãe e irmãos, pelo amor, apoio e incentivo em todos os momentos.

Aos amigos do Laboratório de Hidrologia, pela ajuda na realização dos ensaios, pelas discussões científicas, companheirismo e amizade.

Aos amigos e colegas, que mesmo de maneira indireta colaboraram para a conclusão deste trabalho, com amizade e compreensão.

Muito obrigada!

## RESUMO

Atualmente existe a busca constante pelo aprimoramento do planejamento territorial. O uso do solo é uma das questões mais importantes nesse planejamento, especialmente a fim de gerenciar os recursos hídricos. Tal uso influencia diretamente nos processos hidrológicos, e esses recursos são fundamentais para o desenvolvimento humano. Uma das ferramentas úteis para auxiliar no planejamento territorial é a modelagem. Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a dinâmica da água na zona vadosa em diferentes usos do solo com a aplicação do modelo HYDRUS-1D, na região de Rio Negrinho/SC. Para isso, adotou-se quatro tipos de uso do solo para comparação: pastagem, reflorestamento, floresta nativa e agricultura (solo nu). Em laboratório, foram determinadas textura, condutividade hidráulica saturada e umidade saturada (porosidade total) de solos em duas diferentes profundidades para cada uso do solo. Com a aplicação do *Rosetta Lite Version 1.1*, que utiliza funções de pedotransferência, determinou-se os parâmetros de van Genuchten (1980). Os perfis de  $\Psi$  e  $\theta$ , obtidos com HYDRUS-1D, foram suficientes para identificar a variabilidade da dinâmica da água no solo. Mata Nativa é o que apresenta a frente de molhamento mais lenta.

**PALAVRAS-CHAVE:** Dinâmica da água no solo, uso do solo, HYDRUS-1D.

## ABSTRACT

Currently the search for the improvement of territorial planning is noted. Land use is one of the most important issues in this planning, especially for water resources management. The land use influences directly on hydrological processes, and these resources are fundamental to human development. One of the useful tools to support the territorial planning is the modeling. Thus, the present study aimed to evaluate water dynamics in the vadose zone in different land uses on by using the HYDRUS-1D model in the region of Rio Negrinho/SC. For comparative study, four types of land use: pasture, reforestation, native forest and agriculture (bare soil) were selected. Texture, saturated hydraulic conductivity and saturated water content (total porosity) of soils at two different depths for each land use were determined in laboratory. Applying *Rosetta Lite Version 1.1*, that implements pedotransfer functions, the parameters of van Genuchten (1980) were determined. The time-variation profiles of  $\Psi$  and  $\theta$  were obtained with HYDRUS-1D. They are satisfactorily clear to identify the variability of soil water dynamics. Native Forest presented the slower wetting front movement.

**KEY-WORDS:** Soil-water dynamics, land use, HYDRUS-1D.

## SUMÁRIO

<b>RESUMO</b> .....	iii
<b>ABSTRACT</b> .....	iv
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	vi
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	viii
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b> .....	ix
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	3
<b>2.1 Objetivo geral</b> .....	3
<b>2.2 Objetivos específicos</b> .....	3
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	4
<b>3.1 Propriedades hidráulicas do solo</b> .....	4
3.1.1 <i>Curva característica de retenção</i> .....	4
3.1.2 <i>Condutividade hidráulica</i> .....	5
3.1.3 <i>Umidade do solo</i> .....	6
<b>3.2 Equações de van Genuchten</b> .....	6
<b>3.3 Equação de Richards</b> .....	7
<b>3.4 O modelo HYDRUS-1D</b> .....	7
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	11
<b>4.1 Área de estudo</b> .....	11
<b>4.2 Análise do solo</b> .....	12
4.2.1 <i>Coleta em campo</i> .....	12
4.2.2 <i>Ensaio das amostras em laboratório</i> .....	14
<b>4.3 Caracterização do solo com as equações de van Genuchten</b> .....	17
<b>4.4 Simulação da dinâmica da água na zona vadosa: modelo HYDRUS-1D</b> .....	17
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	20
<b>5.1 Ensaios de laboratório</b> .....	20
<b>5.2 Simulação</b> .....	23
<b>6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b> .....	28
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	29

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.	Curvas de retenção de água resultante dos parâmetros médios de van Genuchten para cada classe textural. (adaptação de Hodnett & Tomasella, 2002).....	5
FIGURA 2.	Dados de armazenamento de água no solo medidos e simulados. (adaptação de Scanlon et al., 2002).....	10
FIGURA 3.	Localização dos pontos de coleta: AG corresponde a agricultura, PT a pastagem, PN a pinus e N a mata nativa....	11
FIGURA 4.	Tradagem para coleta de amostra deformada.....	13
FIGURA 5.	Coleta de amostra não-deformada.....	14
FIGURA 6.	Análise granulométrica. (a) Agitador elétrico; (b) Copo agitador; (c) Proveta de 1000 ml; e (d) Proveta com o densímetro .....	15
FIGURA 7.	Ensaio do permeâmetro de carga variável. (a) Amostras não deformadas em processo de saturação; (b) Pipeta graduada para medir o volume de água durante o ensaio; (c) Principais peças constituintes do permeâmetro de carga variável; e (d) Colocação da amostra imediatamente antes da realização de ensaio .....	16
FIGURA 8.	Fluxograma do modelo HYDRUS-1D.....	18
FIGURA 9.	Perfis considerados na simulação dos diferentes usos do solo, com as medidas em cm. (a) Mata nativa; (b) Agricultura; (c) Pinus; e (d) Pastagem. ....	18
FIGURA 10.	Correlação entre $K_s$ das camadas de 15 e 45 cm de profundidade. (a) Medidos no ensaio de laboratório, e (b) Obtidos pela aplicação do <i>Rosetta Lite Version 1.1</i> .....	22
FIGURA 11.	Perfis de $\Psi$ obtidos pela simulação com HYDRUS-1D. (a) AG estimado; (b) AG medido; (c) N estimado; (d) N medido; (e) PT estimado; (f) PT medido; (g) PN estimado; (h) PN medido; (i) PNI estimado; (j) PNI medido. (AG: agricultura; N: mata nativa; PT: pastagem; PN: pinus; PNI: pinus com interceptação; T0 = 0; T1 = 7,2 h; T2 = 14,4 h; T3 = 21,6 h; T4 = 28,8 h; e T5 = 36 h).....	25
FIGURA 12.	Perfis de $\theta$ obtidos pela simulação com HYDRUS-1D. (a) AG estimado; (b) AG medido; (c) N estimado; (d) N medido; (e) PT estimado; (f) PT medido; (g) PN estimado; (h) PN medido; (i) PNI estimado; (j) PNI medido. (AG: agricultura; N: mata nativa; PT: pastagem;	

PN: pinus; PNI: pinus com interceptação; T0 = 0; T1 = 7,2 h; T2 = 14,4 h; T3 = 21,6 h; T4 = 28,8 h; e T5 = 36 h)..... 27

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1. Pesquisa bibliográfica de alguns autores que aplicaram o modelo do HYDRUS-1D .....	9
TABELA 2. Discretização em espaço utilizada nas simulações e a profundidade dos perfis.....	19
TABELA 3. Resultados das análises de textura dos solos.....	20
TABELA 4. Propriedades hidráulicas do solo: (a) Medidos; (b) Estimados pela textura aplicando <i>Rosetta Lite Version</i> 1.1; e (c) Aproximação do medidos .....	21
TABELA 5. Parâmetros de retenção de água e $K_s$ obtidos pela aplicação de <i>Rosetta Lite Version</i> 1.1 .....	22

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Descrição</b>	<b>Unidade</b>
$C(\Psi)$	Capacidade específica de retenção	$[L^{-1}]$
$g$	Aceleração da gravidade	$[LT^{-2}]$
$K$	Condutividade hidráulica	$[LT^{-1}]$
$K_s$	Condutividade hidráulica saturada	$[LT^{-1}]$
$m$	Parâmetro de ajuste	[-]
$m_S$	Massa das partículas sólidas	[M]
$m_T$	Massa total	[M]
$u_m$	Massa total úmida	[M]
$n$	Parâmetro de ajuste	[-]
$p$	Pressão	[L]
$S$	Grau de saturação	[%]
$t$	Tempo	[T]
$u$	Umidade a base de massa	$[MM^{-1}]$
$V_T$	Volume total da amostra	$[L^3]$
$z$	Profundidade da camada	[L]
$\alpha$	Parâmetro de ajuste	$[L^{-1}]$
$\Delta z$	Discretização em espaço	[L]
$\theta$	Umidade volumétrica	$[L^3L^{-3}]$
$\theta_c$	Capacidade de campo	$[L^3]$
$\theta_r$	Umidade residual	$[L^3L^{-3}]$
$\theta_s$	Umidade saturada	$[L^3L^{-3}]$
$\rho$	Densidade da água	$[ML^{-3}]$
$\Psi$	Potencial matricial	[L]
$\psi_t$	Carga de pressão	[L]



## 1. INTRODUÇÃO

Ao longo da história, as primeiras grandes civilizações se desenvolveram às margens de rios (Tigre e Eufrates na Mesopotâmia, Nilo no Egito, Índus na Índia, e Amarelo na China). A água pode ser considerada então, um bem essencial para o desenvolvimento e a sobrevivência da humanidade. No intuito de preservar este recurso se faz necessário melhorar a compreensão de sua dinâmica.

