

MODELAGEM NUMÉRICA DA DINÂMICA DA ÁGUA EM SOLOS ESTRATIFICADOS

Masato Kobiyama Dpto. Eng. Sanitária e Ambiental – UFSC - kobiyama@ens.ufsc.br

Milena Barcellos Curso de Eng. Agrônômica – UFPR - milenabarcellos@msn.com

Dirceu Fruet Curso de Eng. Agrônômica – UFPR - dirceu@agrarias.ufpr.br

Marco Aurélio Ziliotto Instituto – ECOPLAN - marco@ecowood.com.br

1 INTRODUÇÃO

A modelagem numérica possui vantagens como facilidade de execução, baixos custos e rápida obtenção dos resultados, permitindo a simulação de experimentos inviáveis na prática. Isso facilita a previsão dos fenômenos e processos naturais, possibilitando, desta maneira, elaboração de Relatórios de Impacto Ambiental (RIMA). Além disso, o avanço das técnicas computacionais em relação ao *software* e *hardware* tem permitido sofisticções nos modelos e facilitando suas simulações.

Assim sendo, este método recentemente vem sendo freqüentemente utilizado nos estudos ambientais, dentre os quais a dinâmica da água no solo. Devido a questão de contaminação do solo e da água subterrânea e também de risco de erosão subsuperficial (por exemplo, deslizamento e desmoronamento) em áreas rurais e urbanas, tal estudo torna-se cada vez mais importante.

No caso do estudo da dinâmica da água no solo, o conhecimento das propriedades hidráulicas do solo, ou seja, as relações entre carga de pressão (ψ), umidade volumétrica (θ), e condutividade hidráulica (K) é indispensável (KOBİYAMA et al., 1998). As equações mais utilizadas tanto para θ (ψ) quanto K (ψ) são de Van Genuchten (1980) e Brooks & Corey (1964). Kobiyama et al. (1998) fizeram comparação entre estas equações, e comentaram suas vantagens e desvantagens, concluindo que Van Genuchten (1980) é melhor nos casos de estudos numéricos. Além disso, a partir de ensaio laboratorial para determinar K (ψ), Prevedello et al. (1995) apresentaram vantagens da equação de Van Genuchten (1980).

A dinâmica da água no solo pode ser tratada uni, bi e tri-dimensionalmente. É claro que o fenômeno real ocorre tridimensionalmente. Apesar das simulações que usam o fluxo vertical unidimensional não representarem adequadamente situações reais do campo, o modelo unidimensional é a primeira fase para, quantitativamente, testar o comportamento do fluxo. Além disso, a análise unidimensional tem desempenhado um importante papel no exame das propriedades hidráulicas do solo, bem como permitido uma verificação básica ao fim de uma simulação multidimensional.

Dessa maneira, o objetivo do presente trabalho foi desenvolver um modelo numérico de fluxo unidimensional, vertical, transiente, saturado e não saturado em solos estratificados. Além disso, descrevendo as propriedades hidráulicas do solo com as equações de Van Genuchten (1980) em perfis do solo reais, demonstrou-se a dinâmica da água no solo.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

O trabalho foi realizado com dados obtidos de duas bacias hidrográficas experimentais sendo uma caracterizada por 18,12 ha de reflorestamento de *Pinus* sp. na Fazenda Pizzato localizada no Município de General Carneiro – PR (Bacia do Pinus), e outra caracterizada por 3,61 ha de Floresta Ombrófila Mista no Parque Estadual das Araucárias localizado no Município de Palmas – PR (Bacia do Matão). Na primeira, observou-se 4 perfis e na segunda 3 perfis. Estes perfis foram classificados segundo EMBRAPA (1999) (TABELA 1).

Em cada perfil, cada horizonte foi avaliado em termos das propriedades hidráulicas do solo. A metodologia de analisá-las e seus resultados foram apresentados por Fruet (2001).

