

AVALIAÇÃO DA IMPORTÂNCIA DA ZONA NÃO-SATURADA EM MODELOS DE ÁGUA SUBTERRÂNEA

Marcelo R. Sousa¹; David L. Rudolph²; Jon P. Jones³

Resumo: O fluxo e o transporte de contaminantes na zona não-saturada frequentemente não é considerado em modelos de águas subterrâneas. No entanto, em algumas situações, a zona não-saturada pode desempenhar um papel importante para a resposta transiente do sistema e portanto é desejável que seja considerada. Esse trabalho apresenta uma metodologia para uma avaliação simplificada da importância da zona não-saturada no comportamento transiente em resposta a mudanças na superfície. Essa metodologia consiste em uma série de simulações em uma coluna 1-D considerando diferentes espessuras para a zona não-saturada, o que permite uma avaliação quantitativa do papel da zona não-saturada em uma dada área de estudo. Além disso, essa abordagem permite a avaliação de outros aspectos numéricos relevantes, como a estimativa dos erros envolvidos ao se adotar representações numericamente mais estáveis do fluxo-não saturado e a determinação da discretização vertical necessária.

Palavras-chave: água subterrânea, modelagem numérica, zona não-saturada

Abstract: Flow and contaminant transport in the unsaturated zone are often not represented in groundwater models. However, in some situations, the unsaturated zone may play an important role for the transient response of the system and therefore it is desirable that it is taken into account. This work presents a methodology for a simplified evaluation of the importance of the unsaturated zone for the transient response to changes in ground surface. This approach consists in a series of 1-D column simulations considering different unsaturated zone thicknesses, which allows a quantitative evaluation of the role of the unsaturated zone in a given study area. In addition, it allows the evaluation of other relevant numerical aspects, such as an estimation of errors related to

¹ Dept. of Earth and Environmental Sciences, University of Waterloo, 200 University Avenue West, Waterloo, Ontario, Canada N2L 3G1, 1 519 888-4567, m2sousa@scimail.uwaterloo.ca.

² Dept. of Earth and Environmental Sciences, University of Waterloo, 200 University Avenue West, Waterloo, Ontario, Canada N2L 3G1, 1 519 888-4567, drudolph@scimail.uwaterloo.ca.

³ Dept. of Earth and Environmental Sciences, University of Waterloo, 200 University Avenue West, Waterloo, Ontario, Canada N2L 3G1, 1 519 888-4567, jpjones@scimail.uwaterloo.ca.

using numerically more stable representations of the unsaturated flow equation and the determination of the required vertical discretization.

Keywords: groundwater, numerical modeling, unsaturated zone

1 - INTRODUÇÃO

Uma grande parte dos modelos numéricos de águas subterrâneas não considera a zona não-saturada, ou seja a região entre o nível d'água e a superfície. Nesses casos somente é simulado o fluxo saturado, ou seja, o topo do nível d'água é considerado como o limite superior do modelo e não a superfície do terreno. Essa é uma das hipóteses considerada pelo MODFLOW [1], um programa bastante utilizado para a simulação de fluxo subterrâneo.

Uma das razões para esse fato é que a representação numérica do fluxo com saturação variável é muito mais difícil e exigente em termos computacionais do que a do fluxo saturado. A equação de fluxo não-saturado é não-linear, exige artifícios numéricos mais elaborados para garantir convergência e estabilidade da solução e em geral requer um nível de discretização muito maior. Isso resulta em malhas mais densas (i.e. menores elementos ou células) e tempos de processamento muito maiores.

No entanto, em algumas situações, a zona não-saturada desempenha um papel importante para a resposta do sistema e portanto é desejável que seja considerada no modelo. Para essas situações, existem diversos modelos disponíveis que podem ser utilizados, como FEFLOW [2], WATFLOW [3] e MODFLOW-Surfact [4].

