



NOTA TÉCNICA

USO DE TRAÇADORES NA AVALIAÇÃO DA INFILTRAÇÃO EM SOLOS DE ÁREAS GNÁISSICAS DO COMPLEXO DO BAÇÃO, MG.

Fernando de Morais

Professor Adjunto do Departamento de Geografia, Universidade Federal do Tocantins – UFT. Rua 03, Q.17 s/n, CEP: 77500-000 Porto Nacional – TO. E-mail: morais@uft.edu.br

Luis de Almeida Prado Bacellar

Professor Adjunto do Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP. Campus Morro do Cruzeiro, s/n, CEP: 35.400-000 Ouro Preto – MG. E-mail: bacellar@degeo.ufop.br

Resumo

O presente trabalho objetivou avaliar a infiltração em solos de áreas gnáissicas da região do Complexo Metamórfico Bação (MG). Procurou-se, também, relacionar os padrões de infiltração com propriedades físicas e hídricas dos solos levantadas em estudos anteriores. Para tal, foram realizados ensaios de infiltração com o traçador Brilliant Blue FCF e com cloreto de sódio. Os padrões de fluxo observados variam de homogêneo através da matriz (fluxo em pistão) a fluxo por macroporos com média interação. Estes resultados indicam uma permeabilidade significativa da matriz, mas com forte condicionamento por macroporos verticais, sobretudo por raízes de gramíneas no horizonte A. Biocavidades (de formigas e cupins) são também importantes, especialmente no horizonte B. Confirmou-se que a infiltração é mais significativa nas convexidades de relevo que nas concavidades. Os métodos utilizados se mostraram promissores para avaliação da velocidade e forma de fluxos pela zona não saturada destes solos tropicais.

Palavras-chave: infiltração; macroporos; traçador; padrões de fluxo em solo.

Abstract

This paper aims to evaluate the infiltration in soils from a region with gneissic rocks of the Bação Metamorphic Complex (MG). We intend either to relate the infiltration pattern with hydraulic and physical soil properties, previously presented in other papers. Infiltration essays were carried out with the dye Brilliant Blue FCF and with sodium chloride. The flow patterns ranged from homogeneous through the soil matrix (piston flow) to macropore flow with medium interaction. The data show a large matrix permeability, strongly conditioned by vertical macropores, especially by grass roots in the A horizon. Biocavities (by ants and termites) are equally important, especially in the B horizon. Previous studies were confirmed, showing that the infiltration is higher on noses than on hollows. The used methods can be considered reliable to evaluate the velocity and flow pattern in the unsaturated zone of these tropical soils.

Keywords: infiltration; macropores; tracers; soil flow pattern.

Introdução

A infiltração e a percolação de água através dos horizontes superficiais do solo dependem de diversos fatores intrínsecos e extrínsecos (SELBY, 1993; SADEGHI et al., 2000; PETERSEN et al., 2001; WEILER, 2001). Entre os intrínsecos destacam-se a textura, a estrutura e a configuração espacial dos horizontes do solo. Como fatores extrínsecos destacam-se as condições de umidade inicial e o gradiente hidráulico da frente de saturação. Todos estes fatores são influenciados direta ou indiretamente pelas condições climáticas, pela forma de relevo e pelas formas de uso e ocupação.

O fluxo da água durante os processos de infiltração e percolação pelos horizontes superficiais do solo pode se dar por diversas formas e velocidades (BEVEN & GERMANN, 1982; AEBY, 1998; WEILER, 2001). Pode ser homogêneo, pela matriz do solo, ou então por caminhos preferenciais, aproveitando-se de macroporos, com variados níveis de interação com a matriz do solo (Figura 1). O fluxo por

macroporos é importante, pois pode acelerar alguns processos do ciclo hidrológico, como a recarga e a geração de fluxos subsuperficiais, como também o transporte de contaminantes. Contudo, o estudo dos fluxos que envolvem macroporos é muito mais complexo, tanto pela dificuldade de levantamento da distribuição espacial destas descontinuidades, como também pela dificuldade de sua modelagem (BEVEN & GERMANN, 1982).

Entre as técnicas comumente utilizadas para avaliar processos hidrológicos destaca-se uso de traçadores (FLURY, 1996), frequentemente empregados para avaliar as taxas e formas de infiltração e percolação, e que são invariavelmente incorporados às águas infiltrantes. Os traçadores devem ser pouco adsorvidos pelo solo, apresentar baixa concentração natural (*background*), pequena toxicidade e baixo custo de aquisição, aplicação e análise (RAPOSO, 1997; FLURY & WAI, 2003). Sais, corantes e isótopos são alguns dos muitos traçadores comumente utilizados para este fim e a decisão de qual utilizar dependerá dos objetivos da investigação.

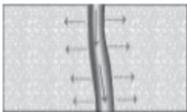
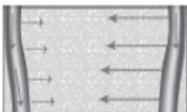
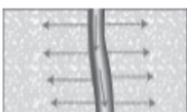
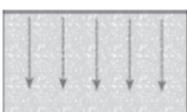
Tipo de fluxo	Processos de fluxo	Feições do solo	Padrão característico da área tingida
Fluxo por macroporos com baixa interação		Macroporos em uma matriz saturada ou com baixa permeabilidade	
Fluxo por macroporos com interação mista (alta e baixa)		Macroporos em uma matriz heterogênea ou macroporos com fluxo por macroporos variável	
Fluxo por macroporos com alta interação		Macroporos em uma matriz permeável	
Fluxo pela matriz heterogênea e formação de dígitos		Solo espacialmente heterogêneo, repelência de água ou instabilidade de fluxo em solos de textura grossa ou com variações texturais	
Fluxo pela matriz homogênea		Solo permeável	

Figura 1 – Tipos e processos de fluxo envolvidos na infiltração e percolação na zona não-saturada do solo (WEILER, 2001).