2.2 Propriedades hidráulicas do solo

Para expressar as propriedades hidráulicas do solo obtidas para cada horizonte em cada perfil, aplicou-se as equações de VAN GENUCHTEN (1980). A equação para retenção de água é:

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

onde θ é a umidade do solo (cm^3/cm^3), θ_s é a umidade saturada (cm^3/cm^3), θ_r é a umidade residual (cm^3/cm^3), ψ é a carga de pressão, α , m e n são parâmetros de ajuste ($m = 1 - 1/n$). A equação para condutividade hidráulica é:

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

onde $K(\psi)$ é a condutividade hidráulica e K_s é a condutividade hidráulica saturada.

TABELA 1 - CLASSIFICAÇÃO DOS PERFIS E SUAS RESPECTIVAS BACIAHIDROGRÁFICAS

Perfil	Classificação	Bacia Hidrográfica
P17	Cambissolo háplico	Bacia do Matão
P29	Cambissolo háplico	Bacia do Matão
P29M	Gleissolo háplico	Bacia do Matão
P1	Latossolo vermelho-amarelo	Bacia do Pinus
P2	Cambissolo háplico	Bacia do Pinus
P3	Neossolo litólico	Bacia do Pinus
P4	Cambissolo háplico	Bacia do Pinus

2.3 Método de diferenças finitas para o movimento unidimensional, vertical da água no solo

A equação de RICHARDS (1931) no caso de fluxo unidimensional é expressa como:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = C(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial z} - K(\psi) \right] \quad (3)$$

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

Esta equação apresenta uma característica fortemente não linear, o que dificulta sua solução. Desse modo, a fim de facilitar sua resolução, PREVEDELLO (1996) realizou modificações para obter sua linearização em relação ao espaço. O mesmo autor adotou o método iterativo de Newton-Raphson para resolver a equação não linear no tempo, apresentando um modelo simples escrito numa linguagem computacional *Basic*. Embora adotando o mesmo procedimento, o presente trabalho modificou e reestruturou o modelo descrevendo-o na linguagem *Fortran 90*.

2.4 Condição de contorno inicial e dados de entrada

A condição de contorno no extremo superior foi adotada como precipitação de intensidade constante de 5 mm/h, sem ocorrência de evapotranspiração. No extremo inferior foi adotada como gradiente hidráulico unitário.

A condição de umidade volumétrica inicial para cada centímetro (cada ponto de nó) foi considerada como $\theta r + (\theta s - \theta r)/3$.

Para a execução do modelo de simulação numérica, os intervalos de tempo e distância foram adotados como 10,0 segundos e 1,0 cm, respectivamente. Os dados de entrada das propriedades hidráulicas do solo são: condutividade hidráulica saturada (Ks), umidade de saturação (θs), umidade residual (θr), e parâmetros α , m e n , sendo obtidos em laboratório, para cada horizonte de cada perfil, a partir de 4 amostras (as 2 primeiras para Ks , e as demais para a determinação dos demais parâmetros).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Devido a complexidade de interações entre perfis de horizontes de solos não homogêneos, e ao fato do modelo desenvolvido ter sido baseado num modelo de simulação numérica para solos homogêneos elaborado por PREVEDELLO (1996), ocorreram divergências na execução do programa com dados de alguns horizontes, de forma que este modelo necessita ainda de ajustes e correções para os Perfil P17 (Bacia do Matão) e P4 (Bacia do Pinus). A facilidade de ocorrer divergência na execução da simulação pode ser também associada com a linearização no espaço.