Nesse sentido, o conhecimento de hidrologia é fundamental, já que é a ciência que trata dos processos hidrológicos. Como boa parte do espaço onde ocorrem esses processos hidrológicos é solo, é importante entender o movimento da água nesse meio. O conhecimento desse processo é limitado, provavelmente pelo fato de esse fenômeno não ser visível (fácil observação) e as propriedades do solo apresentarem grande variação (heterogeneidade).

Diversos estudos comprovaram a variação das propriedades do solo. Por exemplo, Abreu *et al.* (2003) verificaram que a variabilidade espacial de propriedades físico-hídricas do solo apresenta relação direta com fatores de formação e manejo do solo e afeta a produção de culturas. Eguchi *et al.* (2003) avaliaram a variabilidade espacial dos atributos físico-hídricos de um solo hidromórfico. Souza & Alves (2003) concluíram que as diferentes formas de uso e manejo do solo promovem alterações no movimento da água no solo. É notável que a maioria dos estudos tenta auxiliar na escolha do manejo mais adequado para as culturas agrícolas, e poucos tratam da influência dos diferentes usos do solo (pastagem, reflorestamento, entre outros), na variação das propriedades hidráulicas do mesmo.

Porém, esse conhecimento é importante, pois os usos e manejos influenciam no que diz respeito a qualidade e quantidade dos recursos hídricos de uma bacia hidrográfica. Atualmente, a questão da escolha do uso de solo mais adequado é uma das temáticas mais discutidas. Essa também é a situação na região do município de Rio Negrinho/SC, onde a cobertura vegetal original, caracterizada predominantemente pela floresta de araucária (Floresta de Ombrófila Mista), foi degradada pela exploração de seus espécimes e até pela substituição para utilização do solo para reflorestamento e agricultura. Com isso, ambientalistas e comunidades começaram a questionar o uso de solo mais adequado para a preservação dos recursos hídricos. Neste caso, uma base para a tomada de decisões é o estudo da influência do uso do solo na qualidade e quantidade dos recursos hídricos.

Assim, deve haver um planejamento para que seja dado o uso e manejo mais adequados para determinada área. E para isso, deve-se conhecer a influência dos diversos usos/manejos do solo no movimento da água nesse meio. A modelagem é uma importante ferramenta de estimativa e previsão dos processos hidrológicos. Especialmente quando se trata de um processo que apresenta uma variabilidade temporal e espacial como o movimento da água no solo.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Avaliar a dinâmica da água na zona vadosa em solos de diferentes usos utilizando o modelo HYDRUS-1D, na região de Rio Negrinho/SC.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Determinar as propriedades hidráulicas do solo com as equações de van Genuchten (1980), para cada uso do solo;
- Aplicar o modelo HYDRUS-1D para os diferentes usos do solo;
- Avaliar a dinâmica da água na zona vadosa para cada uso do solo.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Propriedades hidráulicas do solo

A dinâmica da água do solo pode ser determinada, governada e descrita por duas propriedades hidráulicas do solo: curva característica de retenção de água e permeabilidade (ou condutividade hidráulica) ( $K$ ) (KOBİYAMA *et al.*, 1998). A primeira é a relação entre a carga de pressão  $p/(\rho \cdot g)$  (ou  $\psi_i$ ) e a umidade volumétrica ( $\theta$ ), e a segunda traduz a facilidade que a água tem de se movimentar no solo.

A observação desse processo em campo demanda muito tempo e recursos financeiros (ou aparelhos), porque as propriedades hidráulicas do solo apresentam extensa variabilidade espacial e estão sujeitas a freqüentes alterações no tempo (PREVEDELLO, 1996; CENTURION *et al.*, 1997).

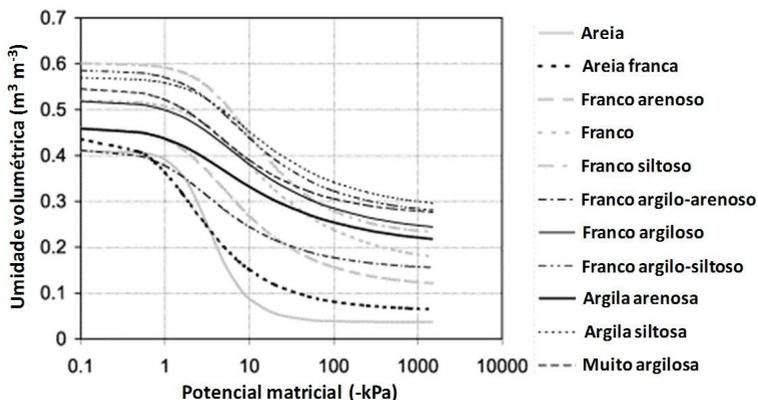
Segundo Libardi (2005), entre as características que mais influenciam as propriedades do solo estão a distribuição de tamanho e forma de suas partículas, tortuosidade, a superfície específica, a porosidade, e todas aquelas que de alguma maneira alteram a geometria porosa do solo.

##### 3.1.1 Curva característica de retenção

Childs (1940) sugeriu o nome “curva característica de retenção de água” para a curva obtida pela relação entre potencial matricial ( $\psi$ ) e umidade volumétrica. O volume de água retirado de determinado volume de solo, para uma sucção específica, representa o volume do poro, de tamanho indicado por esta sucção (VOMOCIL, 1965).

Como dito, a relação entre o conteúdo de água no solo ( $\theta$ ) e o potencial matricial ( $\psi$ ) do solo descreve a curva característica de retenção de água no solo. Ela fornece importantes informações físico-hídricas do solo, fundamentais para o planejamento de uso e manejo, eficiência de projetos de irrigação e drenagem e conservação do solo (AQUINO *et al.*, 2008).

A forma geral da curva depende particularmente da porosidade, das características da geometria dos poros, da distribuição do tamanho das partículas, e da natureza do material (SALAGER *et al.*, 2007). Assim, existem as funções de pedotransferência que servem para se obter a curva de retenção de água no solo apenas com dados de textura do solo. A Figura 1 mostra como a forma da curva característica de retenção de água varia de acordo com a textura do solo.



**Figura 1.** Curvas de retenção de água resultante dos parâmetros médios de van Genuchten para cada classe textural. (Adaptação de Hodnett & Tomasella, 2002).

Hodnett & Tomasella (2002) identificaram que as funções de pedotransferência para curva de retenção de água no solo para solos tropicais apresentam uma grande diferença em relação aos solos de regiões de clima temperado.

Existem métodos mais convencionais para elaborar a curva de retenção, como o método da mesa de tensão e o da câmara de Richards descritos por Kiehl (1979), EMBRAPA-SNLCS (1979), Klute (1986), e Cauduro & Dorfman (1986).

### 3.1.2 Condutividade hidráulica

Carvalho (2002) define a condutividade hidráulica do solo como um parâmetro que traduz a facilidade com que a água se movimenta ao longo do perfil de solo. A determinação dessa propriedade, principalmente no campo, torna-se imprescindível, visto que o movimento da água no solo é um dos importantes processos hidrológicos. O valor máximo de  $K$  é obtido quando o solo se encontra em situação de saturação, neste caso se denomina condutividade hidráulica saturada  $K_s$  (REICHARDT & TIMM, 2004).

Há diversos métodos propostos para determinar  $K(\theta)$  em laboratório e em campo. Um dos métodos mais utilizados é o método de van Genuchten (1980). A fácil utilização desse método foi verificada por Prevedello *et al.* (1995).

Estimativas confiáveis da condutividade hidráulica não saturada são especialmente difíceis de obter, em parte devido à sua ampla

variabilidade no campo, e em parte porque medir este parâmetro é moroso e dispendioso (VAN GENUCHTEN, 1980).

### 3.1.3 Umidade do solo

O conteúdo de água no solo é o índice mais básico quantificador de água numa amostra de solo. Pode ser expresso à base de massa ( $u$ ) e de volume ( $\theta$ ) (LIBARDI, 2005). As formulações para a determinação destes parâmetros são expressas pelas Equações (1) e (2), sendo (1) a consideração para umidade a base de massa, e (2) a base de volume. A umidade volumétrica é a mais amplamente utilizada, principalmente por formar a relação da curva de retenção da água no solo de van Genuchten.

$$u = \frac{m_T - m_S}{m_S} \quad (1)$$

onde  $u$  é a umidade a base de massa ( $\text{g g}^{-1}$ );  $m_T$  é a massa total (g); e  $m_S$  é a massa das partículas sólidas (g).

$$\theta = \frac{m_u - m_S}{V_T} \quad (2)$$

onde  $\theta$  é a umidade volumétrica do solo ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ );  $m_u$  é a massa total úmida (g);  $m_S$  é a massa das partículas sólidas (g); e  $V_T$  é o volume total da amostra ( $\text{cm}^3$ ).

A relação entre a capacidade de armazenamento de água e o tamanho do poro, torna-se importante por representar a quantidade de água disponível para as plantas, fator que vem sendo discutido há muito tempo. Veihmeyer & Hendrickson (1927 e 1949) definiram capacidade de campo ( $\theta_c$ ) como a quantidade de água retida pelo solo após a drenagem de seu excesso.

## 3.2 Equações de van Genuchten

Van Genuchten (1980) descreveu uma equação empírica e muito eficiente para representar analiticamente a curva de retenção de água no solo. O autor derivou as expressões de Mualem (1976), e obteve a expressão para retenção de água:

$$\theta(\Psi) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + (\alpha |\Psi|^n)\right]^m} \quad (3)$$

onde  $\theta$  é a umidade volumétrica do solo ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ );  $\theta_r$  é a umidade residual ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ );  $\theta_s$  é a umidade saturada ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ );  $\Psi$  é o potencial

matricial (cm);  $\alpha$ ,  $m$  e  $n$  são os parâmetros de ajuste sendo que ( $m=1-(1/n)$ ).