Nesses casos, em função da dificuldade numérica, geralmente formulações aproximadas da zona não-saturada são empregadas, modificando-se as equações que relacionam carga piezométrica e saturação (e.g. Brooks e Corey [5] e Van Genuchten [6]). Essas simplificações resultam em uma solução mais rápida e estável e podem modificar significativamente as previsões do modelo.

Nesse contexto, se torna importante o desenvolvimento de uma abordagem objetiva para definir os casos em que a representação da zona não-saturada se torna importante e quais são os erros envolvidos em eventuais simplificações das equações de fluxo não-saturado.

2 - METODOLOGIA

É proposta uma metodologia relativamente simples com os seguintes objetivos:

- Estimar o erro envolvido ao se representar simplificada o fluxo não-saturado. No exemplo utilizado foi avaliada a representação simplificada da equação de Van Genuchten disponível no software FEFLOW [2]
- Determinar a discretização vertical necessária para representar adequadamente a zona não-saturada. Em outras palavras, determinar a espessura máxima das camadas do modelo acima do nível d'água.
- Avaliar a importância dos processos na zona não-saturada nos resultados do modelo. Dessa maneira, é possível avaliar objetivamente se o fluxo não-saturado deve ou não ser considerado, antes de se desenvolver um modelo numérico mais complexo da área em estudo.

Em um sistema transiente, a zona não-saturada atua como um reservatório dinâmico para água e contaminantes. O fluxo que chega ao topo do nível d'água é uma representação defasada e atenuada das condições transientes impostas à superfície. Para se avaliar a importância da zona não-saturada, esses efeitos devem ser quantificados e analisados. Se forem significativos, deve-se representar a zona não-saturada no modelo da área. Caso a defasagem entre as condições da superfície e do topo do nível d'água seja considerada aceitável, pode-se utilizar um modelo saturado, como o MODFLOW em etapas posteriores de modelagem.

A metodologia proposta é baseada em uma série de simulações numéricas em uma coluna vertical unidimensional que simula a zona não-saturada do problema em questão. A resposta do topo (superfície) e da base (nível d'água) são comparadas e a sensibilidade a diversos parâmetros físicos e numéricos pode ser estimada.

Para ilustrar a aplicação da metodologia, um exemplo é apresentado utilizando-se o programa FEFLOW [2] e considerando-se uma areia siltosa com condutividade hidráulica de 5×10^{-4} m/s, porosidade de 0.37, saturação residual de 0.049 e coeficientes A e n de Van Genuchten de 3.475 e 1.746, respectivamente. Em uma simulação de 50 anos com fluxo em estado estacionário (recarga de 200 mm/ano), um pulso de concentração unitária

de um composto não-reativo com 20 anos de duração foi aplicado na superfície da coluna, seguido da aplicação de 30 anos de recarga com concentração nula. No exemplo apresentado, o resultado de interesse consiste na resposta do sistema a variações na concentração aplicada na superfície do terreno.

3 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para uma zona não-saturada de 5 metros de espessura, a adoção de uma representação simplificada para a Van Genuchten introduziu um erro relativamente pequeno (cerca de 6%) na determinação da concentração no nível d'água em relação a simulação utilizando a equação completa de van Genuchten.

A discretização vertical máxima para a representação da zona não-saturada foi de 1m. Modelos com camadas mais espessas são afetados por dispersão numérica, que exagera a atenuação da resposta calculada no nível d'água (Figura 1). Para essas simulações, uma zona não-saturada de 40 metros de espessura foi utilizada.

