

Processos hidrológicos de uma microbacia com Mata Atlântica, na região da Serra do Mar, SP

Hydrological processes of a small catchment with subtropical forest

Maurício Ranzini
Antonio Marozzi Righetto
Walter de Paula Lima
Manuel E. G. Guandique
Francisco C. S. Arcova
Valdir de Cicco

RESUMO: O experimento de campo foi delineado para compreender melhor o funcionamento hidrológico da microbacia "D" do Laboratório de Hidrologia Florestal, do Instituto Florestal de São Paulo. Selecionou-se uma das vertentes desta microbacia onde os componentes do deflúvio pudessem ser determinados. O monitoramento foi realizado durante 4 meses (dezembro de 1999 a março de 2000), o que possibilitou a caracterização do comportamento hidrológico da microbacia. Os resultados mostraram que 62 % das chuvas ocorridas no período foram inferiores a 10 mm e 88% delas tiveram intensidade inferior a 10 mm/h. Entretanto, algumas precipitações alcançaram volumes significativos. A capacidade de infiltração (18 mm/h) foi suficientemente alta para infiltrar 94 % das precipitações, reduzindo o escoamento superficial. Durante o período experimental, o escoamento superficial mostrou ser significativamente baixo, ao redor de 0,2 % da precipitação. A densidade de fluxo na direção vertical apresentou pouca variação, alternando períodos de fluxo ascendente com outros de fluxo descendente. Os valores de umidade do solo foram muito próximos à capacidade de campo. Isto pode explicar o comportamento de ascensão quase instantânea do lençol freático em resposta a um evento de chuva, aflorando em várias partes da microbacia e, conseqüentemente, aumentando a área de geração do escoamento superficial saturado, assim como explicar a pouca variação da densidade de fluxo vertical. Com base nos resultados, pode-se concluir que a área variável de afluência (A.V.A.) é muito dinâmica, justificando, desta forma, a importância deste conhecimento para o manejo de microbacias hidrográficas.

PALAVRAS-CHAVE: Processos hidrológicos, Microbacia, Mata Atlântica

ABSTRACT: A field experiment was carried out to better understand the hydrological process of stormflow generation in one of the three small experimental catchments of the Forest Hydrology Laboratory, Cunha, State of São Paulo. A hillslope portion of the catchment D was selected so that all stormflow components could be measured. Monitoring was carried out during the 4 rainy months of December 1999 to March 2000, which allowed the characterization of the hydrological behavior of catchment D. The results showed that 62% of the rainfall events during the experimental period were smaller than 10 mm, and that 88% of them had intensity smaller than 10 mm/h. However, some very high precipitations were also registered. The infiltration capacity of the soil (18 mm/h) was sufficiently high to account for the infiltration of over 94% of the precipitations, thus decreasing surface runoff. The overland flow component of the stormflow during the experimental period was significantly low (0,2 % of the precipitation). The values of the flow density in the soil were small, with alternating periods of upward flow with others of downward flow. The average values of soil humidity were always very close to the field capacity, which helps to explain the reason of the shallow groundwater, which arises so instantly after rainfall in many parts of the catchment. These saturated conditions, on the other hand, favor the generation of saturation flow, as well as explains the relatively small variation of the vertical soil water fluxes. Therefore, the knowledge of these dynamic conditions of the variable source area is very important for catchment management prescriptions in the region.

KEYWORDS: Hydrological processes, Catchment, Subtropical forest

INTRODUÇÃO

A disponibilidade natural de água encontra-se cada vez mais no foco da atenção não apenas da pesquisa como das pessoas em geral, devido a recorrentes problemas de distribuição, escassez, poluição e transformação antrópica da paisagem, que estão comprometendo os recursos hídricos.

Neste contexto destaca-se a Mata Atlântica que, tendo ocupado cerca de 15% do território nacional, hoje está reduzida a menos de 8%, estendendo-se ao longo da costa litorânea, originalmente desde o Rio Grande do Sul até o Rio Grande do Norte (SOS Mata Atlântica, 2002), constituindo uma floresta pluvial tropical, com clima quente e úmido. Sua vegetação, bastante densa, foi enormemente devastada desde o início da colonização do Brasil devido, principalmente, à extração de madeira e lenha e à ocupação rural e urbana. Entre os grandes aglomerados urbanos presentes nesta região destaca-se a Região Metropolitana de São Paulo, com 18,7 milhões de habitantes (Emplasa, 2003). Atualmente, resta somente 3% da Mata Atlântica original do Estado de São Paulo (SOS Mata Atlântica, 2002).

As microbacias constituem ecossistemas adequados para avaliação dos impactos causados pela atividade antrópica, que podem ocasionar sérios riscos ao seu equilíbrio. A necessidade de estudos sistemáticos em microbacias, com o intuito de se conhecer as relações e funções internas que mantêm estes ecossistemas, está ligada à busca de informações que possibilitem o estabelecimento de um planejamento adequado de uso da terra (Bormann e Likens, 1967; Hewlett e Hibbert, 1967; Sopper, 1974; Brown, 1976; Likens et al., 1977; Castro, 1980; Dyck e Cooke, 1981; Lima, 1986; Oliveira, 1989; Ranzini, 1990; Whitehead e Robison, 1993).

Na metade da década de 30, diversos pesquisadores observaram que em bacias pequenas florestadas a ocorrência de escoamento superficial era mínima, não sendo suficiente para explicar quantitativamente o escoamento direto (Hibbert e Troendle, 1988). Desde então, o conceito de geração de deflúvio em bacias florestadas tornou-se mais dinâmico e integrado, hoje se sabendo que o escoamento superficial hortoniano é apenas um dos processos que ocorrem. No entanto, embora o escoamento superficial hortoniano seja comum onde a vegetação é escassa, os solos são rasos, e as precipitações são de alta intensidade, ele é raro onde há uma boa cobertura vegetal e a capacidade de armazenamento dos solos é alta, em

condições de precipitações de intensidade média (Chorley, 1978).

Alguns hidrólogos florestais, estudando as respostas através dos hidrogramas de chuvas ocorridas em microbacias florestadas do Laboratório Hidrológico de Coweeta, na Carolina do Norte (EUA), entre 1941 e 1964, desenvolveram o conceito de área variável de afluência (A.V.A.) (Hewlett, 1974). Hewlett e Hibbert (1967) elucidaram que o escoamento direto em microbacias primárias florestadas não é produzido uniformemente por toda a superfície ou subsuperfície, quando afirmam que “A proporção da produção da bacia hidrográfica que se retrai ou se expande depende da precipitação e da umidade antecedente do solo. Quando o escoamento subsuperficial da água da parte alta da encosta excede a capacidade do perfil do solo em transmiti-lo, a água retornará à superfície e o curso d’água se expandirá”. Ou seja, o escoamento direto nessas condições está sob a influência de uma área de origem dinâmica, no sentido de que sofre expansões e contrações, e que normalmente representa apenas uma fração pequena da área total da microbacia (Hewlett, 1982).