Os traçadores colorimétricos (corantes) têm ganhado destaque desde a segunda metade do século XX (FLURY & WAI, 2003) no estudo de fluxos nos horizontes mais superficiais (zona vadosa) dos solos. São comumente aplicados na zona vadosa de duas maneiras, dissolvidos em solução aquosa ou depositados em forma de pó nos horizontes do solo e posteriormente dissolvidos pelas águas de infiltração (FLURY & WAI, 2003). Em meio a uma grande variedade, o Brilliant Blue FCF (C. I. 42090) tornou-se um dos mais utilizados (FLURY & WAI, 2003), devido a sua baixa sensibilidade às variações de pH, baixa toxicidade, baixa adsorção pelo solo e fácil detecção (FLURY & FLÜHLER, 1994; Forrer, 1997; Aeby, 1998; Kasteel et al., 2002; Reichenberger et al., 2002). No Brasil, destaca-se o trabalho realizado na região do cerrado mato-grossense (REICHENBERGER et al., 2002), no qual se utilizou tal traçador para avaliar a lixiviação de herbicidas em solos tropicais, normalmente caracterizados por forte agregação e boa drenagem por fluxo preferencial.

Os padrões de distribuição de um traçador colorimétrico em um perfil ajudam a revelar os processos e tipos de fluxo (Figura 1) e eventuais influências de características estruturais do solo, como estratificação e macroporos.

Entre os traçadores químicos destaca-se o cloreto de sódio, que também tem se mostrado eficaz na determinação da velocidade e padrão de fluxo da água, tanto na zona não-saturada, quanto na saturada, já que o Cl⁻ é considerado um elemento conservativo. De acordo com Allison et al. (1994), o padrão da concentração de cloreto em profundidade pode demonstrar de forma simples o tipo de fluxo no perfil de solo (fluxo pela matriz ou por macroporos como também a extração de água pelas raízes, etc.).

O presente estudo objetivou avaliar as taxas e os padrões de fluxo nos solos tropicais da região de rochas gnáissicas do Complexo do Bação. Procurou-se também relacionar tais informações com algumas propriedades físicas e hídricas dos solos, tais como: textura, estabilidade dos agregados e condutividade hidráulica. Para tanto, foram selecionadas na região duas áreas com características pedogeomorfológicas contrastantes, uma em encosta com forma convexa e com solos mais desenvolvidos (estação Holanda) e outra em encosta côncava, com solos menos desenvolvidos (estação Dom Bosco). Este estudo vem complementar uma série de pesquisas que vem sendo desenvolvidas na região com o objetivo de caracterizar o regime hidrológico, os riscos geológicos e os impactos ambientais (SOBREIRA, 2000; BACELLAR, 2000; FUTAI, 2002; SANTOS, 2001; MORAIS, 2003; COSTA, 2005; MORAIS & BACELLAR, 2006).

Características das Áreas Estudadas

Os experimentos foram conduzidos em solos da região sudeste do complexo de rochas do embasamento cristalino (Complexo do Bação), no interior do Quadrilátero Ferrífero (Figura 2), em área do município de Ouro Preto. A região apresenta clima do tipo Cwa, de Köppen, com marcante contraste pluviométrico anual, com chuvas concentradas nos meses de outubro a março, com médias anuais de precipitação, temperatura e evapotranspiração de 1.348 mm, 19°C e 890 mm, respectivamente (PARZANESE, 1991; SANTOS, 2001).

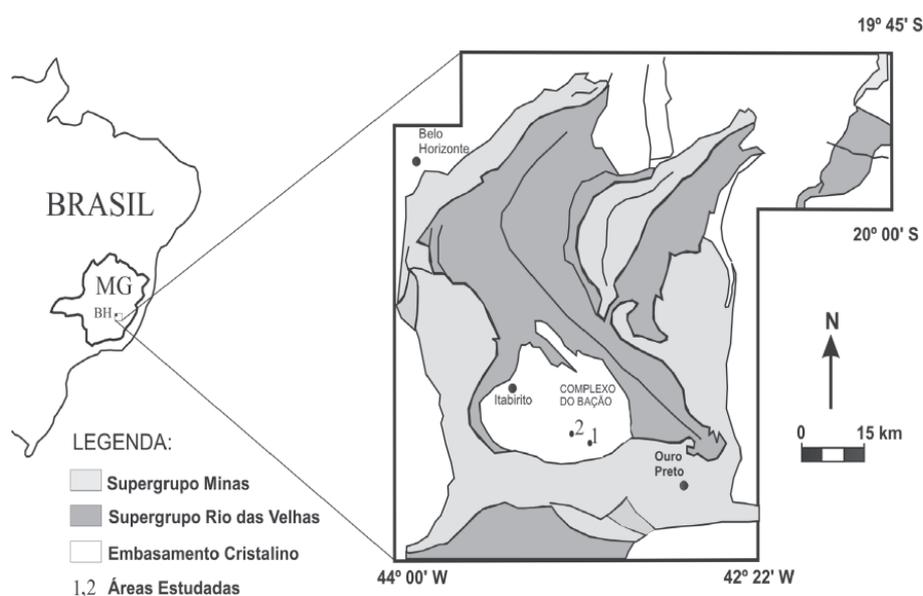


Figura 2 - Localização das áreas estudadas no Complexo do Bação, Minas Gerais, Brasil.

A geologia é caracterizada por rochas gnáissicas finamente bandadas, de composição predominantemente granodiorítica (DOOR, 1969), com manto de intemperismo normalmente muito espesso, alcançando localmente até 50 metros de espessura. Apresenta relevo suave, com colinas e morrotes com pequenos desnivelamentos de terreno, inferiores a 70 m. (BACELLAR, 2000). De acordo com os modelos de encostas propostos por Hack & Goodlet (1960) e Ruhe (1975), a área da estação Dom Bosco constitui uma encosta de forma côncava em planta e em perfil (concauidade ou *hollow*), enquanto a da estação Holanda como de forma convexa em planta e em perfil (saliência ou *nose*).

A região apresenta vegetação primária dominada por campos cerrados, atualmente em grande parte substituída por pastagens muito degradadas, como na estação Holanda, e medianamente degradadas, como na estação Dom Bosco (FARIAS, 1992).

Nos setores de relevo mais suaves da região, como na saliência da estação Holanda, predominam solos bem desenvolvidos (Latosolos vermelho-amarelos), enquanto que nos trechos mais íngremes ou geodinamicamente mais jovens, como na concavidade da estação Dom Bosco, predominam argissolos e cambissolos (PARZANESE, 1991; BACELLAR, 2000).