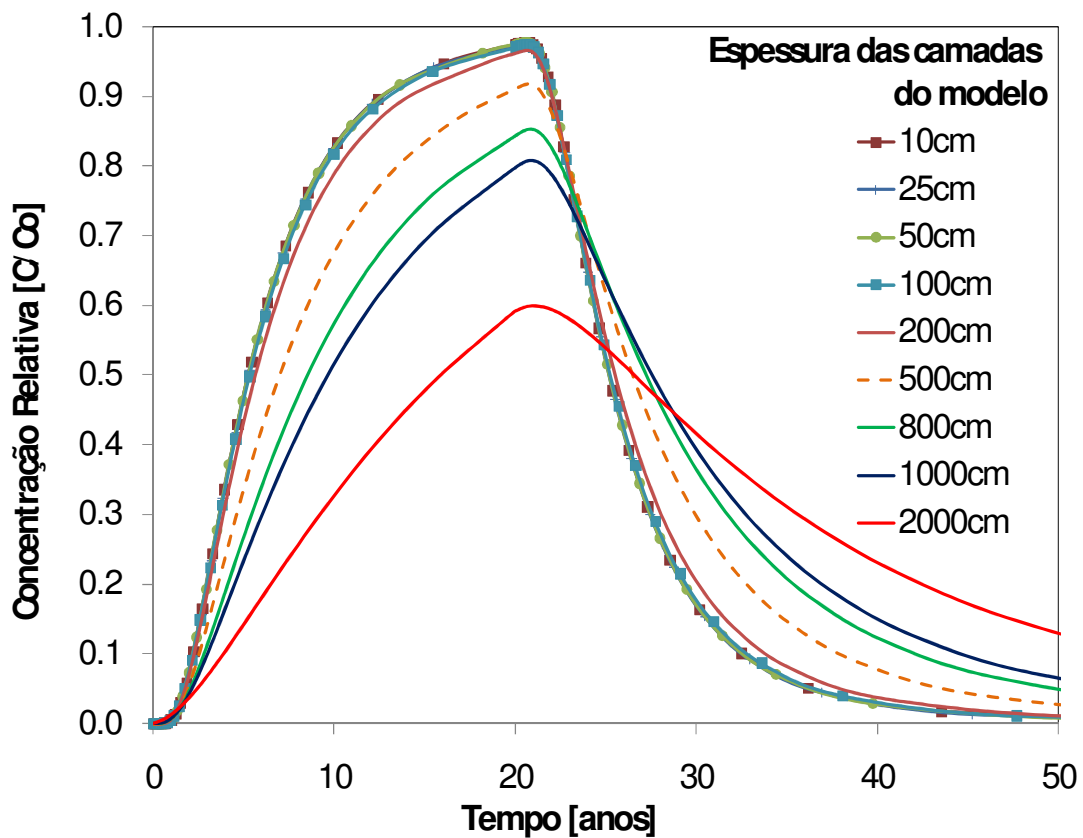


Figura 1. Concentração calculada no nível d'água para diferentes discretizações verticais (espessura total da zona não saturada = 40 metros)

Conhecendo-se os erros envolvidos na simplificação das equações de fluxo não-saturado e a discretização vertical necessária, a importância da zona não-saturada pode ser avaliada pela simulação de diversas colunas com comprimentos diferentes (Figura 2). Pela avaliação desses resultados, a decisão final sobre a necessidade de consideração da zona não-saturada pode ser tomada. Nessa etapa, é importante o conhecimento da escala de tempo de interesse, da espessura máxima e média da zona não-saturada da área em questão e do grau de erro definido como aceitável.