Os modelos hidrológicos podem ser úteis no manejo de bacias hidrográficas, tanto para seu planejamento quanto para avaliar o impacto de mudanças no uso da terra. Para isso o modelo necessita descrever os processos dominantes adequadamente, e ser aplicável numa bacia onde os solos e a vegetação variem espacialmente, de tal forma que as predições possam auxiliar na tomada de decisão de qual uso da terra é o mais interessante para uma determinada situação (Bruijnzeel, 1997; O’Loughlin et al., 1990).

O objetivo do presente trabalho é a caracterização dos processos hidrológicos de uma microbacia com Mata Atlântica, localizada na região da Serra do Mar.

MATERIAL E MÉTODOS

Área experimental

O experimento foi conduzido na microbacia “D” do Laboratório de Hidrologia Florestal “Engenheiro Agrônomo Walter Emmerich” (Arcova, 1996), administrado pelo Instituto Florestal, órgão da Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo, localizado no Parque Estadual da Serra do Mar, próximo à cidade de Cunha, SP (Figura 1), entre as coordenadas geográficas 23°13’28” e 23°16’10” de latitude sul, e 45°02’53” e 45°05’15” de longitude oeste (Furian e Pfeifer, 1986).

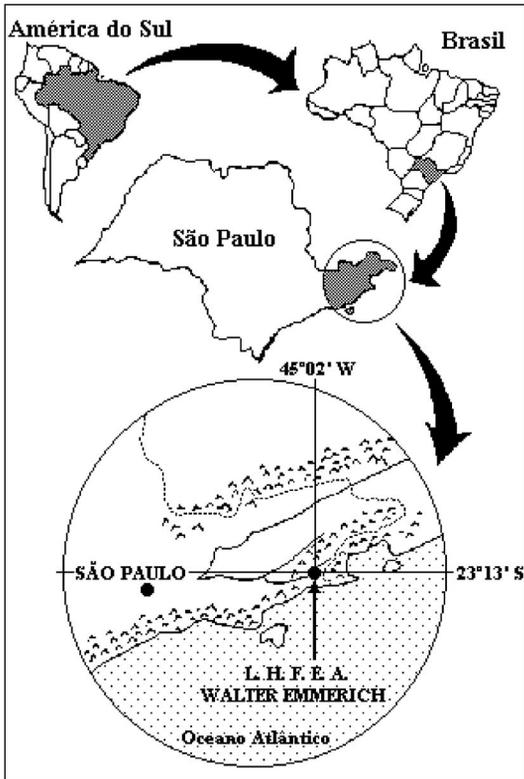


Figura 1
Localização do laboratório de hidrologia florestal "Eng. Agr. Walter Emmerich"
(Location of the Cunha forest hydrological laboratory)

Segundo a classificação de Köppen, o clima é do tipo Cfb, ou seja, temperado úmido (Ranzi, 2002). As precipitações anuais são elevadas, consequência dos efeitos orográficos da Serra do Mar; a precipitação média anual de 12 anos de observação é de 2241 mm, com valores extremos de 1985 mm e 3088 mm. O período úmido estende-se de outubro a março (estação chuvosa) e o período seco, ou pouco úmido, compreende os meses de abril a setembro. A temperatura média anual do ar é de 16,5 °C (período de 10 anos), média de 10 °C no inverno e de 22 °C no verão. A umidade relativa média mensal do ar está entre 80 % a 85 % para a estação chuvosa, e inferior a 80 % para o restante do ano, com ocorrência freqüente de nevoeiros densos nos períodos crepuscular e noturno (Arcova, 1996).

A precipitação foi medida continuamente através de quatro pluviógrafos do tipo caçamba, dispostos em três clareiras ao longo do canal principal e o quarto, no ponto de maior altitude da microbacia (Figura 2). O cálculo da precipitação na micro-

bacia "D" foi estimado pela média aritmética destes 4 pluviógrafos (Shimomichi et al., 1987).

O deflúvio foi medido na saída da microbacia "D" (Figura 2), onde se encontra uma estação fluviométrica composta de um tanque de sedimentação e um canal trapezoidal aberto, regulador do fluxo d'água. A cota é medida continuamente num linígrafo do tipo flutuador e convertida em vazão, usando-se uma curva chave (Cicco et al., 1987).

A área da microbacia "D" é de 56 ha, com elevações variando de 1228 m ao longo do divisor d'água na direção sudeste a menos de 1050 m na saída a noroeste. O comprimento do curso d'água principal é de 1260 m e o total de 1550 m; sendo a declividade do canal de 7,1% e a densidade de drenagem igual a 2,77 km/km². O perímetro da microbacia corresponde a 3450 m, com um fator de forma de 0,353 e orientação noroeste (Arcova, 1996).

O reconhecimento detalhado dos solos da microbacia "D", conduzido por Carvalho et al. (1990), mostrou uma predominância de uma mesma classe de solo, isto é, sete tipos e duas associações de Latossolo Vermelho-Amarelo. Este solo é proveniente, segundo Furian e Pfeifer (1986), de rochas duras, orientadas e de difícil decomposição, como os gnaisses, migmatitos e granitos. Em consequência, é quimicamente pobre, ácido e relativamente raso, com textura grosseira e estrutura fraca, isto é, os grânulos formam uma massa homogênea com muito fraca coerência, que aliados à elevada porosidade, condiciona-lhe boa permeabilidade.

A vegetação consiste de uma cobertura natural secundária, sucessora da vegetação natural primária conhecida como Mata Atlântica (Floresta Latifoliada Perenifolia, atualmente Floresta Ombrófila Densa), resultado da exploração madeireira ocorrida aproximadamente há 45 anos (Leitão Filho, 1982).

Os processos hidrológicos na microbacia "D" são descritos por Fujieda et al. (1997); Cicco e Fujieda (1992) e Cicco et al. (1986/88). Cerca de 18% da precipitação anual é interceptada pela floresta e retorna diretamente à atmosfera. A maior parte (82%) alcança o solo, infiltrando-se e alimentando os escoamentos subsuperficial e de base, sendo que 12% volta à atmosfera via transpiração. O escoamento superficial é raro, alcançando somente 0,6% da precipitação anual. O escoamento direto é composto por 5% proveniente da área variável de afluência adjacente ao curso d'água e por 6% do escoamento subsuperficial, perfazendo 11% da precipitação anual. Cerca de 59% da precipitação anual é armazenada no solo e flui via escoamento de base ao longo do ano. Portanto, o deflúvio é composto dos escoamentos direto e de base, alcançando 70% da precipitação anual.

