

Avaliação da condutividade hidráulica em área de recarga do aquífero Botucatu

Lázaro V. Zuquette

Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo, Brasil
E-mail: lazarus1@sc.usp.br

Janaina B. Palma

Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo, Brasil
E-mail: janainapalma@hotmail.com

Resumo

O trabalho apresenta os valores de condutividade hidráulica obtidos a partir de ensaios de infiltração realizados na bacia do Córrego Vaçununga, na região de Luis Antônio (nordeste do Estado de São Paulo). Os ensaios foram realizados em arenitos da Formação Botucatu que apresentam características típicas das áreas de recargas do aquífero livre Botucatu. Além dos ensaios de duplo anel, foram realizados ensaios em laboratório para caracterizar os materiais inconsolidados quanto aos índices físicos. Os resultados foram correlacionados com os valores de condutividade hidráulica e com a capacidade de infiltração do solo. Observou-se que, embora a região apresente homogeneidade geológica, o comportamento hidrodinâmico sofre significativa influência do tipo de uso instalado e de seu estágio evolutivo, assim como das práticas de manejo.

Palavras-chave: condutividade hidráulica, infiltrômetro, Formação Botucatu, aquífero, São Paulo, Brasil.

Abstract

This work shows the results of the hydraulic conductivity from infiltration tests developed in the Vaçununga watershed, in the region of Luis Antônio, northeastern portion of the state of São Paulo. This basin is constituted of sandstones of Botucatu Formation (more than 90%) and Sandy residual unconsolidated materials (unconfined aquifer Botucatu) that were responsible for the selection of this watershed for this study. The soil properties and its hydraulic conductivity were obtained by laboratory and field tests (double ring). Results showed that the water movement is significantly affected by the land uses and management practices, although the region presents geological homogeneity.

Keywords: hydraulic conductivity, infiltrometer, Botucatu Formation, aquifer, São Paulo, Brazil.

1. Introdução

Nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste do Brasil, ocorrem os arenitos eólicos da Formação Botucatu, que se comportam como diferentes aquíferos. Na maior parte de sua extensão, os arenitos são recobertos por pacotes espessos de diversos materiais geológicos (basaltos da Formação Serra Geral e arenitos, siltitos e argilitos do Grupo Bauru), conferindo-lhes características de semiconfinamento. Porém uma parcela dos arenitos não silicificados afloram recobertos por um pacote de materiais inconsolidados residuais arenosos e, em alguns locais, são sobrepostos por camadas pouco espessas de materiais inconsolidados retrabalhados areno-argilosos, resultantes da mistura de materiais inconsolidados argilosos oriundos dos basaltos (Formação Serra Geral) e arenosos dos arenitos (Formação Botucatu). Esses materiais inconsolidados controlam a taxa de infiltração das águas das chuvas e a consequente recarga do aquífero e o transporte de poluentes.

Há diversas opções de ensaios de campo, para determinação da condutividade hidráulica, que podem ser realizados em furos de sondagens, em poços ou em cavas, aproveitando piezômetros e utilizando equipamentos e arranjos especiais, como os infiltrômetros.

A influência do tipo de uso na condutividade hidráulica tem sido documentada em vários trabalhos. Gaze et al. (1997) mediram a infiltração através de tensiômetros, em uma bacia hidrográfica, ocupada com plantações de milho, e verificaram que o valor da infiltração pode ser três vezes maior em um ponto que em outro, em função do estágio evolutivo da plantação. Blevins et al. (1984) concluíram que a condutividade hidráulica do solo não saturado foi maior para solos sob plantio direto do que em sistema de cultivo convencional. O objetivo do presente trabalho é a obtenção da condutividade hidráulica a partir de ensaios de infiltração, considerando o tipo de uso e seu estágio de evolução, assim como a relação das chuvas e a taxa de infiltração potencial.

2. Localização

A bacia hidrográfica do Córrego Vaçununga está localizada na região de Luís Antônio, nordeste do Estado de São Paulo, entre as coordenadas 21°30' - 21°45' latitude sul e 47°30' - 47°45' longitude oeste (Figura 1), com área de 80,53km² e altitudes variando de 620m a 871m.

O clima, de acordo com a classificação de Koeppen, está entre o grupo A e o C e apresenta características bem definidas, com inverno (seco) e verão (úmido). A temperatura média varia de 13°C a 30°C, com média anual de 23°C e pluviosidade anual média de 1300mm.