A equação para permeabilidade é:

$$K(\Psi) = K_s \frac{\left\{ 1 - (\alpha|\Psi|)^{n-1} \left[ 1 + (\alpha|\Psi|^n)^{-m} \right]^2 \right\}}{\left[ 1 + (\alpha|\Psi|^n)^m \right]^2} \quad (4)$$

onde  $K_s$  é a condutividade hidráulica saturada (cm/s) e  $K$  é a condutividade hidráulica (cm/s).

Prevedello *et al.* (1995) fizeram uma comparação entre o método do perfil instantâneo e van Genuchten (1980) e concluíram que o segundo é melhor nos casos de estudos numéricos. Além disso, a partir de ensaio laboratorial para determinar  $K(\phi)$ , os mesmos autores apresentaram vantagens da equação de van Genuchten (1980).

### 3.3 Equação de Richards

A equação de Richards (1931) para o fluxo unidimensional é expressa por:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = C(\Psi) \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ K(\Psi) \frac{\partial \Psi}{\partial z} - K(\Psi) \right] \quad (5)$$

onde  $z$  é a profundidade da camada orientada positivamente para baixo;  $t$  é o tempo; e  $C(\Psi)$  é a capacidade específica, representada pela derivada da umidade em função da pressão ( $\partial\theta/\partial\Psi$ ).

Então, derivando a Equação (3) em relação a  $\Psi$ , obtém-se a equação da capacidade específica:

$$C(\Psi) = \frac{\alpha(\theta_s - \theta_r)(n-1)(\Psi)^{n-1}}{\left[ 1 + \alpha(\Psi)^n \right]^{\frac{1}{n}}} \quad (6)$$

A Equação (5) apresenta uma característica fortemente não linear, o que dificulta sua solução (KOBAYAMA *et al.*, 2004). Desse modo, a fim de facilitar sua resolução, Prevedello (1996) realizou modificações para obter sua linearização em relação ao espaço. Ainda assim, os modelos mais famosos de simulação do movimento da água no solo resolvem a equação de Richards para escoamento saturado e não-saturado (ŠIMUNEK *et al.*, 2008).

### 3.4 O modelo HYDRUS-1D

O HYDRUS-1D é um modelo numérico para simulação unidimensional do fluxo de água, calor e múltiplos solutos em meios

saturados ou não-saturados. Além disso, permite considerar a absorção de água pelas raízes, o crescimento das raízes e o transporte de CO<sub>2</sub>.

O modelo é baseado na equação de Richards e tipos de equação de advecção-dispersão para transporte de calor e soluto. A equação de Richards considera apenas fluxo de água na fase líquida e desconsidera os efeitos do vapor no balanço geral de massa (ŠIMÚNEK *et al.*, 2008).

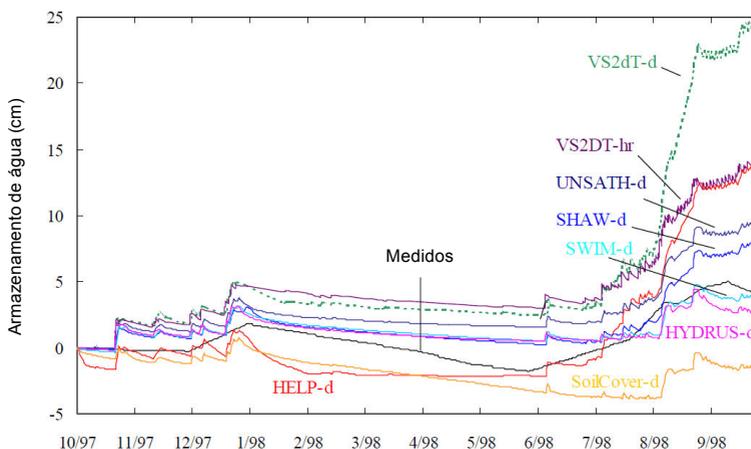
Além disso, o HYDRUS-1D permite a utilização de 5 diferentes modelos analíticos de propriedades hidráulicas (BROOKS & COREY, 1964; VAN GENUCHTEN, 1980; VOGEL & ČÍSLEROVÁ, 1988; KOSUGI, 1996; e DURNER, 1994).

Diversos autores realizaram pesquisas utilizando o modelo HYDRUS-1D, como mostra a Tabela 1.

**Tabela 1.** Pesquisa bibliográfica de alguns autores que aplicaram o modelo do HYDRUS-1D.

Autor	País	Área de estudo	Aplicação			Cenário
			Fluxo de água	Transporte soluto	Transporte de calor	
Bera (2009)	EUA		X			hormônios
Dontsova <i>et al.</i> (2006)	EUA		X			resíduos de compostos de explosivos
Fuentes <i>et al.</i> (2008)	Chile	Solo vulcânico	X			agricultura
Gonçalves <i>et al.</i> (2006)	Portugal		X			irrigação com água de 4 conjunto de parâmetros diferentes de qualidade - salinização
Meiwirth & Mermoud (2004)	Suíça		X			
Monteiro <i>et al.</i> (2009)	Brasil	Vale aluvial	X			semiárido brasileiro
Poch <i>et al.</i> (2005)	Espanha		X			cultivo de milho com diferentes doses e tipos de fertilizante nitrogenado
Rojas & Otálvaro (2008)	Colômbia		X			área de muita agricultura
Watanabe (2008)	Japão		X		X	solos congelados
Sanchez (2003)	EUA	Zonas desérticas	X		X	melhorar técnicas horticultura

Scanlon *et al.* (2002) compararam as características e desempenho de diferentes modelos (HELP, HYDRUS-1D, SHAW, SoilCover, SWIM, UNSATH e VS2DT) para simular balanço hídrico. Em geral os modelos apresentaram bom desempenho para simular o armazenamento de água no solo, sendo que o HYDRUS-1D apresentou um dos melhores ajustes (Figura 2). Além disso, Khalil *et al.* (2004) utilizaram HYDRUS-1D para verificar sua potencialidade para detectar o plano de fluxo zero (PFZ) em zonas não saturadas e a possibilidade de traçar o movimento no PFZ sob condições de abastecimento periódico de água. Os dados simulados de potencial total apresentaram bom ajuste aos medidos.

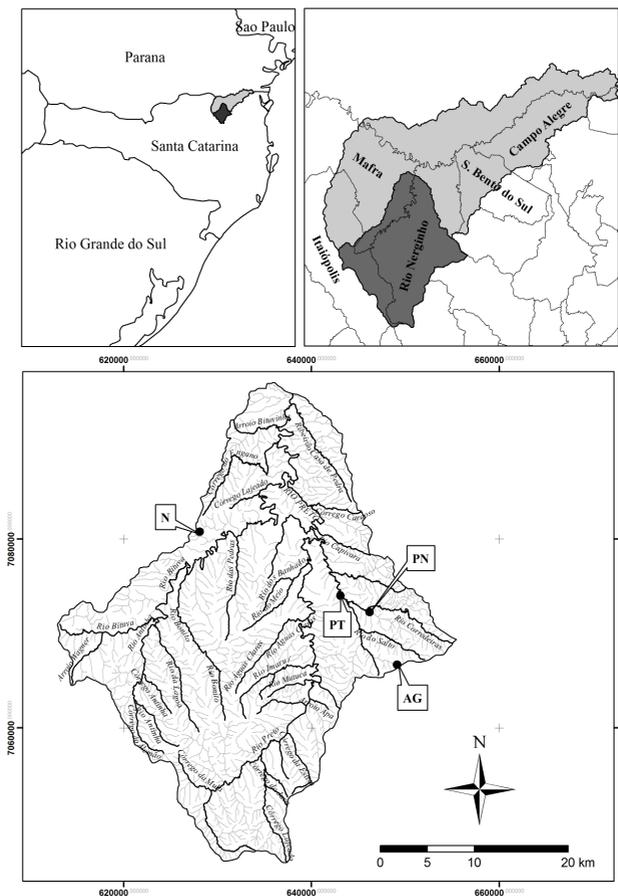


**Figura 2.** Dados de armazenamento de água no solo medidos e simulados. (Adaptação de SCANLON *et al.*, 2002)

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Área de estudo

Os quatro pontos onde realizou-se amostragem de solo se localizam na Bacia do Rio Preto. Esta bacia faz parte da Rede de Bacias-escola de Kobiyama *et al.* (2008), na região do município de Rio Negrinho, estando aproximadamente entre os paralelos 25°55'00'' e 26°42'00'' de latitude sul e meridianos 48°57'00'' e 49°55'30'' de longitude oeste (Figura 3).



**Figura 3.** Localização dos pontos de coleta: AG corresponde a agricultura, PT a pastagem, PN a pinus e N a mata nativa.

O clima da região é o tipo Cfb, segundo Köppen (1948), - Mesotérmico, subtropical úmido, com verões frescos, sem estação seca e com geadas severas frequentes. A temperatura do mês mais quente é sempre inferior a 22°C. A precipitação anual varia de 1.370 a 1.670 mm.

A região se caracteriza por rochas sedimentares pertencentes aos Grupos Itararé, do Sub-Grupo Tubarão. As formações pertencentes a este grupo são: Formação Campo do Tenente, Mafra e Rio do Sul. As características geomorfológicas são relevo com superfície regular, quase plana, de baixa energia de relevo (SANTA CATARINA, 1986).