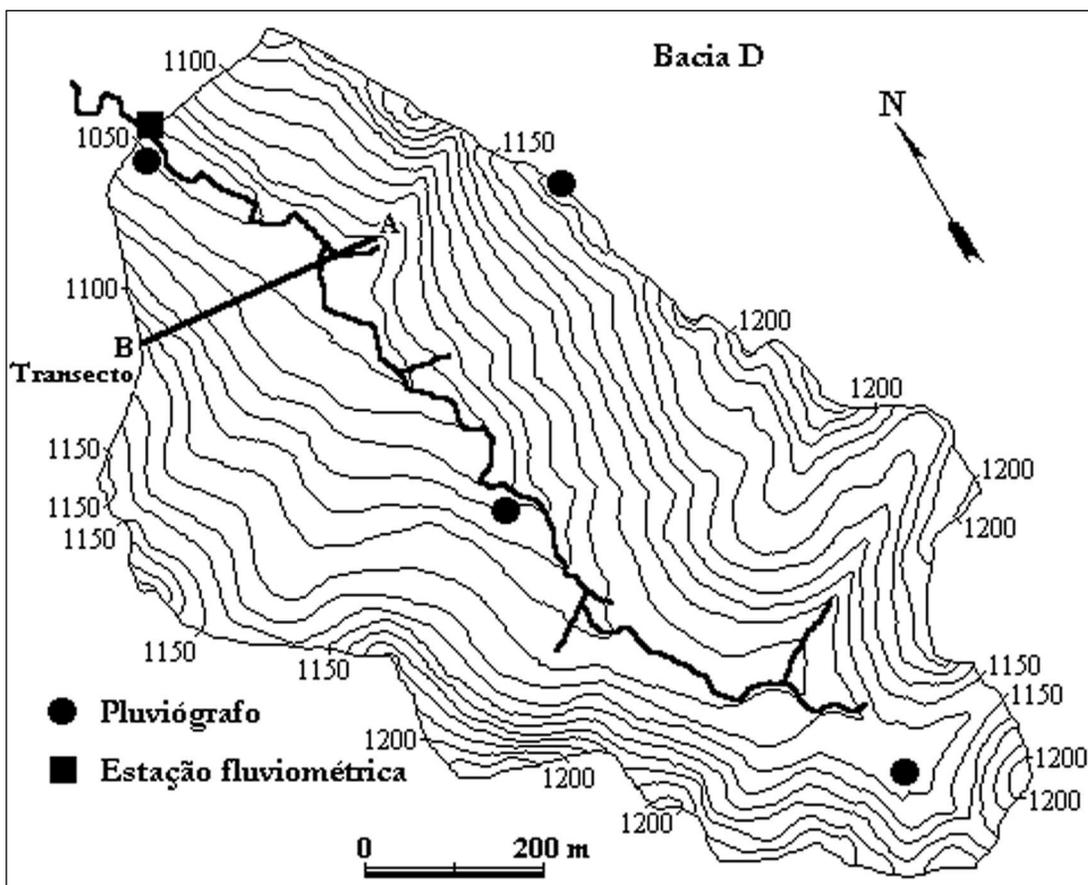


Figura 2
 Microbacia “D” mostrando a estação fluviométrica, pluviógrafos e o transecto
 (Map of Catchment D showing instruments location and transect)

Experimentação

Selecionou-se uma vertente para estudar alguns processos hidrológicos, quais sejam: escoamentos superficial e subsuperficial, capacidade de infiltração, condutividade hidráulica saturada e em função da umidade do solo, densidade de fluxo na direção vertical, e comportamento do lençol freático. Para tanto, foi feito um transecto, traçado no sentido do declive da bacia, onde foram instalados os experimentos e onde foram coletadas as amostras de solo (Figura 2).

Em bacias hidrográficas florestadas, ou com uma boa cobertura vegetal, a ocorrência do escoamento superficial é rara. No entanto, para que se pudesse avaliar este processo foi aberta uma trincheira na base da encosta na direção do transecto. Nesta trincheira foram instaladas duas calhas: uma para a coleta do escoamento superficial e outra, a cerca de 30 cm de profundidade, para se coletar o escoamento subsuperficial. Na

saída de cada uma destas calhas foi colocado um aparelho do tipo caçamba com capacidade de 0,5 litro (da Uijin Company Ltd. do Japão), os quais foram ligados a um terceiro aparelho (modelo B-361, da Nakaasa Instruments Company Ltd. do Japão), que registrou, através de impulsos elétricos, o volume escoado numa carta colocada sobre um tambor que se movimentava continuamente por intermédio de um mecanismo de relógio de quartzo.

A taxa de infiltração (f) foi determinada por intermédio de um infiltrômetro (modelo DIK-4200, da Daika Rika Kogyo Company Ltd. do Japão), o qual consiste de um anel cilíndrico de aço com 30 cm de diâmetro e 35 cm de altura, enterrado a profundidade de aproximadamente 20 cm. Em seqüência foi feito um dique de cerca de 10 cm ao redor do cilindro. Adicionou-se água dentro do cilindro e no dique até a altura de 10 cm. Em seguida, utilizando-se de um dispositivo em forma de

gancho acoplado a uma régua milimétrica e um vernier, para a verificação do nível d'água no anel interno, foi feita a medição. O objetivo do dique ao redor do cilindro foi de evitar o movimento lateral da água de dentro para fora do cilindro, assim que esta ultrapassa a parte inferior do cilindro.

A condutividade hidráulica saturada foi determinada pelo permeâmetro de Guelph (modelo 2800KI, da Soil Moisture Equipment Corp.). Este aparelho baseia-se na técnica conhecida como permeâmetro de poço de carga constante, empregando o princípio de Mariotte. O método envolve a medição, em um poço cilíndrico, da taxa de recarga d'água em estado permanente num solo não saturado, no qual é mantida uma carga d'água constante.

A condutividade hidráulica em função da umidade do solo foi determinada no campo, à profundidade de 130 cm, pelo método de Hillel et al. (1972).

A equação representativa de $K(\theta)$ para a profundidade a 130 cm foi obtida através do modelo: $K(\theta) = K(\theta_0) \cdot e^{\gamma(\theta - \theta_0)}$. O valor de γ , para cada profundidade, corresponde ao coeficiente angular da regressão linear entre $\ln K(\theta)$ e θ .

A densidade de fluxo na direção vertical, q_v , foi calculada a partir da equação de Darcy-Buckingham:

$$\vec{q}_v = -k(\theta) \cdot \frac{\delta\psi_T}{\delta z} \cdot \hat{k}$$

onde:

\vec{q}_v = densidade de fluxo da água no solo na direção vertical ($\text{cm}^3/\text{cm}^2 \cdot \text{h}$);

$K(\theta)$ = condutividade hidráulica em função da umidade do solo, θ (cm^3/cm^3);

$\delta\psi_T/\delta z$ = gradiente de potencial total (cm/cm);

\hat{k} = vetor unitário na direção z.

O vetor \vec{q}_v possui o mesmo módulo, a mesma direção, mas o sentido oposto do vetor $K(\delta\psi_T/\delta z)$; assim o sinal negativo sinaliza os sentidos opostos destes vetores, caso o gradiente de potencial total seja a diferença entre o potencial total na extremidade superior e o potencial total na extremidade inferior. Por convenção, se q for positivo, seu sentido será de baixo para cima; se negativo, de cima para baixo.