Morais & Bacellar (2006) observaram que o horizonte A dos solos das áreas estudadas exibe espessuras decimétricas e textura argilo-arenosa e, mais raramente, areno-argilosa. O horizonte B, por sua vez, apresenta espessuras normalmente entre 1 e 10 m e é composto basicamente por quartzo, caulinita e gibbsita (PARZANESE, 1991; MORAIS & BACELLAR, 2006), secundados por goethita, illita, mica, sílica e óxido de alumínio amorfo e Fe livre (FUTAI, 2002). Na estação Holanda, este horizonte apresenta textura muito fina, com teor de argila > 37%, enquanto que na estação Dom Bosco o teor é menor, com exceção dos pontos situados no limite externo da concavidade.

Morais & Bacellar (2006) encontraram valores médios de condutividade hidráulica para os horizontes A e B (de $2,20 \times 10^{-5}$ m/s e $2,09 \times 10^{-5}$ m/s, respectivamente) na estação Holanda, maiores que os determinados para os horizontes A e B na estação Dom Bosco ($1,44 \times 10^{-5}$ m/s e $6,70 \times 10^{-6}$ m/s, respectivamente), sugerindo uma recarga mais lenta nas concavidades que nas partes convexas do relevo. Nesta perspectiva, Moraes & Bacellar (2007) injetaram solução concentrada de NaCl em dois pontos em cada estação e monitoraram a infiltração/percolação ao longo de 27 dias, por meio de ensaios de eletrorresistividade. Os resultados confirmaram uma percolação mais lenta na concavidade (estação Dom Bosco) que na saliência (estação Holanda). Para estes autores, tais discrepâncias podem ser explicadas pelo fato da estação Dom Bosco apresentar solos pedologicamente menos desenvolvidos, com horizonte B textural (podzólicos), mais impermeável.

Material e Métodos

Para a efetivação deste estudo, foram selecionadas duas áreas com características pedogeomorfológicas e de conservação distintas (estações Dom Bosco e Holanda).

Com base nos trabalhos de Moraes & Bacellar (2006), para execução dos ensaios com traçador colorimétrico, em cada estação foram escolhidos dois pontos com valores de condutividade hidráulica contrastantes: DB10 e DB27, na estação Dom Bosco e H03 e H18, na estação Holanda. Em cada ponto, demarcou-se uma área de 1 m², que foi previamente irrigada com 75 litros de água, a fim de se homogeneizá-la com relação às condições de umidade antecedentes. No dia seguinte, utilizando-se de um regador manual, foram aplicados 75 litros de solução a 4 g/l de Brilliant Blue FCF, concentração recomendada por Flury et al. (1994) e utilizada em outros estudos (FLURY & FLÜHLER, 1994; PETERSEN et al., 2001; ÖHRSTROM et al., 2004). Para garantir boas condições de infiltração do traçador, a quantidade aplicada de água e de solução (150 mm) corresponde aproximadamente à precipitação média de outubro na região (PARZANESE, 1991), mês em que foram efetuados os ensaios.

Posteriormente, a área irrigada foi coberta por lona plástica amarela com o objetivo de reduzir-se ao máximo a evaporação. Dois dias após, construiu-se uma trincheira adjacente à área irrigada, a partir da qual foram escavados consecutivamente seis perfis paralelos e equidistantes abrangendo toda área irrigada (Figura 3), que foram fotografados com máquina digital. Para facilitar a correção, em laboratório, das distorções provocadas por diferenças no ângulo de visada e por variações de luminosidade nas fotos, utilizou-se uma moldura de madeira de 1 m² com arestas graduadas de 20 em 20 cm (FORRER, 1997; FLURY & FLÜHLER, 1994; WEILER, 2001). Com uso do programa Corel Draw 12, as fotografias foram corrigidas, digitalizadas e binarizadas, sendo atribuídos valores de 0 para locais não tingidos pelo traçador e de 1 para os locais com a presença do mesmo. A partir da quantificação das porções tingidas em relação à área total de cada perfil foram também elaborados perfis de distribuição areal do traçador que, de acordo com Gjettermann et al. (1997), permitem avaliar a variabilidade da percolação entre as áreas ensaiadas e os padrões de fluxo.

Nas trincheiras também foram descritas as características pedológicas do solo, como cor, estrutura e textura, conforme a tabela de cores de Munsell (1975) e Lemos & Santos (1996).

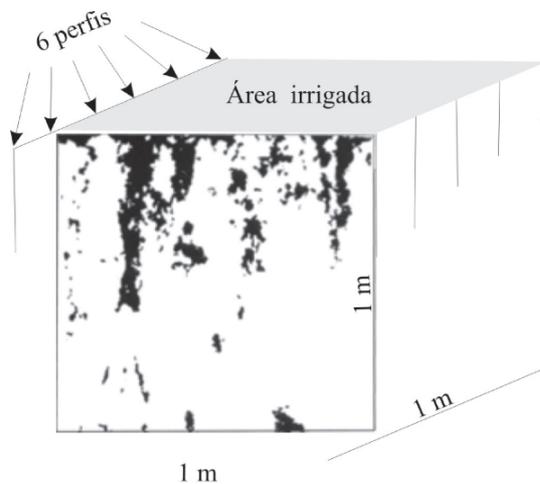


Figura 3 – Esquema ilustrativo mostrando a área irrigada com os perfis analisados (Hagedorn & Bundt, 2002).

Nos pontos DB27 e H18, também foram conduzidos experimentos com a utilização de NaCl (sal de cozinha) como traçador químico. Em cada ponto, foi escavada uma pequena área de 0,5 m² por 0,2 m de profundidade, a 1m de distância do local submetido aos ensaios com traçador colorimétrico. Nesta área, foram espalhados 3 kg de NaCl. A área foi imediatamente recoberta com o mesmo solo escavado e deixada

em repouso por toda a estação chuvosa (entre 06/12/2005 a 06/05/06). Após esse período, foram feitas sondagens a trado manual (de 2,5 polegadas de diâmetro) para coletar amostras com intervalos de 0,25 m até 3 m de profundidade. Estas amostras foram acondicionadas em sacos plásticos hermeticamente lacrados e levadas ao Laboratório de Geoquímica Ambiental (Lgqa), da UFOP, onde foram secadas a 40°C. Logo após a secagem, dois gramas de solo de cada amostra foram colocados em frasco plástico. Neste recipiente, foram adicionados 20 mL de água ultra pura (Ultra –Pure Water System, MILLIPORE); depois, foram agitadas durante 2 horas a 60 ciclos por minuto e, em seguida, centrifugadas a 1000 RPM durante 50 minutos. Com 10 mL da solução sobrenadante foram determinadas as concentrações de Cl⁻ pelo método titulométrico.