3. Materiais e métodos

Os materiais geológicos presentes na área foram mapeados, caracterizados e classificados, a partir de trabalhos de campo e de laboratório. As litologias rochosas e os materiais inconsolidados (distribuição e espessura) foram individualizados, a partir de fotointerpretação

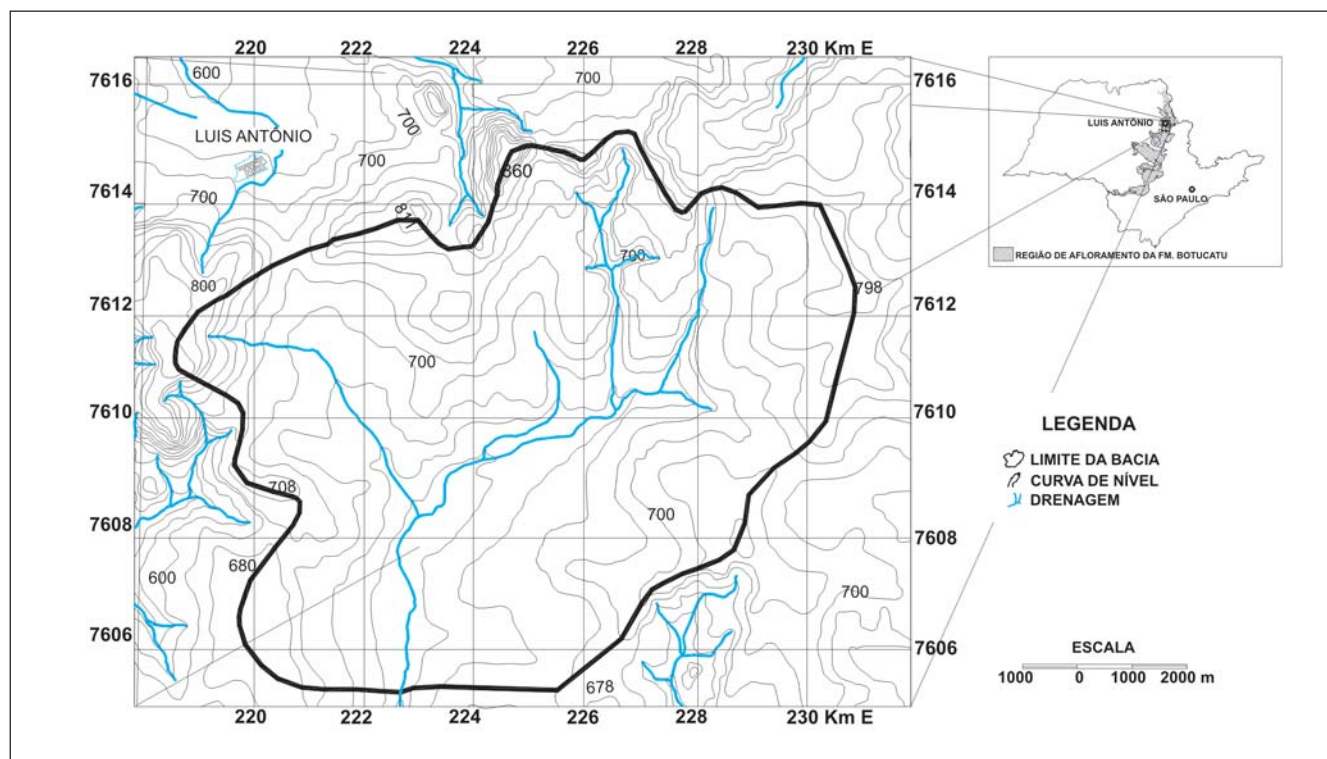


Figura 1 - Localização da bacia hidrográfica do Córrego Vaçununga (Zona UTM - 23S).

e de trabalhos de campo; a caracterização foi obtida por ensaios em campo e em laboratório com amostras deformadas e indeformadas (índices físicos determinados segundo as normas NBR 7181, NBR 6508 e NBR 12004).

Os ensaios de infiltração em campo foram executados utilizando o infiltrômetro de duplo anel. A opção foi feita em função deste ser um dos equipamentos mais utilizados atualmente, para medida de infiltração, e apresentar várias vantagens como a de possibilitar o fluxo de água através de volumes grandes de materiais geológicos, representando melhor a geometria porosa, além da simplicidade e facilidade de execução.