Segundo EMBRAPA (2004) e Santa Catarina (1986), os solos da região se classificam predominantemente por Cambissolos, sendo que uma pequena porção é Gleissolos. Os Cambissolos compreendem os solos minerais, não hidromórficos, com horizonte B incipiente bastante heterogêneo, em relação à cor, espessura e textura, e em respeito à atividade química da fração argila e saturação por bases.

O modelo econômico do município de Rio Negrinho contribuiu para a degradação da paisagem natural. Atualmente restam apenas poucas áreas de mata nativa, e muitas áreas são utilizadas pelo reflorestamento de pinus. As atividades agropecuárias também são praticadas na região. As culturas agrícolas encontradas são: milho, soja, feijão e fumo. As áreas de pastagem são para os bovinos, suínos, caprinos e, além disso, também são criadas aves na região (PREFEITURA DE RIO NEGRINHO, 2009). Assim, observa-se que na região são predominantes Floresta Ombrófila Mista, reflorestamento de pinus e agricultura, sendo encontradas também áreas de pastagem.

## **4.2 Análise do solo**

### *4.2.1 Coleta em campo*

Foram coletadas amostras de solo deformadas e não-deformadas. Para a coleta das amostras deformadas se utilizou o trado holandês (Figura 4). É importante que se observe com rigor a profundidade que se deseja coletar, além disso, deve-se limpar o excesso de solo (de outras profundidades) que resta superficialmente quando o trado é retirado do orifício de onde se está coletando. Neste procedimento foi coletado cerca de 200 g de solo para os ensaios de sedimentação, considerando possíveis erros e repetições de ensaio necessárias.



**Figura 4.** Tradagem para coleta de amostra deformada.

As amostras não-deformadas foram coletadas com a utilização de um conjunto de instrumentos composto por: 1 trado *SoilControl* modelo *TAI* capacidade para um cilindro com cabo de 15 cm, 2 hastes prolongadoras de 40 cm, 1 Cabo extrator, 1 marreta de ferro revestida com borracha, cilindro de inox de 52 mm x 50 mm, 2 chaves com boca 16 mm e 1 espátula fina. Para realizar a coleta, cavou-se uma trincheira na profundidade desejada e então se inseriu o trado coletor até que o cilindro estivesse completamente ocupado por solo, com cuidado para que não houvesse compactação da parte superior da amostra por excesso de inserção (Figura 5). Para retirar o cilindro do coletor, utilizou-se a espátula para que a amostra se solte.



**Figura 5.** Coleta de amostra não-deformada.

#### 4.2.2 *Ensaio das amostras em laboratório*

A análise granulométrica foi realizada no Laboratório de Irrigação e Drenagem do Centro de Ciências Agrárias (CCA) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), e coordenado pelo professor Antônio Augusto Alves Pereira. Para essa análise utilizaram-se as amostras deformadas segundo NBR7181 (1984). De forma geral, conhecendo-se a massa seca da amostra foi adicionado dispersante à ela e a mistura deve repousar durante 24 horas. Então, as amostras foram para o copo agitador e com uso de agitador elétrico foram submetidas à agitação vigorosa durante 5 minutos (Figura 6(a) e (b)). A mistura foi despejada em uma proveta de 1000 mL e o espaço vazio completado com água destilada (Figura 6(c)). Então foram realizadas medidas da densidade da mistura nos tempos: 30 segundos, 1, 3, 10, 30, 90, e 270 minutos e 12 horas (Figura 6(d)). E depois foram realizados cálculos para estimar o diâmetro das partículas. Para partículas com diâmetro superior a 2 mm foi utilizado peneiramento. Desta maneira obteve-se as frações granulométricas nas profundidades de 15 e 45 cm.



(a)



(b)



(c)

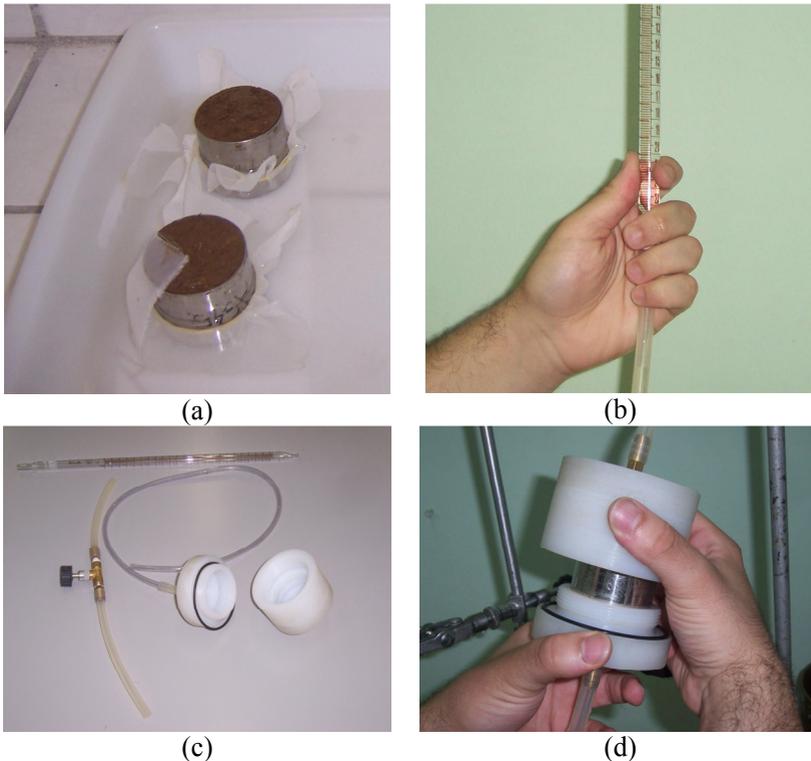


(d)

**Figura 6.** Análise granulométrica. (a) Agitador elétrico; (b) Copo agitador; (c) Proveta de 1000 mL; e (d) Proveta com o densímetro.

Com as amostras não-deformadas determinou-se dois parâmetros hidráulicos dos solos: a condutividade hidráulica saturada e a umidade saturada. Primeiramente as amostras foram limpas e não se deixaram excessos além da altura do cilindro. Então foi colado um material muito permeável (importante que seja mais que o solo) para não interferir na medida. Em seguida, iniciou-se o processo de saturação das amostras (Figura 7(a)). As amostras foram apoiadas parte inferior totalmente em contato com a água destilada. Assim, saturou-se de baixo para cima para que se tenha a mínima formação de bolhas de ar nos poros da amostra. As amostras saturadas foram submetidas ao ensaio com permeâmetro de carga variável (Figura 7 (b), (c) e (d)), pois as amostras apresentam

valores de  $K_s$  baixos. Então foram obtidos os valores para a  $K_s$  com a base na Lei de Darcy.



**Figura 7.** Ensaio do permeâmetro de carga variável. (a) Amostras não deformadas em processo de saturação; (b) Pipeta graduada para medir o volume de água durante o ensaio; (c) Principais peças constituintes do permeâmetro de carga variável; e (d) Colocação da amostra imediatamente antes da realização de ensaio.

Neste método a amostra saturada foi disposta de maneira que a água apenas possa passar no sentido descendente. Então, mediu-se o volume que passa pela amostra e o tempo que leva para isso acontecer. Através de cálculos posteriores obtém-se a condutividade hidráulica saturada. Após a realização desse ensaio, as amostras foram completamente secas em estufa. A partir da diferença entre a massa de amostra totalmente saturada ( $S = 100\%$ ) e seca ( $S = 0$ ) foi obtida a porosidade total dos solos.

### 4.3 Caracterização do solo com as equações de van Genuchten

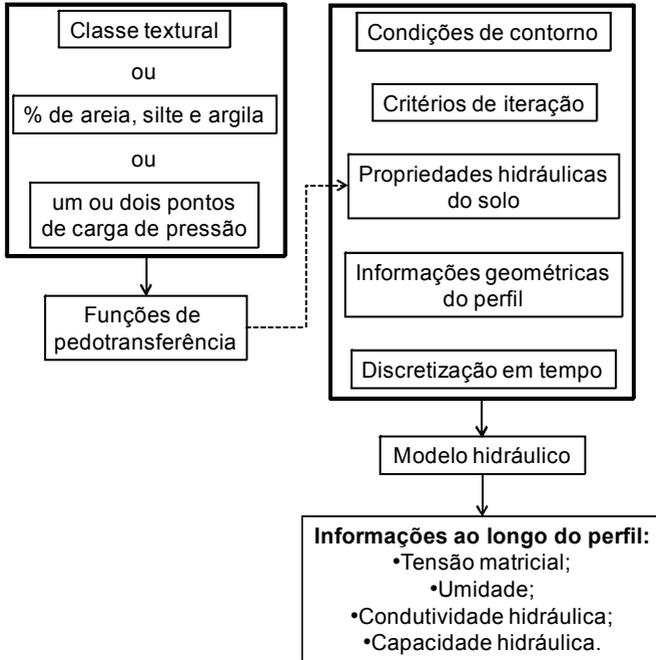
O modelo HYDRUS-1D possui uma ferramenta para estimar os parâmetros de retenção de água e a condutividade hidráulica saturada ( $K_S$ ) de van Genuchten (1980). Esta ferramenta se chama *Rosetta Lite Version 1.1* e implementa funções de pedotransferência para estimar os parâmetros utilizando classe textural, distribuição de textura, densidade do solo e um ou dois pontos de retenção de água como entrada. Com isso obteve-se as Equações (3) e (4) para cada camada de solo considerada.