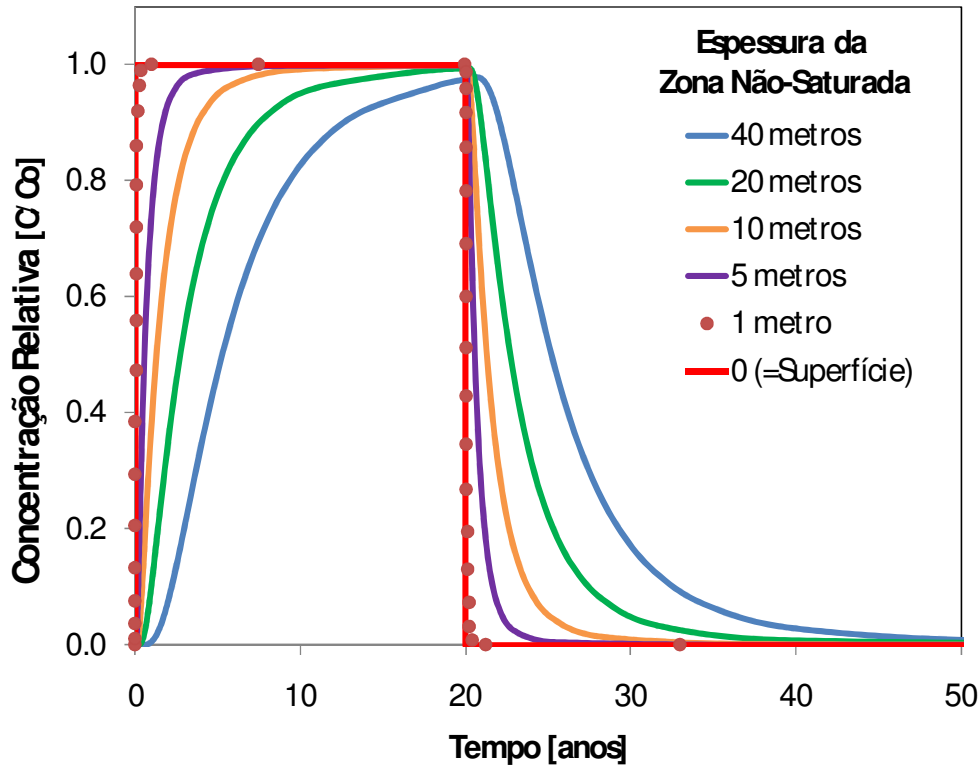


Figura 2. Concentração calculada no nível d'água para diferentes espessuras da zona não-saturada (discretização vertical de 1m)

O resultado desse tipo de análise é função das características hidrogeológicas da área a ser modelada, da espessura da zona não-saturada e da finalidade do modelo. Sugere-se que essa metodologia seja aplicada com dados específicos da área de interesse no início de projetos de modelagem em que aspectos transientes são importantes e para os quais se considere a inclusão de processos na zona não-saturada.

Mesmo que não seja possível, por restrições computacionais, a consideração da zona não-saturada, a metodologia proposta permite conhecer melhor a magnitude dos erros envolvidos ao se utilizar somente um modelo saturado.

No exemplo apresentado, a avaliação se limitou ao transporte de contaminantes. Porém, a mesma abordagem pode ser utilizada para se avaliar a relevância da zona não-saturada em termos de fluxo, em problemas transientes.

4 - BIBLIOGRAFIA

- [1] Harbaugh AW, Banta ER, Hill MC, McDonald MG. (2000) MODFLOW-2000, US Geological Survey modular ground-water model-user guide to modularization concepts and the ground-water flow process. US Geological Survey Open-File Report 00-92, 2000.
- [2] Diersch, H.- J. G. (2006), FEFLOW Finite Element Subsurface Flow and Transport Simulation System - Reference manual, User's Manual, White Papers - Release 5.3. WASY Institute for Water Resources Planning and Systems Research. Berlin; 2006.
- [3] Molson, J. W., Beckers, J., Frind, E. O., and Martin, P. J. (2002). WATFLOW 3D version 4.0, A Three-Dimensional Groundwater/Surface Water Flow Model, Users Guide. Ontario, Canada: Department of Earth Sciences, University of Waterloo, Canada.
- [4] HydroGeoLogic Inc. (1995) MODFLOW-SURFACT, an enhanced MODFLOW based groundwater flow and transport model. Herndon, Virginia HydroGeoLogic
- [5] Brooks, R.H. and A.T.Corey (1964) Hydraulic properties of porous media. Hydrology Paper no. 3, Civil Engineering. Dep., Colorado State Univ. Fort Collins, Colorado, EUA.
- [6] van Genuchten, M. Th. (1980). A closed-form equation for pre-dicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. SoilSci. Soc. Am. J. 44:892-898.