Uma limitação, mesmo quando se usa o duplo anel, é a infiltração horizontal induzida pelos fortes gradientes hidráulicos de pressão entre o solo muito úmido sob o infiltrômetro e o solo seco circundante, já que os anéis são cravados apenas poucos centímetros (15 cm) no terreno.

A condutividade hidráulica saturada foi calculada pela equação (para carga constante):

$$k_{fs} = \frac{Q}{\left(\frac{H + Z_w}{Z_w}\right) A t} \quad (1)$$

Onde:

k_{fs} = Condutividade hidráulica saturada de campo (m/h).

Z_w = Profundidade da frente de saturação (m).

A = Área da seção do anel (m²).

t = tempo entre duas leituras (H).

Q = Volume de água infiltrada (m³)

H = profundidade da água do anel, quando é ensaiada a regime constante (m).

A Figura 2 apresenta um esquema geral do ensaio e equipamento.

Para avaliar a redistribuição da água no material geológico, além das coletas iniciais, foram amostrados três perfis em tempos subsequentes, que permitiram avaliar a velocidade da drenagem interna.

Buscando representar a distribuição dos materiais em área, considerando os tipos e estágio do uso do solo, posição no terreno e textura, foram realizados 9 ensaios (de acordo com a norma ASTM 8338) nos materiais inconsolidados arenosos (residual da Formação Botucatu).

4. Resultados e discussões

4.1 Geologia

A bacia é constituída por arenitos da Formação Botucatu (cerca de 90%) recobertos, em partes, por basaltos da Formação Serra Geral. Os arenitos têm origem eólica, são homogêneos quanto à textura (fina a média) e mineralogia (basicamente quartzo); apresentam grãos bem selecionados, arredondados com superfície fosca e coloração variando de amarelo-claro a vermelho. Apresentam baixa coesão devido à pequena porcentagem de finos e à outros tipos de cimentos, como óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio.

4.2 Material inconsolidado

Os materiais inconsolidados foram classificados de acordo com a proposta de Anon (1990) em materiais retrabalhados e residuais. A Figura 3 apresenta o mapa de distribuição e a Tabela 1 mostra algumas propriedades geotécnicas obtidas.

Os materiais inconsolidados residuais dos arenitos da Formação Botucatu ocupam a maior parte da área e apresentam elevada porcentagem de areia. A cor predominante é amarela-avermelhada; e a espessura é superior a 5m e inferior a 20m.

Os materiais residuais da Formação Serra Geral são encontrados nos topos dos morros, possuindo pequenas espessuras. Em termos de granulometria, há predomínio da faixa argila e silte. Esses materiais são composto por argilominerais, quartzo, hidróxidos de ferro, magnetita e ilmenita, além de alguns minerais primários nas camadas de rochas alteradas e saprolitos.

Os materiais retrabalhados mistos são originados da mistura dos materiais residuais argilosos da Formação Serra Geral e dos materiais arenosos da Formação Botucatu e a proporção entre esses materiais é função da proximidade do corpo de basalto. Apresentam pequena espessura e distribuição lateral na bacia hidrográfica.

Os materiais retrabalhados aluvionares representam os sedimentos do córrego Vaçununga e mostram textura heterogênea e permeabilidade próxima a 10⁻³ cm/s. Ocupam áreas de pequena declividade (0 e 2%) e apresentam espessura variada.

4.3 Uso e ocupação

O mapa de uso e ocupação foi obtido pela delimitação das unidades sobre

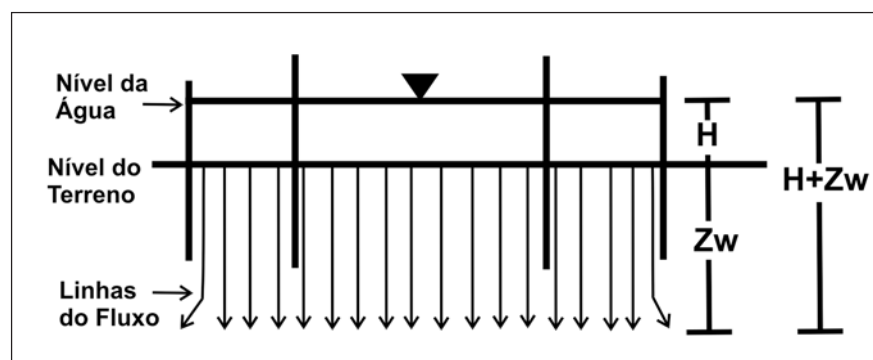


Figura 2 - Esquema do ensaio de infiltração com o duplo anel. Indicação dos parâmetros utilizados na fórmula de k_{fs} .