Foram instaladas 6 baterias de tensiômetros ao longo da vertente, nas profundidades de 120 cm, 130 cm e 140 cm. Leituras diárias dos tensiômetros possibilitaram determinar a densidade de fluxo a 130 cm de profundidade (Figura 3).

A partir dessas leituras determinaram-se os potenciais matriciais (ψ_m) e, pela curva de retenção, a umidade do solo (θ) a 130 cm. Concomitante, calculou-se o gradiente do potencial total entre as profundidades de 120 cm e 140 cm. Finalmente, valendo-se da equação de $K(\theta)$ para a profundidade a 130 cm, apresentada na Tabela 2, e do gradiente do potencial total, calculou-se a densidade de fluxo, q_v , para o período de 11/12/99 a 31/03/00 (Figura 7).

Para que fosse possível a análise do comportamento do lençol freático foram instalados 3 poços piezométricos (Figura 3), e em um abrigo acima de cada um dos poços foi colocado um aparelho (modelo W-761, da Nakaasa Instruments Company Ltd. do Japão), para medir continuamente a altura do lençol freático.

A vertente foi monitorada durante 4 meses (dezembro de 1999 a março de 2000), possibilitando caracterizar o comportamento hidrológico da microbacia em estudo.

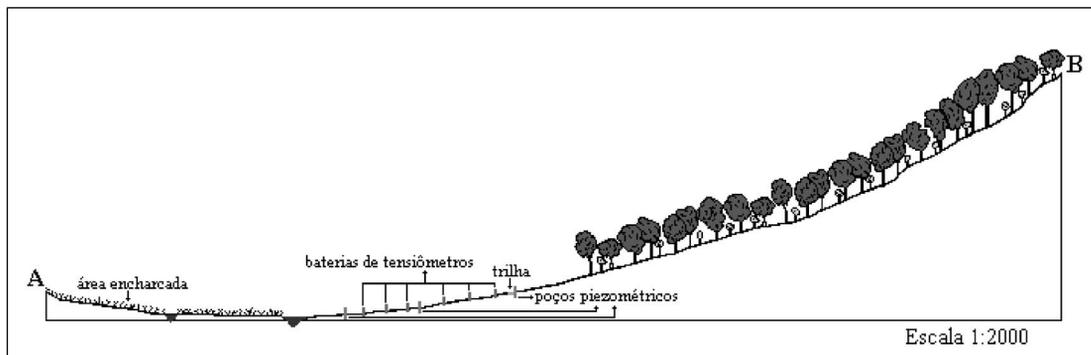


Figura 3

Localização das baterias de tensiômetros e dos poços piezométricos no transecto (Location of the tensiometers and piezometric wells along the transect)

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Determinação dos componentes dos processos hidrológicos

Durante o período experimental a precipitação total, Pt, estimada pela média aritmética de 4 pluviógrafos, alcançou 1312,8 mm (236,5 mm em dezembro, 400,0 mm em janeiro, 219,0 mm em fevereiro, e 457,3 mm em março). Destes valores, somente o mês de março esteve bem além da média histórica. Porém, isto é explicável em razão de uma chuva atípica que começou no dia 29/03/00 às 13:35 horas e, durante 12:35 horas ininterruptas, precipitou 243,8 mm.

Quando os eventos de chuva foram agrupados em classes de precipitação, verificou-se que cerca de 62 % das chuvas do período foram inferiores a 10 mm (Tabela 1). No extremo oposto, 7% do total correspondem a precipitações com valores superiores a 70 mm, sendo que mesmo quando se consideram as chuvas superiores a 20 mm o total é inferior a 20%.

Separando-se as precipitações em classes de intensidade, observa-se que 88% das chuvas têm intensidade inferior a 10 mm/h (Tabela 1). Por outro lado, somente 6% das chuvas tiveram intensidade superior a 20 mm/h, sendo que todas elas foram de curta duração.

É importante lembrar a importância do processo de interceptação, em especial em áreas florestais. Trabalho conduzido por Cicco et al. (1986/88) nesta mesma área experimental mostrou que 18,23% da precipitação anual retorna à atmosfera pelo processo de interceptação, não atingindo, portanto, o piso florestal. Conseqüentemente, a interceptação contribui para que as intensidades das chuvas sejam menores, favorecendo o processo de infiltração e diminuindo a freqüência de ocorrência do escoamento superficial.

Tabela 1

Distribuição de freqüência por classes de intensidade de chuva e por altura de precipitação (Frequency distribution of rainfall intensity and precipitation depth)

Classes de intensidade (mm/h)	Freqüência de eventos (%)	Classes de precipitação (mm)	Freqüência de eventos (%)
<10	88	<10	62
10-20	6	10-20	19
20-30	2	20-30	5
30-40	2	30-40	2
40-50	1	40-50	0
>50	1	50-60	2
—	—	60-70	3
—	—	>70	7

A Figura 4 traz os resultados da taxa de infiltração na vertente da microbacia “D”. Observa-se que a relação da taxa de infiltração e o tempo é semelhante à descrita por Horton (1940), com uma capacidade de infiltração de 18 mm/h. Portanto, somente haverá escoamento superficial hortoniano quando a intensidade da chuva for superior à capacidade de infiltração.

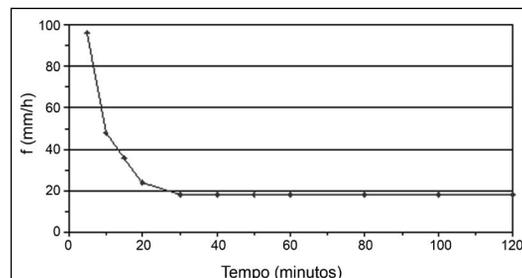


Figura 4
Taxa de infiltração (f) em relação ao tempo (Time variation of infiltration rate)

Durante o período experimental foram registrados apenas 2,2 mm de escoamento superficial, o que representa somente 0,2% da precipitação total do período. Este escoamento superficial deu-se quase que totalmente como resultado de uma única chuva, a qual em 12:35 horas ininterruptas, precipitou 243,8 mm.

Resultado semelhante foi obtido por Cicco e Fujieda (1992) numa área experimental próxima a microbacia “D”, onde 3 parcelas, com área de 20 x 30 m e declividade média de 18%, foram instaladas sobre uma vertente com cobertura de graminéia. O volume do escoamento superficial foi coletado em uma calha na base das parcelas e o resultado dado em milímetros de altura d’água. O escoamento superficial total durante o período de 1 ano foi de 0,61% da precipitação total.

A Figura 5 apresenta os resultados de condutividade hidráulica saturada obtidos no campo. Os valores, para cada uma das seis profundidades medidas, referem-se à integração da condutividade numa coluna de solo de 10 cm, devido à carga hidráulica a que é submetido o permeâmetro de Guelph. Assim, utilizou-se a condutividade integrada entre as profundidades 25-35 cm, 55-65 cm, 85-95 cm, 115-125 cm, 125-135 cm e 135-145 cm, representadas graficamente pela condutividade nos seus pontos médios: 30 cm, 60 cm, 90 cm, 120 cm, 130 cm e 140 cm.