Então, neste trabalho utilizou-se a ferramenta descrita anteriormente para estimativa dos parâmetros de retenção de água e  $K_S$  através da informação de textura dos solos. Além disso, as simulações também foram feitas considerando os dados medidos de  $\theta_S$  e  $K_S$  para comparação.

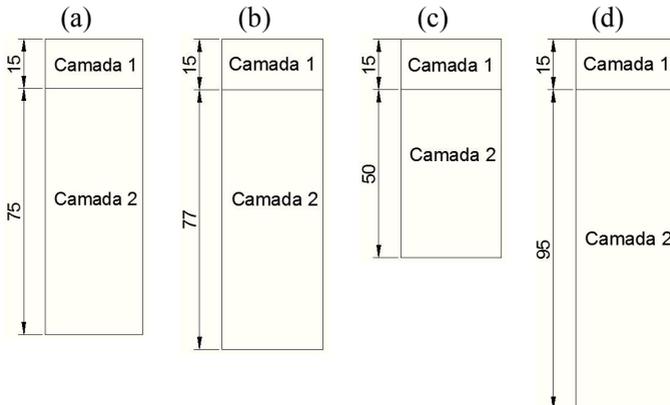
### 4.4 Simulação da dinâmica da água na zona vadosa: modelo HYDRUS-1D

O modelo HYDRUS-1D foi aplicado para simular a dinâmica da água em cada solo. Esse modelo resolve a Equação (5) que desconsidera a influência do vapor no balanço de massa geral. E utiliza os parâmetros de retenção de água e condutividade hidráulica saturada obtidos pela aplicação de *Rosetta Lite Version 1.1*, para simular o movimento da água no solo (Figura 8).

Como a caracterização das propriedades físicas e hidráulicas do solo foi feita considerando duas camadas do solo (profundidades 15 e 45 cm), então, para a simulação foram consideradas 2 camadas de controle e a profundidade máxima do perfil medido em campo (Figura 9).



**Figura 8.** Fluxograma do modelo HYDRUS-1D.



**Figura 9.** Perfis considerados na simulação dos diferentes usos do solo, com as medidas em cm. (a) Mata Nativa; (b) Agricultura; (c) Pinus; e (d) Pastagem.

Na simulação, foi utilizada a discretização em tempo de 1 s, e em espaço ( $\Delta z$ ) variou para cada perfil sendo que o modelo divide a profundidade do perfil automaticamente em 100 células iguais (Tabela 2).

**Tabela 2.** Discretização em espaço utilizada nas simulações e a profundidade dos perfis.

<b>Uso do solo</b>	<b><math>\Delta z</math> (cm)</b>	<b>Profundidade do perfil (cm)</b>
Mata nativa	0,90	90
Agricultura	0,92	92
Pastagem	1,10	110
Pinus	0,65	65

A respeito das condições de contorno, foi considerada como condição atmosférica, a precipitação de 50 mm/dia constante durante toda a simulação que durou 1,5 dias. E na parte inferior do perfil foi considerada a condição de contorno de drenagem livre. Além disso, como condição inicial se considerou uma carga de pressão em todo o perfil de 100 cm negativos. No caso da condição superficial considerada, os processos de chuva e infiltração foram considerados como os que influenciam diretamente na simulação.

Como para cada uso do solo a interceptação da chuva varia, os dados de precipitação na simulação da dinâmica da água na zona vadosa devem ser diferenciados. Chaffe (2009) investigou a interceptação de Pinus através de monitoramento, mostrando que houve uma média da perda de 21,4% por interceptação. Então, o presente estudo aplicou uma chuva com 21,4% de redução no caso do solo com pinus.

Nas simulações foram consideradas 3 critérios de comparação:

- (1) Perfis de usos de solo diferentes, porém com  $\theta_s$  e  $K_s$  obtidos da mesma forma;
- (2) Perfis de mesmo uso do solo, para comparar os resultados de  $\theta_s$  e  $K_s$  obtidos de ensaio em laboratório e aqueles obtidos pelo *Rosetta Lite Version 1.1*;
- (3) Perfis caracterizados pelo reflorestamento de Pinus, porém considerando a interceptação obtida por Chaffe (2009).

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Ensaios de laboratório

A Tabela 3 apresenta os resultados de textura de cada uso do solo para as profundidades de 15 e 45 cm. Percebe-se que o solo que mais apresenta diferença entre as duas profundidades é aquele que se caracteriza pelo reflorestamento de pinus. Segundo o clássico triângulo de classificação textural (MONIZ, 1972), os solos se classificam majoritariamente como franco. Sendo que o solo cujo uso é para reflorestamento de pinus se classifica como argila ou franco argiloso.

**Tabela 3.** Resultados das análises de textura dos solos.

Uso do solo	Nativa		Agricultura		Pastagem		Pinus	
	15 cm	45 cm	15 cm	45 cm	15 cm	45 cm	15 cm	45 cm
<b>Areia grossa</b>	8	6	3	3	6	12	4	9
<b>Areia fina</b>	58	54	40	36	46	40	21	31
<b>Silte</b>	20	25	27	37	30	23	35	19
<b>Argila</b>	14	15	30	24	18	25	40	41
<b>Textura</b>	*	*	**	***	***	****	**	**

\* Franco-arenoso; \*\*Franco-argiloso; \*\*\*Franco; \*\*\*\* Franco argilo-arenosa

As duas propriedades hidráulicas  $\theta_S$  e  $K_S$ , para cada uso de solo são apresentadas na Tabela 4. Nota-se que os valores estimados e medidos de  $\theta_S$  possuem pequena diferença, sendo a maior de 8%. Apesar disso, os valores de  $K_S$  se apresentam com uma diferença da ordem entre  $10^{-1}$  e  $10^{-2}$  cm/s.

O *Rosetta Lite Version 1.1* não permite estimar os parâmetros da equação de retenção e de  $K_S$  utilizando dados de  $\theta_S$  e  $K_S$ . Então, por tentativa, foram utilizados valores de textura que correspondessem a uma aproximação dos valores de  $\theta_S$  e  $K_S$  medidos (Tabela 4(c)). Os valores aproximados de  $K_S$  apresentam erros menores que 1%. Assim, nas simulações foram utilizadas as propriedades da Tabela 4 (b) e (c), identificadas como estimadas e medidas, respectivamente.

Esta variação na estimativa de  $K_S$  também foi observada por Sonneveld *et al.* (2003). Essa variação pode ocorrer porque o modelo aplica funções de pedotransferência para estimar os parâmetros da curva de retenção e de  $K_S$ . Tais funções não consideram a geometria e a

dimensão dos poros. Assim, não considera a existência de fluxos preferenciais.

**Tabela 4.** Propriedades hidráulicas do solo: (a) medidos; (b) estimados pela textura aplicando *Rosetta Lite Version 1.1*; e (c) aproximação dos medidos.

(a)	$\theta_s$		$K_S$ (cm/s)	
	15 cm	45 cm	15 cm	45 cm
Mata nativa	0,46	0,38	1,13E-03	2,51E-03
Agricultura	0,38	0,44	3,35E-03	5,16E-03
Pinus	0,44	0,42	5,31E-03	6,82E-03
Pastagem	0,42	0,39	1,51E-03	3,17E-03

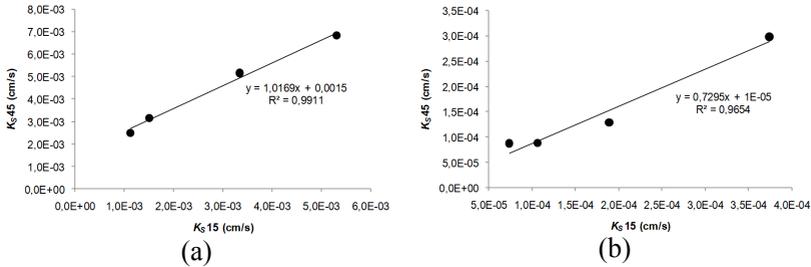
  

(b)	$\theta_s$		$K_S$ (cm/s)	
	15 cm	45 cm	15 cm	45 cm
Mata nativa	0,38	0,39	3,74E-04	2,98E-04
Agricultura	0,41	0,41	7,36E-05	8,72E-05
Pinus	0,46	0,43	1,07E-04	8,84E-05
Pastagem	0,39	0,40	1,89E-04	1,29E-04

(c)	$\theta_s$		$K_S$ (cm/s)	
	15 cm	45 cm	15 cm	45 cm
Mata nativa	0,38	0,38	1,13E-03	2,51E-03
Agricultura	0,39	0,38	3,36E-03	5,14E-03
Pinus	0,37	0,38	5,42E-03	6,82E-03
Pastagem	0,38	0,39	1,50E-03	3,19E-03

Foi observada uma alta correlação entre os valores de  $K_S$  para as duas profundidades (Figura 10). Assim, pode-se dizer que nessa região, a variação dessa propriedade com a profundidade é uniforme na região. Essa uniformidade pode ser por que o solo desta região é caracterizado mais pelo intemperismo que propriamente pela rocha mãe.



**Figura 10.** Correlação entre  $K_S$  das camadas de 15 e 45 cm de profundidade. (a) medidos no ensaio de laboratório, e (b) obtidos pela aplicação do *Rosetta Lite Version 1.1*.