fotografias aéreas e controle de campo, com objetivo de, quando associado ao mapa de materiais inconsolidados, orientar quanto a escolha dos locais para os ensaios de infiltração. A bacia é ocupada, basicamente, por plantações de cana-de-açúcar e eucaliptos e, secundariamente aparecem pastagens (Figura 4). O manejo da cana de açúcar apresenta 2 fases distintas: (1) sulcamento do solo para o plantio; e (2) posterior manutenção durante um período de 5 anos. Durante a fase do sulcamento, as estruturas da camada superficial são destruídas e a capacidade de infiltração é muito alta; após esta fase, instala-se o processo de selamento (sealing) e compactação e a taxa de infiltração diminui consideravelmente.

Os eucaliptos são plantados, nessa área, há aproximadamente 30 anos e, ao atingirem o tamanho ideal (cerca de 8 anos), são cortados e mudas são plantadas nos espaços anteriormente utilizados como corredores. O grau de compactação dos materiais é baixo e condutos deixados pelas raízes são comuns.

4.4 Infiltração

A partir dos ensaios de infiltração, com duplo anel, obtiveram-se valores de condutividade hidráulica saturada variando de $1,48 \cdot 10^{-6}$ a $3,65 \cdot 10^{-5}$ cm/s, para os materiais inconsolidados residuais de basalto, entre $2,01 \cdot 10^{-5}$ a $3,2 \cdot 10^{-3}$ cm/s, para os materiais inconsolidados residuais

ais arenosos, e $4,52 \cdot 10^{-4}$ cm/s, para os materiais inconsolidados aluvionares; o valor obtido para os materiais inconsolidados mistos foi da ordem de $5,18 \cdot 10^{-5}$ cm/s. A capacidade de infiltração do material (corresponde à taxa de infiltração por tempo) indica a capacidade

de máxima de infiltração, determinando o excedente de água que será revertido em escoamento superficial. A Figura 5 apresenta os dados referentes aos valores obtidos nos ensaios em materiais inconsolidados arenosos; observa-se que, apesar da relativa homogeneidade tex-