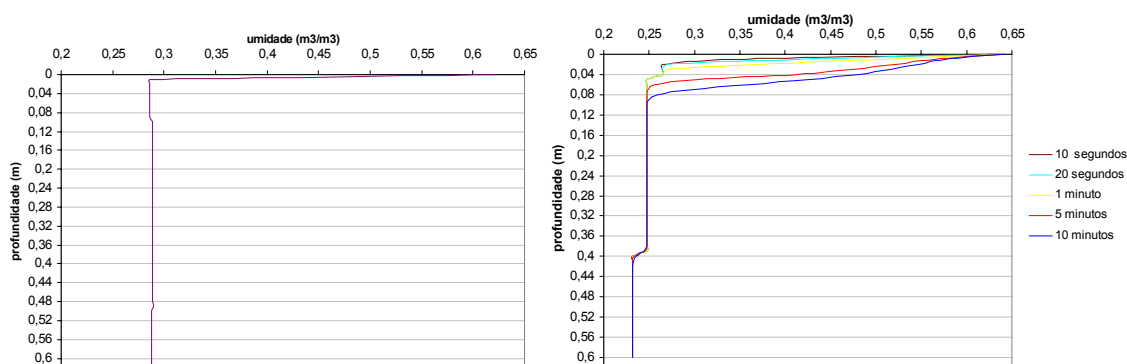
Para os demais perfis obteve-se resultados de perfis de umidade para os horizontes ao longo do tempo de infiltração. A FIGURA 1 apresenta os resultados obtidos para os perfis P1, P2 e P3 da Bacia do Pinus, para tempo de infiltração de 10 segundos, 20 segundos, 1 minuto, 5 minutos e 10 minutos. A Figura 2 apresenta os resultados obtidos para os perfis P29 e P29M da Bacia do Matão.

O perfil P1 demonstra apenas uma curva devido ao fato dos perfis de umidade nos diferentes intervalos de tempo se sobreporem. Tal fato ocorre devido ao perfil P1 tratar-se de um latossolo vermelho-amarelo, apresentando maior homogeneidade dos horizontes (gradiente textural) (Figura 1(a)).

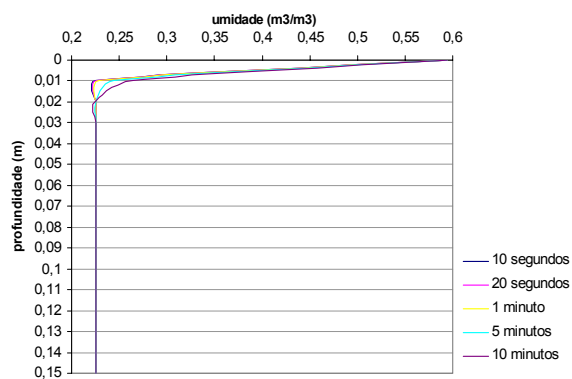
A Figura 1(b) mostra a variação de umidade no perfil de um cambissolo háptico é maior que a do latossolo e do neossolo litólico. No neossolo litólico, sua profundidade é menor que para os demais solos, portanto a maior variação de umidade está nos centímetros superficiais do solo (Figura 1(c)).

A figura 2 apresenta os perfis de umidade nos diferentes intervalos de tempo para os perfis P29M e P29 da Bacia do Matão. O perfil P29M (FIGURA 2(a)) possui um perfil mais irregular da variação de umidade do que o perfil P29 (FIGURA 2(b)).

Comparando os perfis da Bacia do Pinus (FIGURA 1) com a Bacia do Matão (FIGURA 2) observa-se que os perfis da Bacia do Matão apresentam a variação de umidade com maior dinâmica.



(b)



(c)

FIGURA 1 – PERFIS DE UMIDADE OBTIDOS PELO MODELO DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA PARA OS PERFIS DA BACIA DO PINUS: (a) PERFIL P1; (b) PERFIL P2; (c) PERFIL P3