Como resultado da aplicação do *Rosetta Lite Version 1.1* obteve-se os parâmetros da Equação (3) para todos os usos do solo e profundidades. Estes parâmetros são apresentados na Tabela 5. O solo com menor  $K_S$  é o caracterizado pelo reflorestamento de pinus, e o maior é o coberto por mata nativa. Inversamente, o perfil de mata nativa apresentou o menor valor de  $\theta_s$ , e o de pinus o maior. Isso pode ocorrer porque a área de mata nativa possui bem menos quantidade de argila e silte do que a área de pinus, e a presença majoritária de argila e silte aumenta a porosidade.

**Tabela 5.** Parâmetros de retenção de água e  $K_S$  obtidos pela aplicação de *Rosetta Lite Version 1.1*.

	Profundidade (cm)	$\theta_r$	$\theta_s$	$\alpha$	$n$	$K_S$ (cm/s)
Mata nativa	15	0,049	0,384	0,0304	1,3876	3,74E-04
	45	0,051	0,387	0,0252	1,3867	2,98E-04
Agricultura	15	0,076	0,414	0,0179	1,3578	7,36E-05
	45	0,069	0,414	0,0113	1,4604	8,72E-05
Pinus	15	0,089	0,459	0,0136	1,3573	1,07E-04
	45	0,085	0,428	0,0233	1,2604	8,84E-05
Pastagem	15	0,057	0,394	0,0183	1,4092	1,89E-04
	45	0,068	0,397	0,0218	1,3506	1,29E-04

## 5.2 Simulação

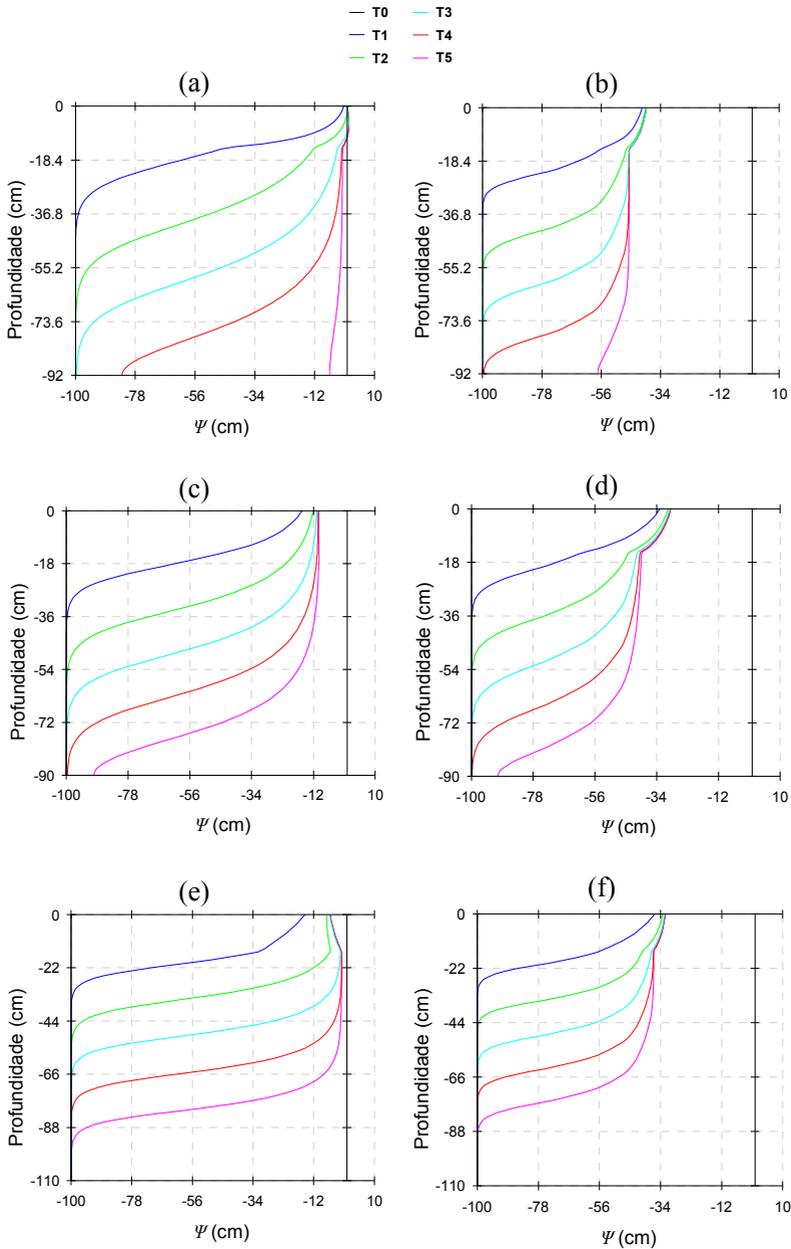
No caso da comparação (1), quando se considera apenas uma coluna por vez (Figura 11), os perfis se apresentam bem diferentes para cada uso do solo. Porém, os perfis dos usos de solo se diferenciam mais no caso dos medidos. O único perfil que inteiramente se satura para as condições dessa simulação é PN, sendo que no tempo T4 já se apresentava saturado. Além disso, o perfil AG no tempo T5 se apresenta também quase saturado. O perfil N apresenta a descida da frente de molhamento mais lenta e também é o perfil que menos se aproxima da saturação.

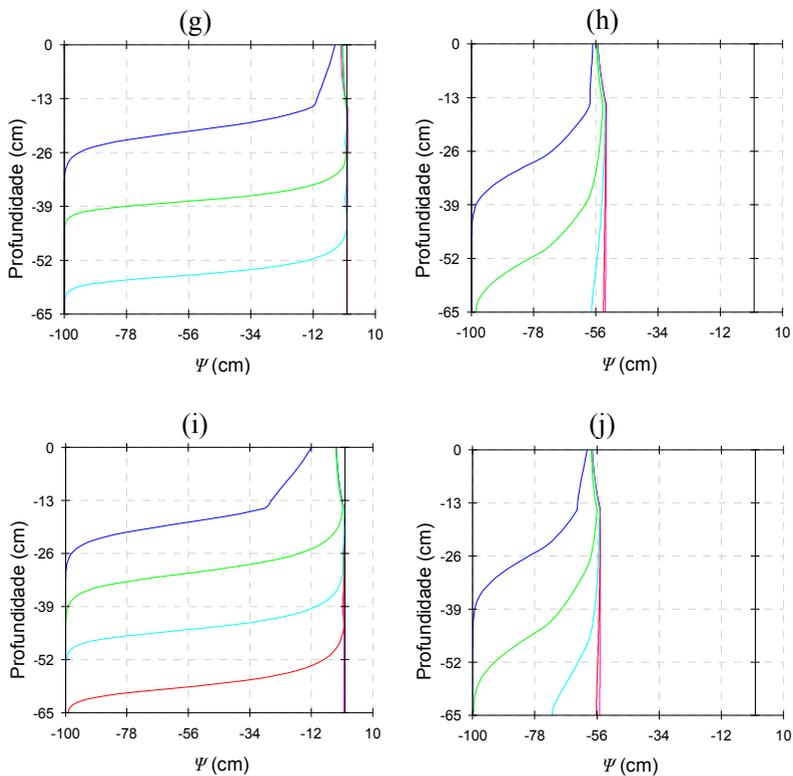
Comparando os perfis da mesma linha (comparação (2)), a alteração na dinâmica da água é em termos de magnitude, porém a forma se mantém parecida (Figura 11(a) e (b)). Apenas para os perfis AG, no caso das propriedades  $K_S$  e  $\theta_S$  estimados, chega próximo da saturação. E quando são consideradas as propriedades medidas em laboratório, a água infiltra rapidamente se afastando da condição de saturação. Nos outros perfis, apesar de os valores serem diferentes, a tendência se mantém.

Nas Figuras 11(i) e 11(j) são apresentados os perfis de PNI, em que foi considerada interceptação. Assim, observa-se que o perfil, no caso das propriedades estimadas, também chega à saturação, porém 7,2 h depois.