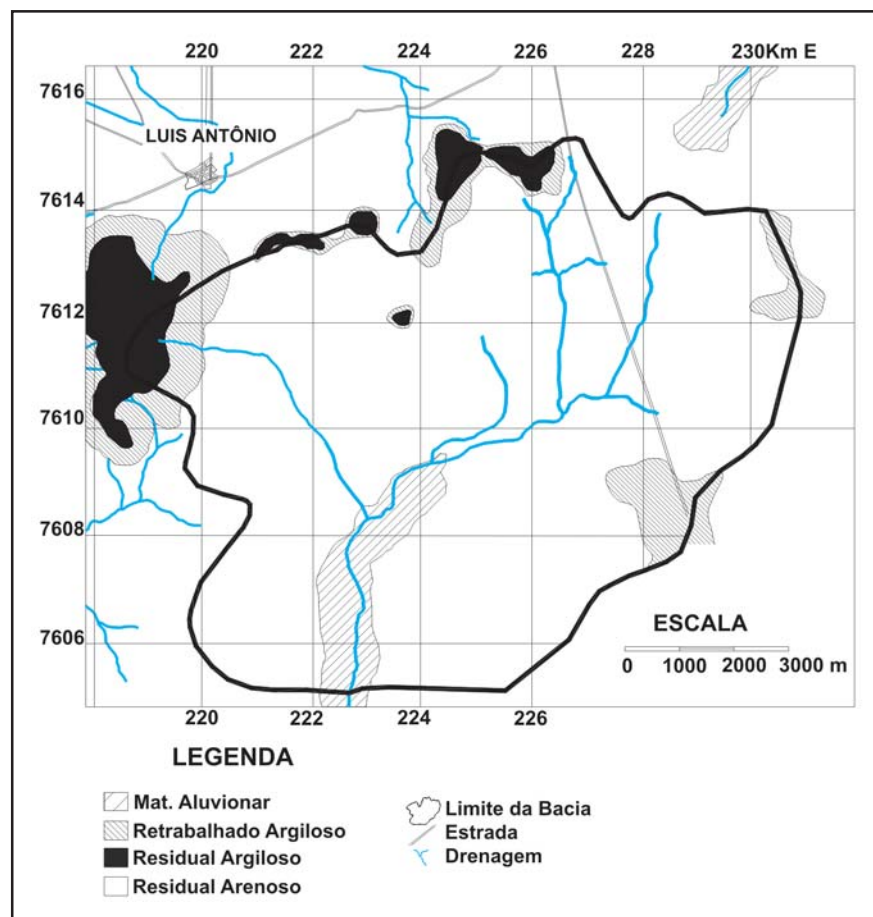


Figura 3 - Mapa de Materiais Inconsolidados.

Tabela 1 - Resultados de pesos específicos dos sólidos (γ_s) e de granulometria para os materiais inconsolidados. Valores baseados em um conjunto de 15 a 18 amostras por material.

Material Inconsolidado	γ_s (KN/m ³)	Argila (%)	Silte (%)	Areia Fina (%)	Areia Média (%)	Areia Grossa (%)
Residual Botucatu	26,71a 27,60	0 a 5	8 a 18	35 a 41	38 a 49	0 a 3
Residual Serra Geral	26,89 a 28,73	40 a 44	30 a 35	15 a 21	3 a 5	0 a 4
Retrabalhado Misto	26,70 a 27,99	31 a 37	20 a 25	11 a 29	10 a 29	3 a 6
Aluvionar	27,70 a 27,90	0 a 4	7 a 31	11 a 39	15 a 41	0 a 6

tural, os ensaios apresentaram uma significativa variação da capacidade de infiltração, em função do tipo de uso. A variação da taxa de infiltração (capacidade de infiltração) com o tempo, para o mesmo material inconsolidado e mesmo uso, é função, principalmente, da alteração dos valores de umidade volumétrica e, conseqüente mudança no valor de potencial mátrico. Os pontos iniciais do gráfico (perfil seco) são chamados de capacidade de infiltração máxima e o segmento final reflete a capacidade de infiltração mínima do material.

As variações da taxa de infiltração não ocorrem de forma linear, em função do tempo, sendo consideradas altas na parte inicial e decrescem, rapidamente, com a tendência a permanecerem constantes, após um determinado tempo (o tempo médio observado foi de, aproximadamente, 45 minutos). No tempo inicial, ocorrem a saturação da camada superior do solo e altos valores de potencial mátrico; a partir do ponto de inflexão da curva, a frente se comporta como um pistão, como sugerido por Green e Ampt (1911), fazendo com que a taxa de infiltração seja constante. A curva de infiltração, para as condições com cana-de-açúcar em estágio final, reflete as menores taxas de infiltração, confirmando as curvas de retenção.

Buscando avaliar a infiltração potencial, foram avaliadas as precipitações ocorridas na bacia durante os anos 2000 a 2002. Na Figura 6, estão representados os cenários de chuvas, definidos a partir da duração e intensidade medidas. Os mesmos eventos de chuva foram tratados, considerando a condição constante (precipitação total/duração do evento) e a transiente (evento foi subdividido em função das diferentes intensidades observadas, considerando, como unidade temporal, o tempo de 5 minutos). Esses dados foram úteis para avaliar o comportamento da área, frente aos diferentes tipos de chuvas, permitindo prever a relação entre recarga e escoamento superficial.