De posse de todos os dados, efetuou-se uma análise integrada, almejando-se melhor compreender possíveis relações da velocidade e padrão de fluxo com as características texturais e estruturais.

Resultados

As figuras 4 a 7 mostram os 6 perfis obtidos para cada ponto dois dias após a aplicação de Brilliant Blue FCF.

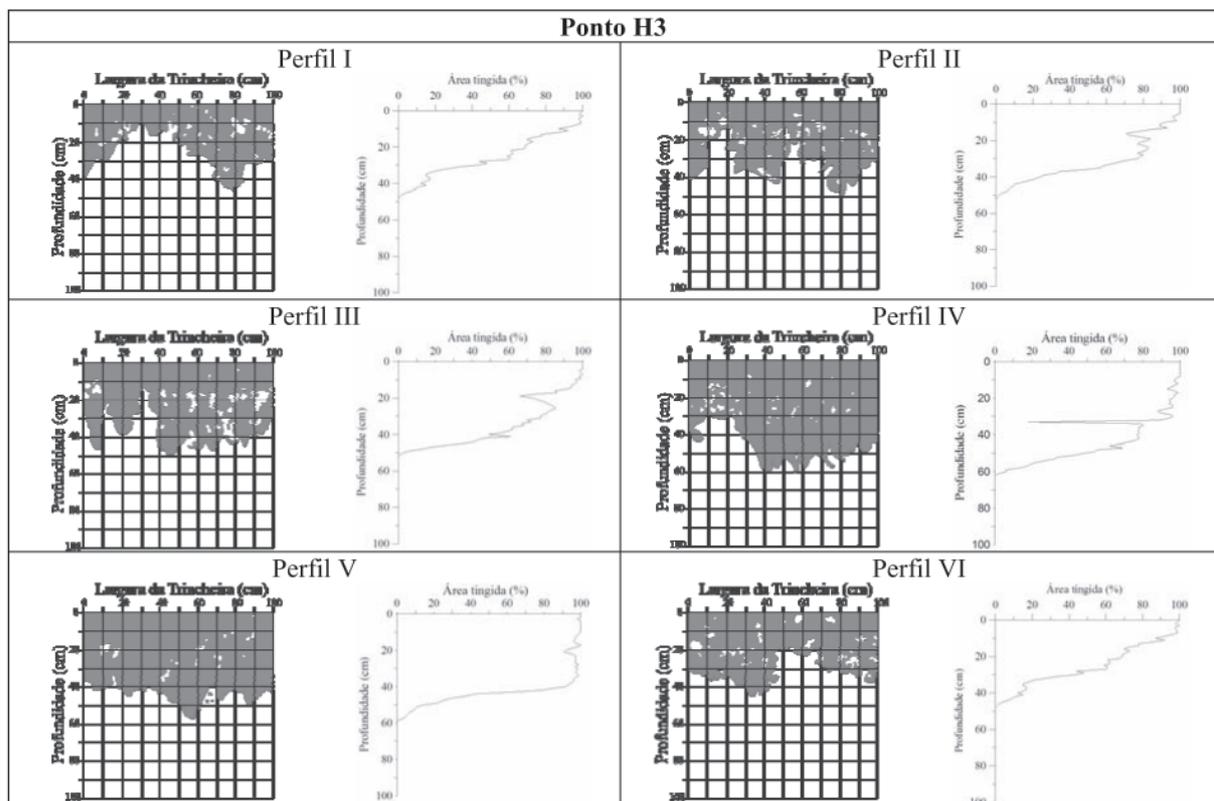


Figura 4 – Variação da área tingida por traçador em função da profundidade, no ponto H3 da estação Holanda.