Observa-se que a condutividade hidráulica saturada é da ordem de 1,8 cm/h na superfície, correspondendo à capacidade de infiltração determinada por infiltrômetro de anel, decaindo exponencialmente com a profundidade, onde são encontrados valores próximos a 0,001 cm/h. A análise de regressão dos valores de K_0 em função da profundidade num modelo exponencial mostra um bom coeficiente de correlação ($R^2 = 0,8990$).

A equação representativa da condutividade hidráulica do solo não-saturado $K(\theta)$ (cm/h), em função da umidade (θ), para a profundidade a 1,3 m, é apresentada na Tabela 2.

A umidade média na saturação, obtida das curvas características (ou de retenção) para cada profundidade, variou de 0,491 a 0,571 cm^3/cm^3 . O perfil de umidade do solo é apresentado na Figura 6. Após 20 dias, período em que a parcela experimental ficou coberta e ausente de chuva, a umidade variou de 0,417 a 0,559 cm^3/cm^3 ao longo do perfil do solo. Estes valores são muito próximos à capacidade de campo.

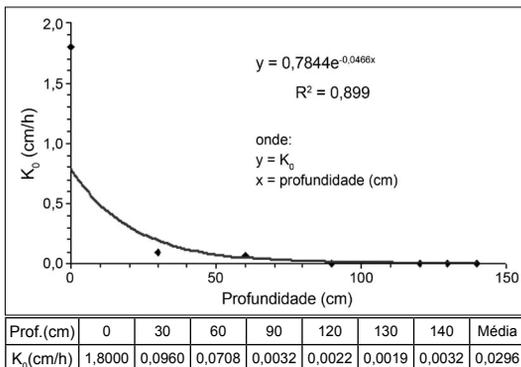


Figura 5
Condutividade hidráulica saturada (K_0) com a profundidade
(Relationship between saturated hydraulic conductivity and soil depth)

Os valores da densidade de fluxo da água no solo foram relativamente baixos, variando de 0,015 $\text{cm}^3/\text{cm}^2\cdot\text{h}$ a -0,019 $\text{cm}^3/\text{cm}^2\cdot\text{h}$; o sinal negativo indica, como foi convenção, que o sentido da densidade de fluxo é de cima para baixo. Como exemplo, tem-se que na segunda quinzena do mês de dezembro, quando a precipitação foi menos intensa, a densidade de fluxo foi ascendente, ao contrário do mês de janeiro, quando prevaleceu o fluxo descendente (Figura 7).

Em áreas montanhosas, como no caso da microbacia "D", o potencial gravitacional da água do solo nas partes superiores das encostas é bem maior quando comparado com aquele do exutório da bacia (tomado como referência). Isto faz com que o gradiente de potencial hidráulico e, conseqüentemente, a densidade de fluxo seja maior nestas áreas. Em outras palavras, a percolação ocorre mais rapidamente.

Isto, de acordo com Lima (1986), tem importantes implicações no processo de geração do deflúvio em microbacias: nos períodos chuvosos a infiltração é alta fazendo com que as camadas superficiais atinjam a saturação. Com o tempo, a frente de molhamento avança alcançando camadas mais profundas ou de menor permeabilidade. Assim, num determinado momento a direção do fluxo da água do solo mais superficial é desviada ao longo da declividade do terreno, ocasionando o escoamento subsuperficial (ou interfluxo).

Durante o período experimental foram registrados 13,5 mm de escoamento subsuperficial até a profundidade de 30 cm, o que representa 1,0% da precipitação total do período. No entanto, quando se analisa o comportamento do lençol freático durante o período experimental (Figura 7), observa-se um comportamento bem semelhante ao descrito por Lima (1986). Isto sugere uma participação bem maior do escoamento subsuperficial na geração do deflúvio.

Tabela 2

Equação representativa da condutividade hidráulica do solo não saturado $K(\theta)$ (cm/h) em função da umidade (θ), para a profundidade a 1,3 m. (Método de Hillel et al., 1972).
(Non-saturated soil hydraulic conductivity equation as a function of soil humidity for the depth of 1.3 m (Hillel et al, 1972))

Regressão ln $K(\theta)$ e θ	R^2	$K(\theta) = K_0 \cdot e^{\theta(0-0)}$
ln $K(\theta) = -99,8010$ + 182,7706. θ	0,7835	$K(\theta) = 0,0019 \cdot e^{182,7706 \cdot (\theta - 0,536)}$

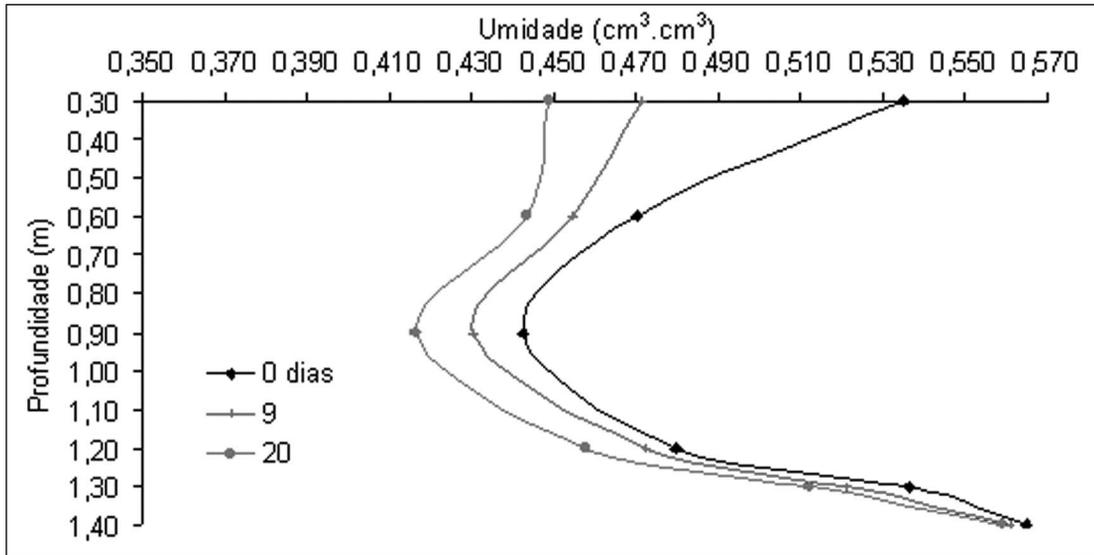


Figura 6
 Perfis da umidade do solo em função do tempo, durante a redistribuição da água no solo numa vertente da microbacia "D"
 (Soil water content profiles as a function of time, during redistribution of water in a catchment D profile)