Na Figura 5, observa-se a relação entre as curvas de infiltração e os cenários de chuvas constantes e transientes. Nota-se, que para a condição constante,

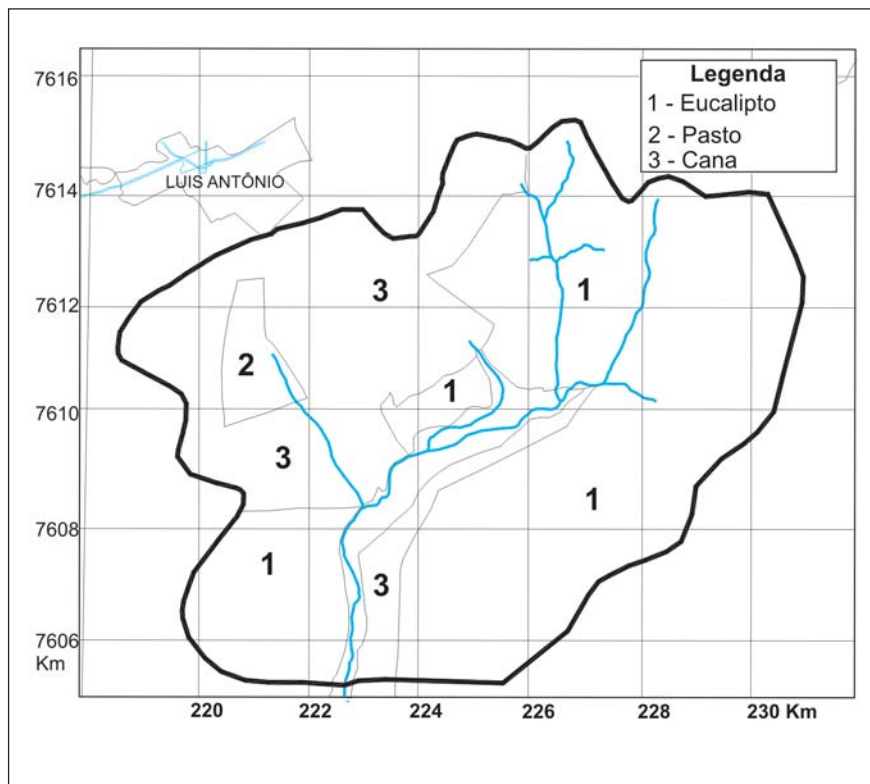


Figura 4 - Mapa de uso e ocupação.

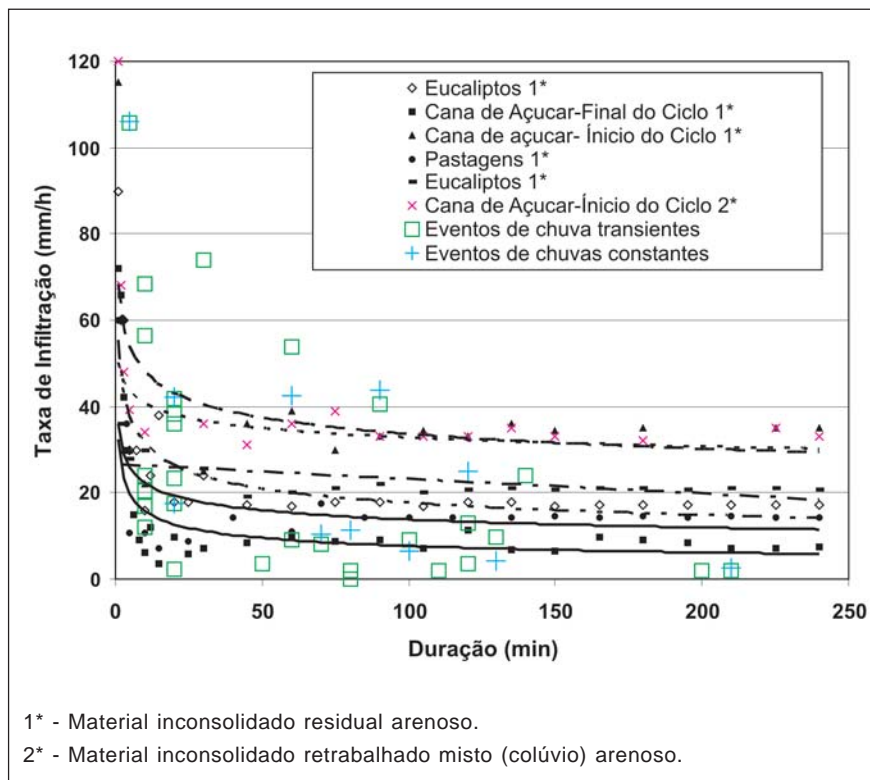


Figura 5 - Capacidade de infiltração. Resultados para os materiais inconsolidados residuais arenosos com diferentes usos e misto com cana-de-açúcar.

somente 3 cenários apresentam intensidades maiores que as taxas de infiltração de todas as condições de usos, enquanto que, para a transiente, são 6. Por outro lado, abaixo de todas as taxas de infiltração, são encontrados 2 e 10 cenários, para a condição constante e transiente, respectivamente.