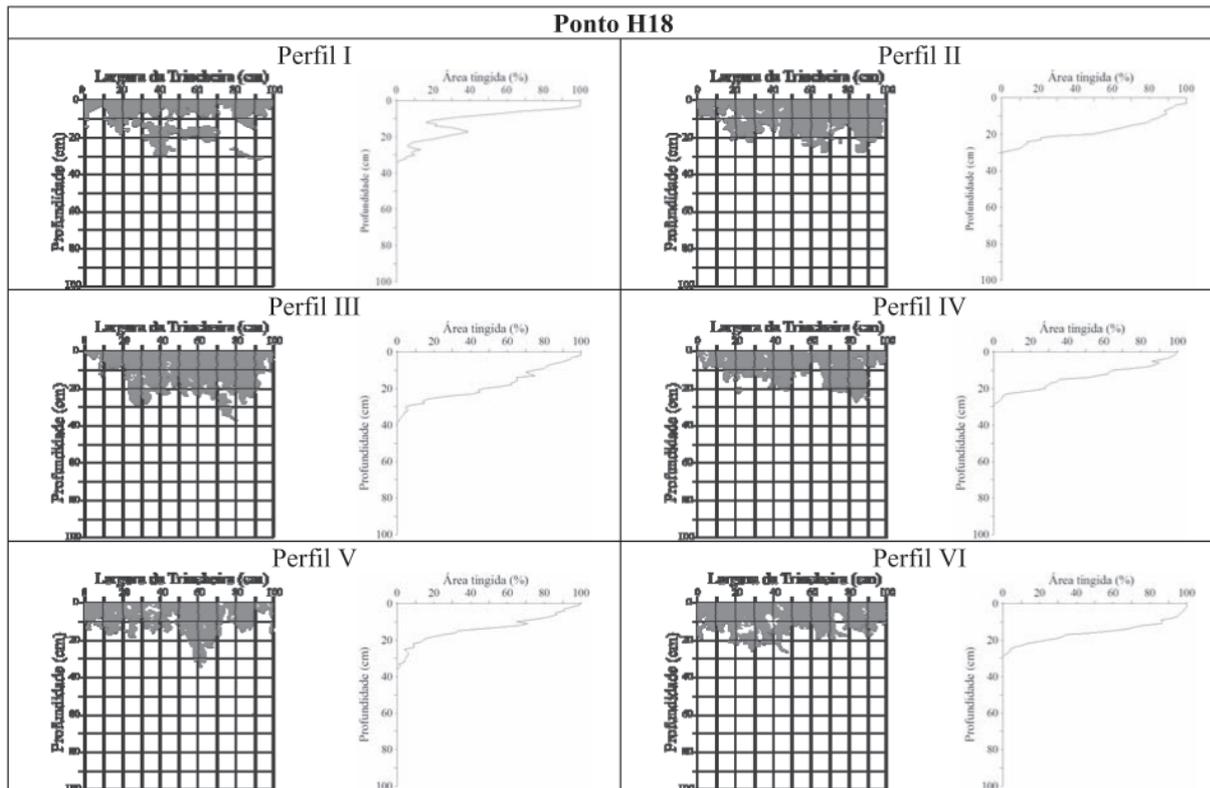


Figura 5 – Variação da área tingida por traçador em função da profundidade, no ponto H18 da estação Holanda.

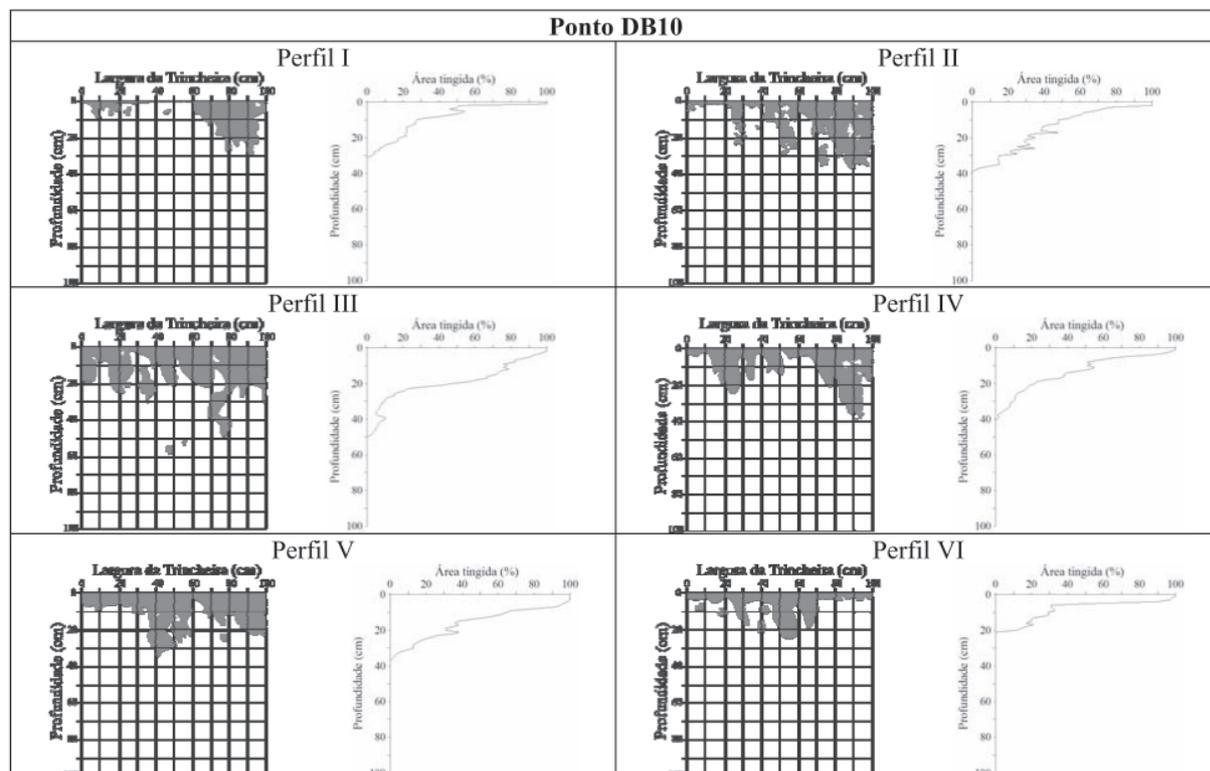


Figura 6 – Variação da área tingida por traçador em função da profundidade, no ponto DB10 da estação Dom Bosco.