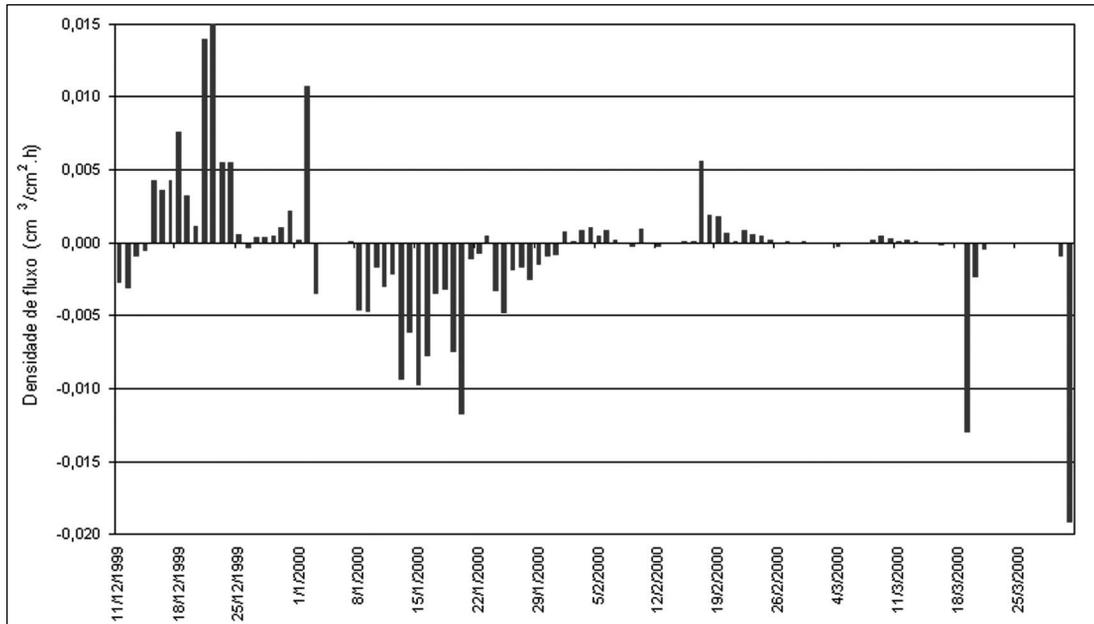
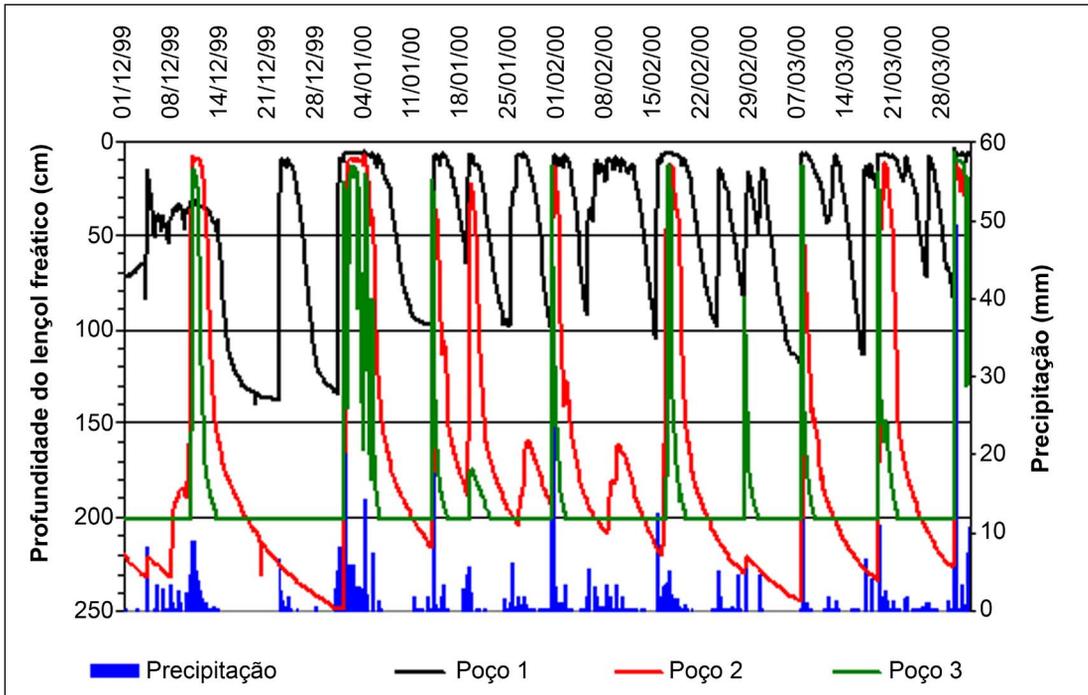


Figura 7
 Densidade de fluxo ($\text{cm}^3/\text{cm}^2 \cdot \text{h}$) referente ao período de 11/12/99 a 31/03/00
 (Flux density ($\text{cm}^3/\text{cm}^2 \cdot \text{h}$) for the period 11 December 1999 to 31 March 2000)

Observa-se na Figura 8 que o poço 1, localizado próximo ao curso d'água, responde prontamente a toda e qualquer chuva. O mesmo ocorre com os poços 2 e 3, localizados nas partes mais elevadas da encosta, quando da ocorrência de chuvas mais intensas. Nestas ocasiões, todos os 3 poços

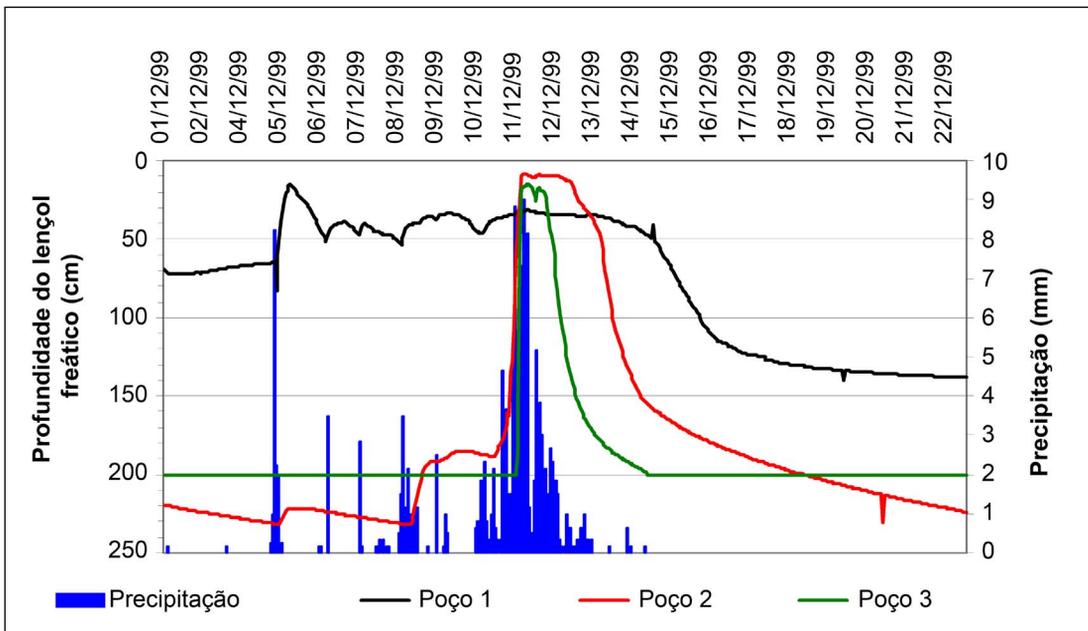
registraram um lençol freático muito próximo à superfície (ao redor de 30 cm de profundidade). Após o término da chuva, o lençol freático desce rapidamente ao nível anterior à precipitação.