Nota-se que, embora os materiais apresentem valores de umidade inicial semelhantes, a forma da frente de molhamento é diferente. Embora a influência do uso seja mais acentuada nas camadas superiores, os ensaios, também, sugerem variações na característica de redistribuição da água, nas camadas mais profundas, como mostram os exemplos representativos das Figuras 7A e 7B (en-

saios realizados em material arenoso com cana-de-açúcar e eucalptos, respectivamente).

O perfil da Figura 7A reflete um aumento gradual no valor de umidade, enquanto no perfil (Figura 7B) aparece um nível definido do posicionamento da frente (aproximadamente a 125cm). O volume de água infiltrado foi de, aproximadamente, $0,21 \text{ m}^3/\text{m}^2$ (coluna de água infiltrada durante o ensaio de $22\text{cm}/2\text{h}$), para o material da Figura 7(A) e de $0,28 \text{ m}^3/\text{m}^2$ (altura da coluna de água infiltrada de 28cm), para o material do perfil da Figura 7(B). Essas variações podem ser atribuídas aos diferentes valores de condutividade hidráulica para os locais ensaiados.

5. Conclusões

O uso e o estágio de desenvolvimento, assim como as práticas de manejo, afetam as propriedades hidráulicas dos materiais inconsolidados e, portanto, as características de infiltração, refletidas pelos resultados da condutividade hidráulica e, conseqüentemente, afetam, também, a recarga do aquífero. As características de recarga podem ser avaliadas com resultados muito diferentes, em função de como considera-se o evento de chuva, se com intensidade constante ou transiente, ao longo da duração total. Dependendo de como é definido o evento de chuva, pode se chegar a valores muito diferentes, quanto à recarga e ao escoamento superficial. Para a condição

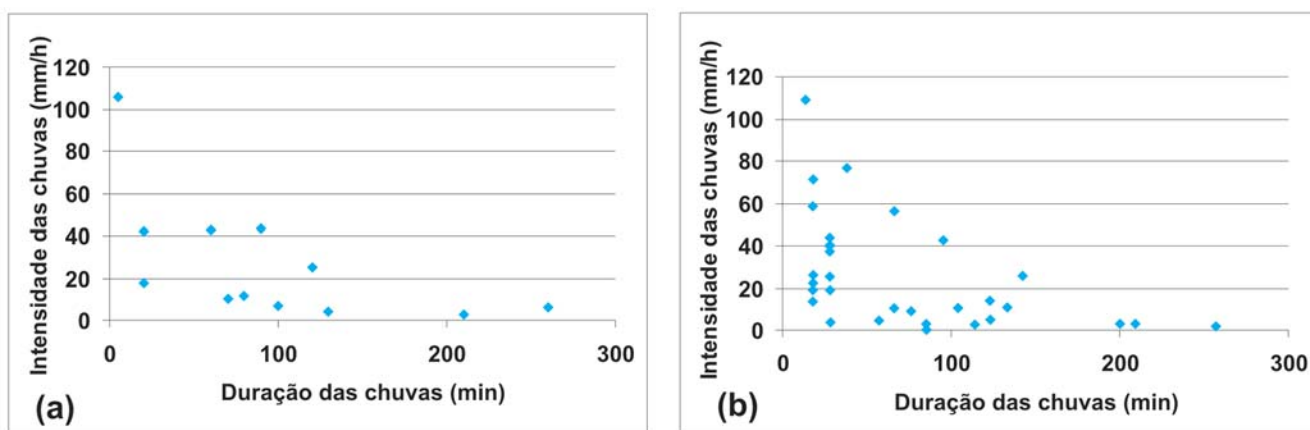


Figura 6 - Distribuição das chuvas considerando duração e intensidade. (a) Condição constante, (b) Condição transiente.