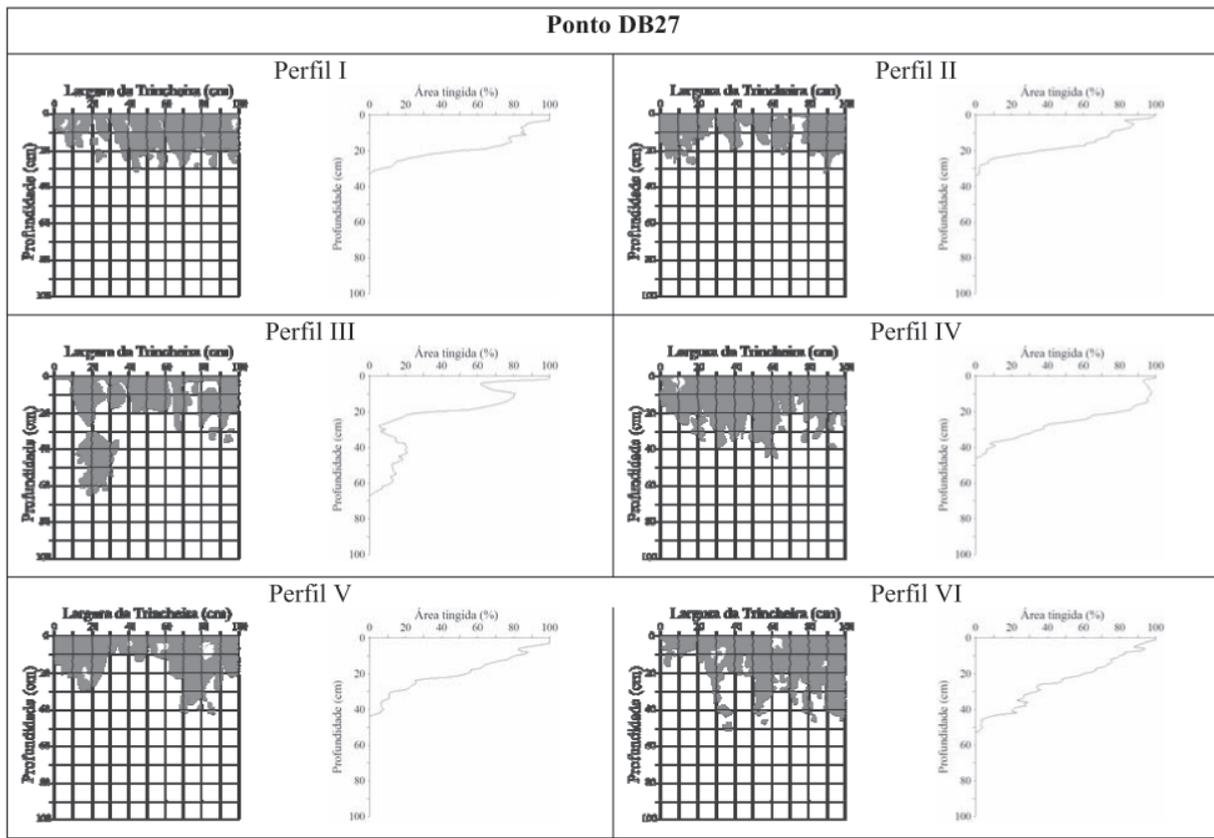


Figura 7 – Variação da área tingida por traçador pela profundidade no ponto DB27, da estação Dom Bosco.

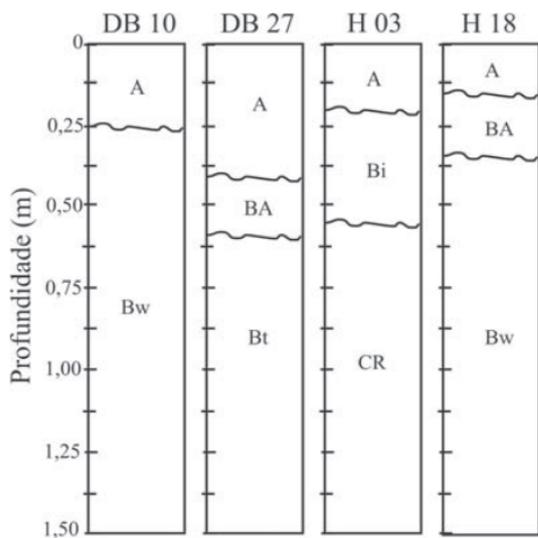


Figura 8 – Perfis dos solos das estações Dom Bosco e Holanda.

As descrições de perfis nas trincheiras (Figura 8) confirmaram a presença, no ponto H18 da estação Holanda, de

Latossolos vermelho-amarelos, com horizonte A (10YR5/4) pouco pronunciado, com estrutura em blocos médios subangulares, com poros médios a grandes e condutividade hidráulica de $1,38 \times 10^{-5}$ m/s. O horizonte B, com cor 2,5 YR5/6, apresenta estrutura granular a grumosa; a condutividade é de $3,53 \times 10^{-5}$ m/s e os poros são muito pequenos, embora ocorram biocavidades de diâmetro centimétrico.

Como já observara Bacellar (2000), no ponto H3 o solo é menos desenvolvido (cambissolo), pois se situa em região localizada sobre uma banda de gnaiss mais resistente ao intemperismo. Seu horizonte A (cor 10YR4/4), sem estrutura definida, é caracterizado pela pedregosidade conferida por fragmentos de rocha. Apresenta porosidade intergranular e condutividade hidráulica de $4,32 \times 10^{-5}$ m/s. Encontra-se assentado num horizonte câmbico (7,5YR6/8), ainda mais pedregoso, de maior condutividade ($K = 1,59 \times 10^{-4}$ m/s). Sua estrutura é pouco desenvolvida, com característica grumosa e a porosidade muito pequena.

Na estação Dom Bosco, observou-se que o solo do ponto DB27 é menos desenvolvido (argissolo), com horizonte A (cor 10YR3/1) com estrutura em blocos subangulares médios a grandes, porosidade alta, com poros pequenos a médios. Sua condutividade hidráulica é de $1,57 \times 10^{-5}$ m/s. Depois

de um horizonte transicional ocorre o horizonte B (cor 10YR5/8), enriquecido em argila (Bt), com estrutura em blocos grande e subangulares, porosidade pequena, com poros médios, mas com abundantes biocavidades. Já no ponto DB10, situado numa área mais alta, à margem da concavidade, o solo se assemelha aos da estação Holanda. O horizonte A (cor 5YR3/3) apresenta estrutura variando entre granular a blocos muito pequenos a pequenos, porosidade boa e condutividade de $3,72 \times 10^{-5}$ m/s. O horizonte B (cor 2,5 YR3/4) apresenta textura granular a fina, porosidade muito alta, com poros muito pe-

quenos e condutividade de $1,45 \times 10^{-5}$ m/s. Apresenta, ainda, algumas cavidades de formigas.

A figura 9 mostra os resultados dos perfis com as concentrações de cloreto determinadas em laboratório para os dois pontos ensaiados. Verifica-se que no ponto H18 (estação Holanda) o volume recuperado de cloreto é muito maior e que sua máxima concentração encontra-se a 1,5 m de profundidade, 0,5 m mais profundo que no ponto DB 27 da estação Dom Bosco. No ponto H18 nota-se também parte de um segundo pico de concentração de Cl⁻, de menor magnitude, entre 2,5 e 3,0 metros.