A Figura 9 possibilita uma melhor visualização, pois focaliza um período menor de tempo.

**Figura 8**

Varição da profundidade em cm do lençol freático, compreendendo o período de 01/12/99 a 31/03/00, em resposta a precipitação (mm)

(Variation of water table depth in relation to rainfall for the period 12/01/99 to 03/31/00)

**Figura 9**

Varição da profundidade em cm do lençol freático, compreendendo o período de 01/12/99 a 23/12/00, em resposta a precipitação (mm)

(Variation of water table depth in relation to rainfall for the period 12/01/99 to 23/12/00)

Observa-se que uma chuva de 17,5 mm ocorrida no dia 04/12/99 foi suficiente para elevar o lençol freático do poço 1 de uma profundidade de 83 cm para a de 15 cm da superfície. Porém, não foi suficiente para modificar as profundidades dos lençóis freáticos dos poços 2 e 3. No entanto, com a ocorrência de um evento que se iniciou no dia 09/12/99 e terminou no dia 12/12/99, totalizando 137,5 mm o lençol freático em todos os 3 poços, no pico da precipitação, ficou a menos de 35 cm da superfície.

Antes do fim deste evento, logo após o pico da precipitação, o lençol freático do poço 3 começou a baixar rapidamente, seguido do lençol freático do poço 2 e, posteriormente, do poço 1. Esta tendência indica uma movimentação lateral, paralela à superfície do terreno, caracterizando o escoamento subsuperficial ou interfluxo.

Os resultados do presente trabalho mostram que as condições de saturação da superfície são bastante freqüentes e abrangentes na microbacia, sugerindo, desta forma, que a área variável de afluência (A.V.A.) pode, na realidade, ser ainda maior do que os valores encontrados em trabalhos anteriores. Por exemplo, Cicco e Fujieda (1992), estudando a distribuição da freqüência do escoamento total diário e a descarga média diária da Microbacia "D", calcularam o escoamento direto em 11,1% em relação à precipitação média anual. Estes autores estimaram a área variável de afluência (A.V.A.), responsável pelo escoamento superficial saturado, em 2,5 hectares (áreas permanentemente saturadas situadas ao longo dos canais, equivalentes a 4,5% da área da microbacia "D"). Já Arcova (1996), trabalhando na mesma bacia com as áreas mínimas de contribuição do escoamento direto (MCA), definidas como a área da bacia na qual 100% da precipitação é liberada na forma de escoamento direto, verificou que a área de contribuição da bacia variou de 6 ha (10,7% da superfície), durante o período seco, a até 33,6 ha (60% da superfície), nos períodos chuvosos. Estes resultados estão mais próximos daqueles obtidos por Ranzini (2002), que trabalhou com modelagem hidrológica (TOPMODEL) nesta mesma área, onde simulações mostraram uma variação de 7 a 93% do escoamento superficial saturado. Portanto, trata-se de uma área variável de afluência (A.V.A.) muito mais dinâmica e, desta forma, importante no manejo de bacias hidrográficas. A constatação de uma A.V.A. dinâmica e mais abrangente espacialmente tem, sem dúvida, implicações práticas importantes. Por exemplo, ela mostra que do ponto de vista da proteção destas áreas hidrologicamente frágeis

da microbacia, os 30 metros exigidos pelo Código Florestal como Área de Preservação Permanente não seriam, com certeza suficientes para a proteção dos recursos hídricos, no caso de a microbacia ser colocada em um sistema mais intensivo de uso do solo.

CONCLUSÕES

As principais conclusões são:

- a) A análise da precipitação mostrou que 62% das chuvas são inferiores a 10 mm e 88% delas têm intensidade inferior a 10 mm/h;
- b) Para o período estudado, a capacidade de infiltração (18 mm/h) foi suficientemente alta para infiltrar 94% das precipitações, reduzindo o escoamento superficial (0,2% da precipitação), considerado baixo;
- c) O escoamento subsuperficial até a profundidade de 30 cm alcançou 1,0% da precipitação total do período experimental. O comportamento do lençol freático neste período mostrou uma movimentação lateral paralela à superfície do terreno, indicando uma maior participação do escoamento subsuperficial (ou interfluxo) na geração do escoamento direto;
- d) A densidade de fluxo na direção vertical apresentou pouca variação, alternando períodos de fluxo ascendente com outros de fluxo descendente. Chamam a atenção os valores de umidade do solo, os quais são muito próximos à capacidade de campo. Isto ajuda a explicar o porquê do lençol freático subir tão instantaneamente, fazendo-o aflorar em várias partes da bacia e, conseqüentemente, proporcionando áreas para a geração do escoamento superficial saturado; e
- e) A área variável de afluência (A.V.A.) mostrou ser muito dinâmica e espacialmente abrangente, informação esta importante para tomada de decisões sobre manejo adequado dos recursos naturais nesta região.

AUTORES E AGRADECIMENTOS

MAURÍCIO RANZINI é Engenheiro Florestal. Pós-Doutorando no Núcleo de Pesquisa em Geoquímica e Geofísica da Litosfera – NUPEGEL/USP – Av. Pádua Dias, 11 – Piracicaba, SP - 13418-900 - E-mail: ranzini@ig.com.br

ANTONIO MAROZZI RIGHETTO é Professor Associado do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN - Natal, RN - 50078-970 – E-mail: righetto@ct.ufrn.br

WALTER DE PAULA LIMA é Professor Titular do Departamento de Ciências Florestais - ESALQ/USP - Caixa Postal 9 - Piracicaba, SP - 13400-970 - E-mail: wplima@carpa.ciagri.usp.br

MANUEL E. G. GUANDIQUE é Eng. Agrônomo. Pós-doutorando no Centro de Energia Nuclear na Agricultura – CENA/USP, Laboratório de Ecologia Isotópica - Av. Centenário, 303 – Piracicaba, SP – 13400-000 – E-mail: megamero@cena.usp.br

FRANCISCO C. S. ARCOVA é Pesquisador do Instituto Florestal - R. do Horto, 931 - São Paulo, SP - 02377-000 – E-mail: fcarcova@ig.com.br

VALDIR DE CICCICO é Pesquisador do Instituto Florestal - R. do Horto, 931 - São Paulo, SP - 02377-000 – E-mail: vcicco@ig.com.br

Este trabalho foi financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) através do Processo FAPESP 98/10777-0. Os autores agradecem a colaboração dos técnicos de campo João B. A. dos Santos e Ivail R. de Toledo pelo auxílio na instalação de equipamentos e na realização das coletas, sem os quais este trabalho não teria sido possível.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARCOVA, F.C.S. **Balanço hídrico, características do deflúvio e calibragem de duas microbacias hidrográficas na Serra do Mar, SP**. Piracicaba, 1996. 155p. Dissertação (Mestrado). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Universidade de São Paulo

BORMANN, F.H.; LIKENS, G.E. Nutrient cycling. *Science*, v.155, n.3761, p.424-429, 1967.