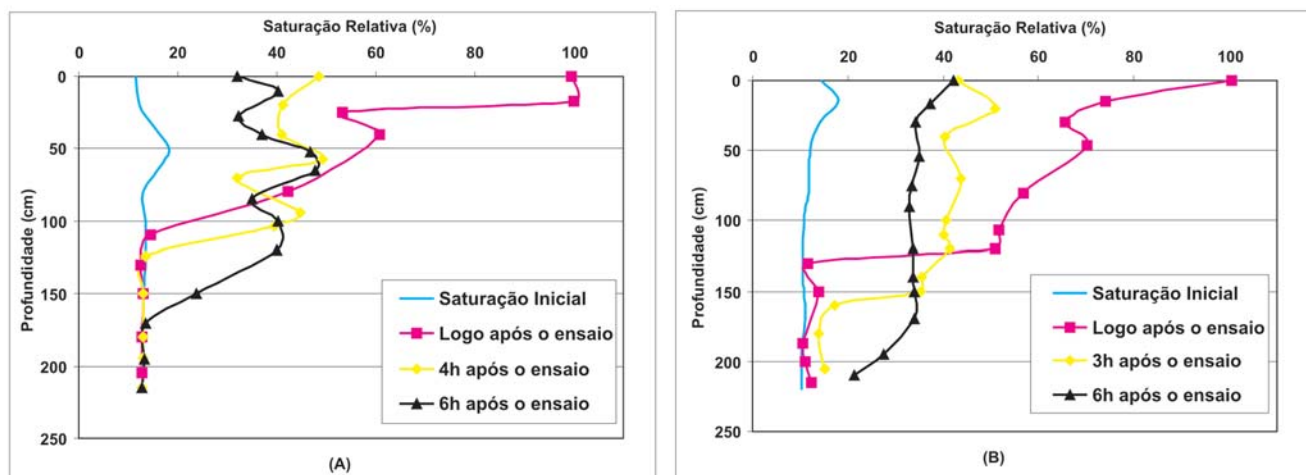


Figura 7 - Redistribuição da água em material inconsolidado residual arenoso - (A) Plantações de cana-de-açúcar (B) Plantações de eucalpto.

de cana-de-açúcar antiga, observa-se uma menor capacidade de infiltração, gerando, conseqüentemente, um maior potencial de escoamento superficial. Assim, a taxa de infiltração varia intensamente, tanto espacial, quanto temporalmente, demandando medidas de gestão para orientar a exploração das águas, em relação às taxas de recarga, em função do processo de uso e ocupação dessas regiões.

6 . Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro do CNPq/FINEP, Processos Nº 62.0031/01-8 e 476592/2001 - 1, e da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP - Processo 00/03027-7, 96/1502-2), imprescindíveis à realização desse trabalho.

7. Referências bibliográficas

- ANON. Tropical residual soil. *The Quarterly Journal of Engineering Geology*, v. 23, n.1, 1990.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 12004: Determinação do índice de vazios de solo não coesivos. Rio de Janeiro, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 6508: grãos de solos que passam na peneira de 4,8mm: determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 7181: solo: análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984.
- ASTM. *Infiltration rate of soils in field using double-ring infiltrometer*. D 3385-88. Annual Books of ASTM Standards. Soil and Rocks. 1994. 516p.

- BLEVINS, R.L., SMITH, M.S., THOMAS, G.W. Changes in soil properties under no-tillage. In: PHILLIPS, R.E., PHILLIPS, S.H. (Ed.) *No-tillage agriculture: principles and practices*. New York: VNR, 1984. Cap.9. p.190-230.
- ELLIES, A., GREZ, R., RAMIREZ, C. La conductividad hidráulica en fase saturada como herramienta par el diagnostico de la estructura del suelo. *Agro Sur*, v.5, p.51-56, 1997.
- GAZE, S.R., SIMMONDS, L.P., BROUWDER, J., BOUMA, J. Measurement of surface redistribution of rainfall and modelling its effects on water balance calculations for a millet field on sandy soil in Niger. *Journal of Hydrology*. 188-189, p. 267-284, 1997.
- GREEN, W. H., AMPT, C. A studies on soils physics I. The flow of air and water through soils. *Journal Agr. Science*, 1911. IV (Part I), p.1-24.

Artigo recebido em 04/07/2005 e
aprovado em 08/02/2006.

Descubra as muitas informações da:
**Geologia, Mineração,
Metalurgia & Materiais
e Engenharia Civil.**



**Assine e
publique
na Rem**

Conheça o nosso novo site: **WWW.rem.com.br**