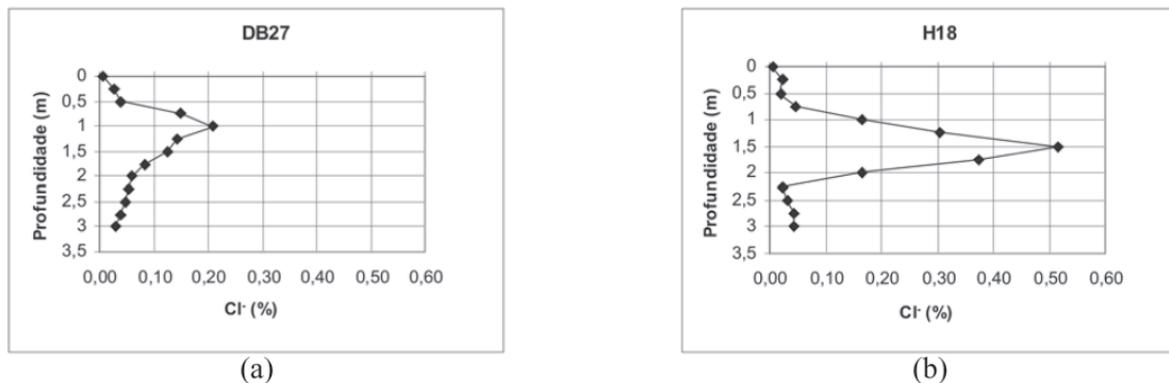


Figura 9 – Perfis da concentração de cloreto em profundidade, a) estação Dom Bosco, b) estação Holanda.

Discussão

A irrigação do solo com 150 mm de água e solução com corante, em 24 horas, não foi suficiente para provocar uma percolação profunda, já que a porção tingida não superou 0,7 m de profundidade após dois dias da injeção.

É marcante a influência no padrão de infiltração dos macroporos verticais devido a raízes, sobretudo de gramíneas. Desta forma, o padrão de fluxo predominante foi por macroporos com interação mista no ponto DB27 e DB10 e com alta interação no ponto H18 (Figura 1). Ressalta-se que o grau de interação reflete a condutividade hidráulica da matriz. Os graus de interação encontrados evidenciam significativa condutividade destes solos, equivalente a de solos de textura arenosa fina ou areno-siltosa (FETTER, 1988). Como tais solos apresentam textura predominante argilo-arenosa (MORAIS & BACELLAR, 2006), este comportamento corrobora a natureza agregada de suas partículas, fato já observado por outros autores (PARZANESE, 1991; MORAIS, 2003).

O solo do ponto H03 é a única exceção, com predomínio do padrão de fluxo homogêneo pela matriz ou heterogêneo com formação de dígito (Figura 1). Isto se explica pelo fato das gramíneas serem mais escassas e o padrão de fluxo muito influenciado pela elevada pedregosidade.

Se adotado o limite mínimo de 80% de área tingida para caracterizar o fluxo pela matriz do solo, verifica-se que

os pontos obedecem a seguinte seqüência de condutividade hidráulica: H03>H18>DB27>DB10. Confirma-se, assim, que as saliências da região possuem maior capacidade de infiltração (MORAIS & BACELLAR, 2006).

Por outro lado, no ponto DB27, situado no interior da concavidade, a profundidade atingida pelo corante é maior que a encontrada nos pontos H18 e DB10, situados na saliência e borda da concavidade, respectivamente. Nota-se, contudo, que no ponto DB27 as raízes de gramíneas atingem maior profundidade que as demais, conduzindo, assim, mais rapidamente o traçador pelo horizonte A. Contrariamente, seus horizontes subjacentes são mais impermeáveis por serem mais argilosos (Figura 8) e por não apresentar alta densidade de raízes.

Além das raízes, constatou-se também a influência de macroporos, sobretudo no horizonte B, formados pela fauna escavadora (perfil III do DB27, III do DB 10 e I do H18), principalmente por atividade de formigas e de cupins.

Os resultados dos ensaios com cloreto revelam um pico de concentração principal nos dois pontos ensaiados (Figura 9). Este pico possivelmente representa o fluxo pela matriz, indicando maior condutividade hidráulica para o ponto H18. Assim, as taxas de recarga no período chuvoso foram de aproximadamente 0,25 m/mês ($9,6 \times 10^{-8}$ m/s) e de 0,17 m/mês ($6,55 \times 10^{-8}$ m/s) para o ponto H18 e DB27, respectivamente. Verifica-se, ainda, um segundo pico de menor magnitude no

H18, que pode estar associado ao fluxo preferencial por macroporos. Contudo é possível existir outros picos ainda mais profundos, não detectados pela amostragem, que se restringiu aos primeiros 3,0 m. Ressalta-se ainda a diferença entre a concentração máxima nos pontos H18 (0,51%) e DB27 (0,21%). A maior diluição neste pode estar associada a possíveis fluxos subsuperficiais na base dos horizontes BA ou Bt (Figura 8), mais impermeáveis.

Conclusões

A partir dos resultados obtidos, foi possível tecer as seguintes conclusões:

– O traçador Brilliant Blue FCF mostrou-se eficiente no estudo de padrões de fluxos em solos tropicais, assim como já havia sido provado para solos de clima temperado.

– É marcante a influência das raízes de gramíneas na forma da área tingida pelo traçador colorimétrico; no horizonte B, tal influência é assumida pelas biocavidades (de formiga e cupim).

– O fluxo pela matriz estimado pelo traçador colorimétrico e por cloreto aponta para a seguinte seqüência de condutividade hidráulica: H03>H18>DB27>DB10.

– Em função dos macroporos, o padrão de fluxo é altamente variável. Assim, não se pode aceitar indiscriminadamente para a infiltração e recarga na região, modelos de fluxo em pistão.

– Comprovou-se que o a infiltração é mais significativa nas saliências do relevo que nas concavidades.

– A variação dos padrões de fluxo na zona vadosa é importante e merece ser mais investigada, pois como se sabe, os macroporos podem influir significativamente no entendimento da recarga dos aquíferos e no transporte de contaminantes.