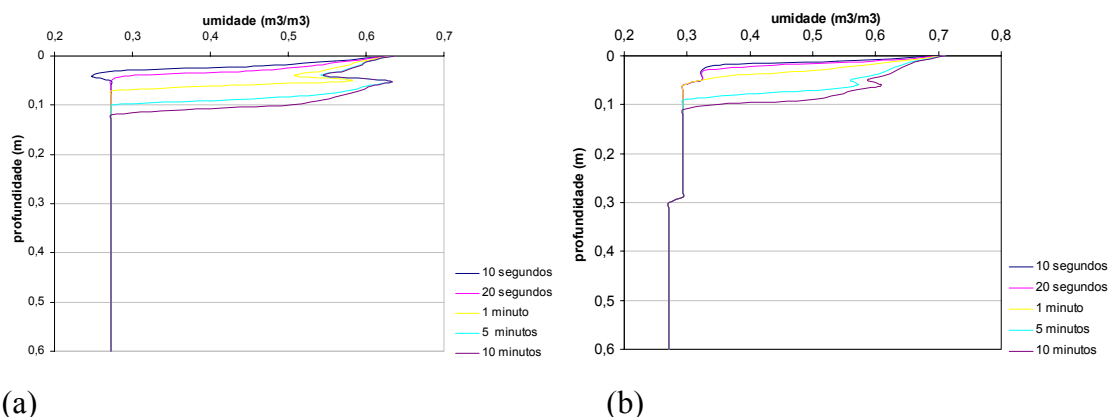


FIGURA 2 – PERFIS DE UMIDADE OBTIDOS PELO MODELO DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA PARA OS PERFIS DA BACIA DO MATÃO: (a) PERFIL P29M; (b) PERFIL P29.

4 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÃO

Embora ainda necessite de alguns ajustes e aferições, o modelo numérico proposto neste trabalho mostrou-se como um princípio de modelagem numérica para a representação real dos fenômenos de infiltração vertical da água em solos estratificados.

As distribuições da umidade do solo nos perfis demonstraram que perfis caracterizados por estratificações heterogêneas apresentaram maior variação da distribuição da umidade do solo ao longo do perfil. Dessa forma, a execução do modelo para esses perfis apresentou resultados consistentes de perfis de umidade.

Ficou bem claro que, além da estratificação, as propriedades hidráulicas do solo influenciam fortemente no comportamento da umidade do solo.

Recomenda-se que o estudo tenha continuidade para aferir o modelo de simulação numérica de forma a melhor representar o movimento uni-dimensional da água no perfil de solo, e adequar-se ao maior número de condições e perfis de solos possíveis. Além disso, a comparação entre os dados simulados pelo modelo e os dados monitorados a campo deverá ser feita para a validação do mesmo.

REFERÊNCIAS

- BROOKS, R.H.; COREY, A.T. **Hydraulic properties of porous media**. Fort Collins: Colorado State Univ., 1964 27p. (Hydrology Paper n.3)
- EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: Embrapa Produção de Informação; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999. 412p.
- FRUET, D. **Avaliação das propriedades hidráulicas do solo nas bacias hidrográficas experimentais**. Curitiba: UFPR/LAMOS, 2001. 12p. (Relatório final para a bolsa de iniciação científica PIBIC/CNPq. 2000-2001).
- KOBIYAMA, M.; SHINOMIYA, Y.; OLIVEIRA, S.M.; MINELLA, J.P.G. Consideração da pedogênese através das propriedades hidráulicas do solo. In: Fórum Geo-Bio-Hidrologia (1: 1998: Curitiba), **Anais**, Curitiba: FUPEF, 1998. p.165-172
- PREVEDELLO, C.L.; KOBIYAMA, M.; JACOB, G.A.; DIVARDIN, C.R. Comparação dos métodos do perfil instantâneo e de vanGenuchten na obtenção da condutividade hidráulica de uma areia marinha. **R. Brás. Ci. Solo**, Campinas, v.19, p.1-5, 1995.

PREVEDELLO, C. L. **Física do solo com problemas resolvidos**. SAEAFS: Curitiba, 1996. 446p.

RICHARDS, L.A. Capillary conduction of liquids through porous mediums. **Physics**, New York, v.1, p.318-333, 1931.

VAN GENUCHTEN, M.T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, v.44, p.892-898, 1980.