BROWN, G.E. **Forestry and water quality**. Corvallis: OSU Book Stores, 1976. 74p.

BRUIJNZEEL, L.A. Hydrology of forest plantations in the tropics. In: NAMBIAR, E.K.S.; BROWN, A.G. (ed.). **Management of soil, nutrients and water in tropical plantation forests**. Canberra: ACIAR, 1997. p.125-67

CARVALHO, W.A.; PANOSO, L.A.; PFEIFER, R.M.; ROSSI, M. Levantamento de reconhecimento detalhado dos solos do Parque Estadual da Serra do Mar - Núcleo Cunha, SP (Bacia "D"). *Revista do Instituto Florestal*, v.2, n.2, p.127-155, 1990.

CASTRO, P.S. **Influência da cobertura florestal na qualidade da água em duas bacias hidrográficas na região de Viçosa, MG**. Piracicaba, 1980. 107p. Dissertação (Mestrado). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Universidade de São Paulo

CHORLEY, T. The hillslope hydrological cycle. In: KIRKBY, M.J. (ed.). **Hillslope hydrology**. Chichester: John Wiley, 1978. cap.1, p.1-42

CICCO, V.; ARCOVA, F.C.S.; SHIMOMICHI, P.Y.; FUJIEDA, M. Intercepção das chuvas por floresta natural secundária de Mata Atlântica, SP. *Silvicultura em São Paulo*, v.20-22, p.25-30, 1986/88.

CICCO, V.; EMMERICH, W.; FUJIEDA, M. Determinação da curva-chave do vertedouro da bacia hidrográfica experimental "D" no Parque Estadual da Serra do Mar - Núcleo de Cunha, SP. *Boletim técnico do Instituto Florestal*, v.41, n.1, p.79-96, 1987.

CICCO, V.; FUJIEDA, M. Pesquisa em manejo de bacias hidrográficas em São Paulo. *Revista do Instituto Florestal*, v.4 (único), p.808-815, 1992.

DYCK, W.J.; COOKE, J.G. Exotic forestry and its effects on water quality. *The Waters of Waikato*, v.1, p.1-11, 1981.

EMPLASA – EMPRESA PAULISTA DE PLANEJAMENTO METROPOLITANO S.A. **População metropolitana estimada em tempo real**. Disponível em: <http://www.emplasa.sp.gov.br>. Acesso em: 09 mar. 2003.

FUJIEDA, F.; KUDOH, T.; CICCICO V.; CARVALHO, J.L. Hydrological processes at two subtropical forest catchments: the Serra do Mar, São Paulo, Brazil. *Journal of hydrology*, v.196, p.26-46, 1997.

FURIAN, S.M.; PFEIFER, R.M. Levantamento de reconhecimento do meio físico do Núcleo Cunha, SP. *Boletim técnico do Instituto Florestal*, São Paulo, v.40, n.2, p.183-193, 1986.

HEWLETT, J.D. Comments on letters relating to "Role of subsurface flow in generating surface runoff, 2, upstream source areas" by R. Allan Freeze. *Water resources research*, v.10, n.3, p.605-607, 1974.

HEWLETT, J.D. **Principles of forest hydrology**. Athens: University of Georgia Press, 1982. 183p.

HEWLETT, J.D.; HIBBERT, A.R. Factors affecting the response of small watersheds to precipitation in humid areas. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON FOREST HYDROLOGY, 1967. **Proceedings**. Oxford: Pergamon Press, 1967. p.275-290.

HIBBERT, A.R.; TROENDLE, C.A. Streamflow generation by variable source area. In: SWANK, W.T.; CROSLEY JUNIOR, D.A. (ed.). **Forest hydrology and ecology at Coweeta**. New York: Springer-Verlag, 1988. p.111-127

HILLEL, D.; KRENTOS, V.D.; STYLIANOU, Y. Procedure and test of an internal drainage method for measuring soil hydraulic characteristics in situ. *Soil science*, v.114, p.395-400, 1972.

HORTON, R.E. An approach toward a physical interpretation of infiltration capacity. *Soil science Society of America proceedings*, v.5, p.399-417, 1940.

LEITÃO FILHO, H.F. Aspectos taxonômicos das florestas do Estado de São Paulo. *Revista do Instituto Florestal*, v.16a, n.1, p.197-206, 1982.

- LIKENS, G.E.; BORMANN, F.H.; PIERCE, R. S.; EATON, J.S.; JOHNSON, N.M. **Biogeochemistry of a forested ecosystem**. New York: Springer-Verlag, 1977. 146p.
- LIMA, W.P. **Princípios de hidrologia florestal para o manejo de bacias hidrográficas**. Piracicaba: ESALQ/USP, 1986. 242p.
- OLIVEIRA, F.A. **Produção e qualidade da água em bacias hidrográficas contendo diferentes coberturas vegetais na região de Agudos, SP**. Piracicaba, 1989. 96p. Dissertação (Mestrado). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Universidade de São Paulo.
- O'LOUGHLIN, E.M. Modelling soil water status in complex terrain. **Agricultural and forest meteorology**, v.50, n.1-2, p.23-38, 1990.
- RANZINI, M. **Balço hídrico, ciclagem geoquímica de nutrientes e perdas de solo em duas microbacias reflorestadas com *Eucalyptus saligna* Smith, no Vale do Paraíba, SP**. Piracicaba, 1990. 118p. Dissertação (Mestrado). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Universidade de São Paulo.
- RANZINI, M. **Modelagem hidrológica de uma microbacia florestada da serra do mar, SP, com o modelo TOPMODEL: simulação do comportamento hidrológico em função do corte raso**. São Carlos, 2002. 132p. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo
- SHIMOMICHI, P.Y.; CICCIO, V.; ARCOVA, F.C.S.; FÁRIA, A.J. Correlação entre métodos de cálculo de precipitação média mensal em bacia hidrográfica experimental. **Boletim técnico do Instituto Florestal**, v.41, n.1, p.1-26, 1987.
- SOPPER, W.E. **Water quality in forested watersheds**. Philadelphia: Pennsylvania State University. School of Forest Resources, 1974. 30p.
- SOS MATA ATLÂNTICA. **Atlas dos remanescentes florestais da Mata Atlântica**. Disponível em: <http://www.sosmatatlantica.org.br/atlas2001/index.asp>. Acesso em: 24 abr. 2002.
- WHITEHEAD, P.G.; ROBINSON, M. Experimental basin studies: an international and historical perspective of forest impacts. **Journal of hydrology**, v.145, n.3-4, p.217-30, 1993.