Referências bibliográficas

- AEBY, P. **Quantitative fluorescence imaging of tracer distributions in soil profiles**. Dissertação de Mestrado, ETH, Zürich, 1998. 74p.
- ALLISON, G.B.; GEE, G.W. & TYLER, S.W. Vadose-zone techniques for estimating groundwater recharge in arid and semi-arid regions. **Soil Sci. Soc. Am.**, 58:6-14. 1994.
- BACELLAR, L.A.P. **Condicionantes Geológicos, Geomorfológicos e Geotécnicos dos mecanismos de voçorocamento na Bacia do Rio Maracujá, Ouro Preto, MG**. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2000. 226p.
- BEVEN, K. & GERMANN, P. Macropores and water flow in soils. **Water Resour. Res.**, 18 (5):1311-1325, 1982.
- COSTA, F.M. **Análise por métodos hidrológicos e hidroquímicos de fatores condicionantes do potencial hídrico de bacias hidrográficas – Estudo de casos no Quadrilátero Ferrífero, MG**. Dissertação de Mestrado. DEGEO/EM/UFOP, Ouro Preto, 2005. 147p.
- DOOR, J.N. Physiographic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. U. S. **Geological Survey Professional Paper**, 641-A:110, 1969.
- FARIAS, C.A. **Dinâmica da revegetação natural de voçorocas na região de Cachoeira do Campo, MG**. Dissertação de Mestrado, UFV, Viçosa, 1992. 63p.
- FETTER, C.W. **Applied Hydrogeology**. 2º Ed., Macmillan Publishing, New York, 1988. 592p.
- FLURY, M. Experimental evidence of transport of pesticides through field soils – A review. **Journal Environ. Qual.**, 25:25-45, 1996.
- FLURY, M. & FLÜHLER, H. Brilliant Blue FCF as a dye tracer for solute transport studies - A toxicological overview, **J. Environ. Qual.**, 23:1108–1112, 1994.
- FLURY, M.; FLÜHLER, H.; JURY, W.A. & LEUENBERGER, J. Susceptibility of soils to preferential flow of water: a field study. **Water Resour. Res.**, 30 (7):1945-1954, 1994.
- FLURY, M. & WAI, N.N. Dyes as tracers for vadose zone hydrology. **Rev. Geophys.**, 41 (1):1002, 2003.
- FORRER, I. **Solute transport in an unsaturated field soil: Visualization and quantification of flow patterns using image analysis**, Ph.D. dissertation, ETHZ, Zurich, Switzerland, 1997, 128p.
- FUTAI, M.M. **Estudo teórico-experimental do comportamento de solos tropicais não-saturados: Aplicação a um caso de voçorocamento**. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2002. 559p.
- GJETTERMANN, B.; NIELSEN, K.L.; PETERSEN, C.T.; JENSEN, H.E. & HANSEN, S. Preferential flow in sandy loam as affected by irrigation intensity. **Soil Technology**, 11:139–152, 1997.
- HACK, J.T. & GOODLET, J.G. Geomorphology and forest ecology of a mountain region in the Central Appalachians. U.S. **Geological Survey Professional Paper**, 347: 66. 1960.
- HAGEDORN, F. & BUNDT, M. The age of preferential flow paths. **Geoderma**, 108:119-132, 2002.

- KASTEEL, R.; VOGEL, H.-J. & ROTH, K.; Effect of non-linear adsorption on the transport behaviour of brilliant blue in a field soil. *Eur. J. Soil Sci.*, 53:231-240, 2002.
- LEMOS, R.C. & SANTOS, R.D. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 3º Ed. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, 1996. 84p.
- MORAIS, F. & BACELLAR, L.A.P. Electrical Resistivity survey of water flow in vadose zone. **Geophysical Prospecting**, 2007. (no prelo).
- MORAIS, F. **Estudo dos Processos Erosivos Subsuperficiais na Bacia do Rio Maracujá – MG**. Dissertação de Mestrado, DEGEO/EM/UFOP, Ouro Preto, 2003. 98p.
- MORAIS, F. & BACELLAR, L.A.P. Análise dos fatores intervenientes na condutividade hidráulica dos horizontes superficiais de solos de áreas gnáissicas do Complexo do Baçõ – MG. **Solos e Rochas**, 29(1):89-1001, 2006.
- MUNSELL COLOR. **Munsell soil color charts**. New Windsor: GretagMacbeth, 2000. (Não paginado).
- ÖHRSTRÖM, P.; HAMED, Y.; PERSSON, M. & BERNDTSSON, R. Characterizing unsaturated solute transport by simultaneous use of dye and bromide. **Journal of Hydrology**, 289: 23-35, 2004.
- PARZANESE, G.A.C. **Gênese e desenvolvimento de voçorocas em solos originados de rochas granitóides na região de Cachoeira do Campo, Minas Gerais**. Dissertação de Mestrado, UFV, Viçosa, 1991. 117p.
- PETERSEN, C.T.; JENSEN, H.E.; HANSEN, S. & BENDER KOCH, C. Susceptibility of a sandy loam soil to preferential flow as affected by tillage. **Soil Till. Res.**, 58:81-89, 2001.
- RAPOSO, C. **Estimativa de recarga de água em zona não-saturada de solos utilizando o Trítio artificial como traçador**. Dissertação de Mestrado, DEGEO/EM/UFOP, Ouro Preto, 1997. 130p.
- REICHENBERGER, S.; AMELUNG, W.; LAABS, V.; PINTO, A.; TOTSCHKE, K.U. & ZECH, W. Pesticide displacement along preferential flow pathways in a Brazilian Oxisol. **Geoderma**, 110:63-86, 2002.
- RUHE, R.V. **Geomorphology**. Houghton Mifflin, Boston, 1975, (Não paginado).
- SADEGHI, A.M.; ISENSEE, A.R. & SHIRMOHAMMADI, A. Influence of soil texture and tillage on herbicide transport. **Chemosphere**, 41:1327-1332, 2000.
- SANTOS, C.A. 2001. **Comportamento Hidrológico Superficial, Subsuperficial e a Erodibilidade dos solos da região de Santo Antônio do Leite, distrito de Ouro Preto – MG**. Dissertação de Mestrado UFOP/EM/DEGEO, Ouro Preto, 2001. 108p.
- SELBY, M.J. **Hillslope Materials and Processes**. Oxford University Press, Oxford, 1993. 451p.
- SOBREIRA, F.G. Processos erosivos acelerados (voçorocas): O exemplo de Cachoeira do Campo, Ouro Preto, MG. **Solos e Rochas**, 23 (3):217-233, 2000.
- WEILER, M.H. **Mechanisms controlling macropore flow during infiltration**. Dissertação de Mestrado, ETH, Zürich, 2001. 151p.