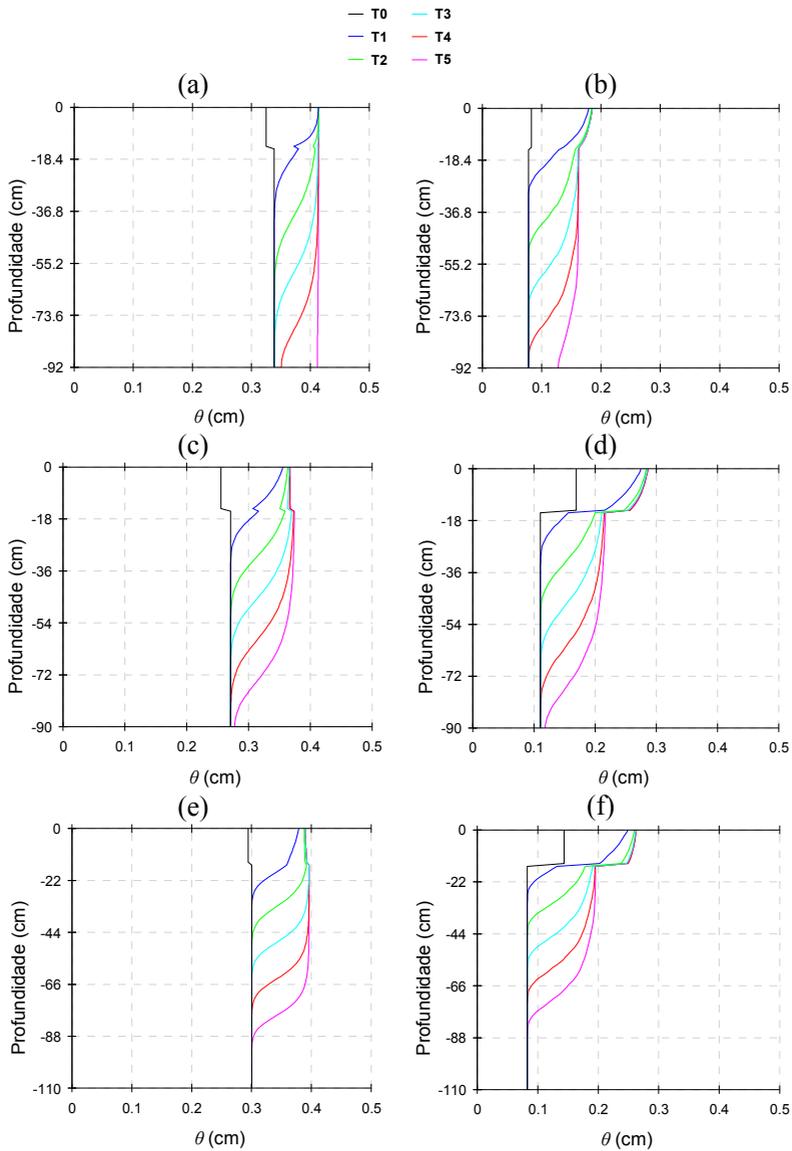
A Figura 12 apresenta a mesma organização da Figura 11, porém para os perfis de  $\theta$ . Como foram consideradas duas camadas com diferentes  $\theta_S$  e  $K_S$ , encontra-se uma descontinuidade que aparece mais evidente nos perfis de  $\theta$  que nos de  $\Psi$ , principalmente nos quais se consideraram  $\theta_S$  e  $K_S$  medidos. Embora essa variação possa ser gradativa na condição real, ela aparece mais bruscamente na simplificação do perfil em 2 camadas.

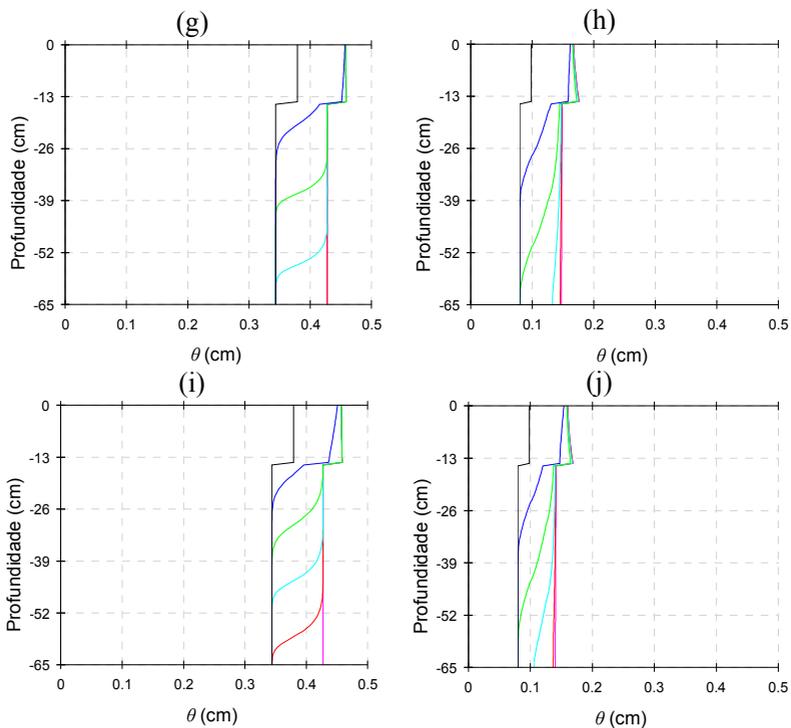
No caso da comparação (3), praticamente não se pode verificar alteração nos perfis. Assim, pode-se dizer que a intensidade da chuva não influencia muito nos perfis de  $\theta$ .





**Figura 11.** Perfis de  $\Psi$  obtidos pela simulação com HYDRUS-1D. (a) AG estimado; (b) AG medido; (c) N estimado; (d) N medido; (e) PT estimado; (f) PT medido; (g) PN estimado; (h) PN medido; (i) PNI estimado; (j) PNI medido. (AG: agricultura; N: mata nativa; PT: pastagem; PN: pinus; PNI: pinus com interceptação; T0 = 0; T1 = 7,2 h; T2 = 14,4 h; T3 = 21,6 h; T4 = 28,8 h; e T5 = 36 h)





**Figura 12.** Perfis de  $\theta$  obtidos pela simulação com HYDRUS-1D. (a) AG estimado; (b) AG medido; (c) N estimado; (d) N medido; (e) PT estimado; (f) PT medido; (g) PN estimado; (h) PN medido; (i) PNI estimado; (j) PNI medido. (AG: agricultura; N: mata nativa; PT: pastagem; PN: pinus; PNI: pinus com interceptação; T0 = 0; T1 = 7,2 h ; T2 = 14,4 h; T3 = 21,6 h; T4 = 28,8 h; e T5 = 36 h)

## 6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O presente trabalho avaliou a dinâmica da água no solo em diferentes usos de solo. Para isso, mediram-se textura,  $\theta_s$  e  $K_s$  em laboratório. A textura do solo foi utilizada para estimar os parâmetros de van Genuchten por funções de pedotransferência. Os valores de  $\theta_s$  estimados por pedotransferência foram muito próximos aos medidos por ensaio de laboratório. Porém, os valores de  $K_s$  estimados se apresentaram entre  $10^{-1}$  e  $10^{-2}$  cm/s menores que aqueles medidos em laboratório. Isto implica uma fragilidade das funções de pedotransferência, ao não considerar possíveis caminhos preferenciais, geometria e dimensão dos poros. Além disso, a alta correlação entre valores de  $K_s$  nas profundidades 15 e 45 cm, indica uma variação uniforme dessa propriedade ao longo da profundidade nesta região.

Com a aplicação do modelo HYDRUS-1D, foi feita a simulação da dinâmica da água na zona vadosa. O movimento da água no solo se altera de acordo com as propriedades hidráulicas do solo. Como o uso do solo altera as propriedades hidráulicas do solo, então a dinâmica da água varia com o uso do solo. Verificou-se que o perfil N é o que apresenta a frente de molhamento mais lenta. Além disso, considerando a interceptação de 21,4% na área de reflorestamento de Pinus, o perfil se satura mais lentamente.

Vale ressaltar que foram feitas apenas duas amostras em cada uso de solo para a realização do trabalho. Para melhorar essa avaliação, em trabalhos futuros deverão ser feitas mais amostragens para cada uso de solo. Assim, poderão se ter uma ferramenta mais eficaz para o planejamento territorial.

## REFERÊNCIAS

- ABREU, S.L.; REICHERT, J.M.; SILVA, V.R.; REINERT, D.J.; BLUME E. Variabilidade espacial de propriedades físico-hídricas do solo, da produtividade e da qualidade de grãos de trigo em Argissolo Franco Arenoso sob plantio direto. **Ciência Rural**, v. 33, n. 2, mar-abr, 2003.
- AQUINO, L. S.; NEBEL, A. L. C.; MIOLA, E.C.C.; TIMM, L. C.; PAULETTO, E. A. Identificação da variabilidade espacial dos parâmetros de ajustes da equação de Van Genuchten em um solo de várzea na região sul do RS. In: XVII Congresso de Iniciação Científica - CIC e X Encontro de Pós Graduação - ENPOS, 2008, 2008, Pelotas. **Anais do XVII CIC/X ENPOS**. Pelotas. Pelotas: Editora da UFPel, 2008, 2008. v. 1.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR-7181: Solo – análise granulométrica: Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1984. 13p.
- BERA, M. Transport of Estrogenic Hormones in Soil. Crop and Soil Sciences Seminar, Filadélfia, 2009.
- BROOKS, R.H. & COREY, C.T. Hydraulic properties of porous media. Fort Collins, Colorado State University, 1964. (Hydrol. Paper, 3)
- CARVALHO, L. A. **Condutividade hidráulica do solo no campo: as simplificações do método do perfil instantâneo**. Piracicaba, 2002. 86p. (Dissertação de mestrado)
- CAUDURO, F.A. & DORFMAN, R. **Manual de ensaios de laboratório e de campo para irrigação e drenagem**. Porto Alegre: IPH/UFRGS, 1986. 216p.
- CENTURION, J.F.; MORAES, M.H. & DELLA LIBERA, C.L.F. Comparação de métodos para determinação da curva de retenção de água em solos. **R. Bras. Ci. Solo**, 21:173-179, 1997.
- CHAFFE, P.L.B. Monitoramento e modelagem do processo chuva-vazão de uma pequena bacia florestal com ênfase em interceptação. Florianópolis: UFSC/CTC/ENS, 2009. 100p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina.
- CHILDS, E.C. The use of soil moisture characteristics in soil studies. **Soil Sci.**, Baltimore, v.50, p.239-252, 1940.
- DONTSOVA, K.M.; YOST, S.L.; SIMUNEK, J.; PENNINGTON, J.C. & WILLIFORD, C.W. 2006. Dissolution and transport of TNT,

- RDX, and composition B in saturated soil columns, *J. Environ. Qual.* **35** (2006), pp. 2043–2054.
- DURNER, W. Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure, *Water Resour. Res.*, 32(9), 211-223, 1994.
- EGUCHI, E.S.; SILVA, E.L.; OLIVEIRA, M.S. Variabilidade espacial da condutividade hidráulica do solo saturado e da taxa de infiltração básica determinadas "in situ". *R. Ciênc. agrotec.*, Lavras. Edição Especial, p.1607-1613, dez., 2003.
- EMBRAPA. **Solos do estado de Santa Catarina**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2004. 745p.
- EMBRAPA-SNLCS. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro, 1979. 313p.
- FUENTES, R.; CÁCERES, L.; MOLINA, M.; ARAVENA, S.; CAZANGA, M.; CALDERÓN, R. & ESCUDEY, M. Use of Hydrus 1-D to Describe the Transport of Nitrate in a Volcanic Soil Affected by Sewage Sludge, Sewage Sludge Ash, and Pinus radiata Ash Amendments. 5th International Symposium on Interactions of Soil Minerals with Organic Components and Microorganisms, Pucón. p. 246, 2008.
- GONÇALVES, M. C.; SIMUNEK, J.; RAMOS, T. B.; MARTINS, J. C.; NEVES, M. J.; PIRES, F. P. 2005. Using HYDRUS to simulate water and solute transports in soil lysimeters. In Torkzaban, S., Hassanizadeh, S. M. (Eds). **In Proceedings of Workshop on HYDRUS Applications**. Department of Earth Sciences, Utrecht University, October 19, 2005, pp 38-41, The Netherlands ([http://www.pc-progress.cz/Fr\\_Services\\_Hydrus\\_Downloads.htm](http://www.pc-progress.cz/Fr_Services_Hydrus_Downloads.htm)).
- HODNETT, M.G. & TOMASELLA, J. Marked differences between van Genuchten soil water-retention parameters for temperate and tropical soils: A new water-retention pedo-transfer functions developed for tropical soils. *Geoderma*, 108:155-180, 2002.
- KHALIL, M.; SAKAI, M.; MIZOGUCHI, M. & MIYAZAKI, T. Periodical water supply effect on Zero Flux Plane (ZFP) movement; in unsaturated soil with and without salt. *Nogyo Doboku Gakkai Taikai Koenkai Koen Yoshishu*, p 328-329, 2004.
- KIEHL, E.J. **Manual de Edafologia. Relações solo-planta**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1979. 264p.
- KLUTE, A. (ed.) **Methods of soil analysis. I. Physical and mineralogical methods**. 2nd ed. Madison: Am. Soc. Agron., 1986. 1188p. (Agronomy monograph 9).

- KOBIYAMA, M.; BARCELLOS, M.; FRUET, D.; ZILIOOTTO, M.A. Modelagem numérica da dinâmica da água em solos estratificados. In: IV Simpósio Nacional de Geomorfologia (2002: São Luiz) São Luiz: UFMA, **Anais**, 2004. 6p.
- KOBIYAMA, M.; MOTA, A.A.; CORSEUIL, C.W. **Recursos hídricos e saneamento**. Curitiba: Ed. Organic Trading, 2008. 160p.
- KOBIYAMA, M.; SHINOMIYA, Y.; OLIVEIRA, S.M.; MINELLA, J.P.G. Consideração da pedogênese através das propriedades hidráulicas do solo. In: I Fórum Geo-Bio-Hidrologia: estudo em vertentes e microbacias hidrográficas, (1: 1998: Curitiba) Curitiba: FUPEF, **Anais**, 1998. p. 165-172.
- KÖPPEN, W. Climatologia: Un estudio de los climas de la Tierra. Trad. Pedro R.H. Perez, Fondo de Cultura Económica, México, 1948.
- KOSUGI, K. lognormal distribution model for unsaturated soil hydraulic properties, **water resour. res.**, **32(9)**, 2697-2703, 1996.
- LIBARDI, P. L.; **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2005. 329p.
- MEIWIRTH, K. & MERMOUD, A. 2004. Simulation of herbicide transport in an alluvial plain, pp. 951-955, In C. Pahl-Wostl, et al., (eds.) iEMSs 2004 International Congress: Complexity and Integrated Resources Management. iEMSs, Switzerland.
- MONIZ, A.C. Elementos da pedologia. São Paulo, Editora de Universidade de São Paulo, 1972. 275p.
- MONTEIRO, A.L.N.; MONTENEGRO, A.A. DE A.; MONTENEGRO, S.M.G. & SANTOS, F.X. Avaliação de lavagem parcial de sais em neossolo flúvico irrigado, utilizando modelagem computacional. Eng. Agríc., Jaboticabal, v.29, n.2, p.207-220, 2009.
- MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. **Water Resour. Res.** 12:513-522.
- POCH, R.; MAILHOL, J.C.; CANDELA, L. & RAMÍREZ DE CARTAGENA, Y F. Estimación de los riesgos de lixiviación de nitratos en suelos agrícolas: ¿enfoque numérico o funcional?. VII Jornadas sobre Investigación de la Zona no Saturada del Suelo, Samper Calvete y A. Paz González (ed.), A Coruña, p. 177-184, 2005.
- PREFEITURA MUNICIPAL DE RIO NEGRINHO. Características: agricultura, pecuária e extração mineral. Disponível em: <<http://www.rionegrinho.sc.gov.br/caracteristicas.htm>>. Acesso em: 14 junho de 2009.

- PREVEDELLO, C.L. **Física do solo com problemas resolvidos**. Curitiba, Salesward-discovery, 1996. 446p.
- PREVEDELLO, C.L.; KOBAYAMA, M.; JACOB, G.A.; DIVARDIN, C.R. Comparação dos métodos do perfil instantâneo e de van Genuchten na obtenção da condutividade hidráulica de uma areia marinha. **R. Bras. Ci. Solo**, Campinas, v.19, p.1-5, 1995.
- REICHARDT, K. & TIMM, L.C. Solo, Planta e Atmosfera: conceitos, processos e aplicações. São Paulo: Editora Manole, 2004. 478p.
- RICHARDS, L.A. Capillary conduction of liquids through porous mediums. **Physics**, New York:Academic Press, v. 1, p. 318-333, 1931.
- ROJAS, L.R. & OTÁLVARO, M.V.V. Vulnerabilidad a la contaminación, zona sur acuífero del valle del cauca, Colombia. *Boletín de ciencias de la tierra*, n 23, p. 69-84, 2008.
- SALAGER, S.; YOUSOUFI, M.S.E.; SAIX, C. Influence of Temperature on the Water Retention Curve of Soils: Modelling and Experiments. In: T. SCHANZ, (Ed), **Experimental Unsaturated Soil Mechanics**. Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2007. p. 251-258.
- SANCHEZ, C.A.; ZERIHUN, D.; WARRICK, A.W. & FURMAN, A. 2003. Efficient surface fertigation of high value horticulture crops, pp. 77-82. Western Nutrient Management Conference, Salt Lake City, UT.
- SANTA CATARINA. Gabinete de Planejamento e Coordenação Geral. Subchefia de Estatística, Geografia e Informática. **Atlas de Santa Catarina**. Rio de Janeiro: Aerofoto Cruzeiro, 1986. 173p.
- SCANLON, B. R.; CHRISTMAN, M.; REEDY, R. C. & GROSS, B. 2002, Intercode comparisons for simulating water balance in an engineered cover, in 2001 International Containment and Remediation Technology Conference, Orlando, Florida, Institute for International Cooperative Environmental Research, Florida State University, Paper ID. No. 148, <http://www.iicer.fsu.edu>, 3 p.
- ŠIMŮNEK, J.; ŠEJNA, M.; SAITO, H.; SAKAI, M.; VAN GENUCHTEN M. Th., **The Hydrus-1D Software Package for Simulating the Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably Saturated Media, Version 4.0**. Riverside: Department of Environmental Sciences, University of California Riverside, California, USA, 2008. 315p. (HYDRUS Software Series 3)
- SONNEVELD, M.P.W.; BACKX, M.A.H.M. & BOUMA, J. Simulation of soil water regimes including Pedotransfer functions

- and land-use related preferential flow. *Geoderma* 112, p.97–110, 2003.
- SOUZA, Z.M. & ALVES M.C. Movimento de água e resistência à penetração em um Latossolo Vermelho distrófico de cerrado, sob diferentes usos e manejos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande/PB, v.7, n.1, p.18-23, 2003.
- VAN GENUCHTEN, M.TH. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, v.44, p.892-898, 1980.
- VEIHMEYER, F.J. & HENDRICKSON, A.J. Methods of measuring field capacity and wilting percentages of soils. **Soil Sci.**, Baltimore, v.68, p.75-94, 1949.
- VEIHMEYER, F.J. & HENDRICKSON, A.J. Soil moisture conditions in relation to plant growth. **Plant Physiol.**, Lancaster, v.2, p.71-78, 1927.
- VOGEL, T. & CÍSLEROVÁ M. On the reliability of unsaturated hydraulic conductivity calculated from the moisture retention curve, **transport in porous media**, 3, 1-15, 1988.
- VOMOCIL, J.A. Porosity. In: Black, C.A.(ed.) **Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical properties, including statistics of measurement and sampling**. Madison: American Society of Agronomy, p.499-510. 1965.
- WATANABE, K. 2008. Water and heat flow in a directionally frozen silty soil. In: H. Saito, M. Sakai, N. Toride and J. Simunek (eds.), Proc. of The Third HYDRUS Workshop, June 28, 2008, Tokyo University of Agriculture and Technology, Tokyo, Japan, ISBN 978-4-9901192-5-6, pp. 15-22, 2008.