



**ESTUDO HIDROLÓGICO EM MICROBACIA
HIDROGRÁFICA COM REGIME DE
ESCOAMENTO EFÊMERO**

CARLOS ROGÉRIO DE MELLO

2003

56931

048712

CARLOS ROGÉRIO DE MELLO

**ESTUDO HIDROLÓGICO EM MICROBACIA HIDROGRÁFICA COM
REGIME DE ESCOAMENTO EFÊMERO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Doutorado em Agronomia, Área de Concentração em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de "Doutor".

Orientador

Prof. Dr. José Maria de Lima

LAVRAS
MINAS GERAIS – BRASIL
2003

Ficha Catalográfica Preparada pela Divisão de Processos Técnicos da
Biblioteca Central da UFLA

Mello, Carlos Rogério de

Estudo hidrológico em microbacia hidrográfica com regime de
escoamento efêmero / Carlos Rogério de Mello. -- Lavras : UFLA, 2003.
133 p. : il.

Orientador: Jose Maria de Lima.

Tese (Doutorado) – UFLA.

Bibliografia.

1. Hidrologia. 2. Microbacia hidrográfica. 3. Modelagem. 4. Deflúvio. 5.
Evapotranspiração. 6. Umidade do solo. 7. Erosão. 8. Método CN. 9. Hidrógrafas.
10. Umidade crítica. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD-551.48
-631.45

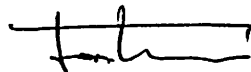
CARLOS ROGÉRIO DE MELLO

**ESTUDO HIDROLÓGICO EM MICROBACIA HIDROGRÁFICA COM
REGIME DE ESCOAMENTO EFÊMERO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Doutorado em Agronomia, Área de Concentração em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de “Doutor”.

APROVADA em 08 de outubro de 2003

Prof. Dr. Antônio Marciano da Silva	DEG/UFLA
Prof. Dr. Fazal Hussain Chaudhry	EESC/USP
Prof. Dr. Nilton Curi	DCS/UFLA
Prof. Dr. Marx Leandro Naves Silva	DCS/UFLA
Prof. Dr. Daniel Furtado Ferreira	DEX/UFLA



Prof. Dr. José Maria de Lima
UFLA
(Orientador)

LAVRAS
MINAS GERAIS - BRASIL

**À minha mãe Cidinha, à memória de
meu pai Waldomiro, à minha noiva
Olívia, ao meu irmão José Marcio, aos
meus sobrinhos Clara e Cláudio, à minha
cunhada Claudinelli,
OFEREÇO.**

**Gostaria de DEDICAR este trabalho a DEUS pelas obras maravilhosas que
realizou em mim e, também, a todos os pesquisadores brasileiros, que além
das dificuldades de apoio financeiro, sofrem com a falta de reconhecimento
da própria sociedade brasileira.**

AGRADECIMENTOS

Ao Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras pela acolhida e apoio ao longo do curso de Doutorado e à CAPES pela concessão de bolsa de estudos.

Ao Prof. José Maria de Lima pela orientação, confiança depositada e amizade construída.

Ao Prof. Antônio Marciano da Silva pelas orientações, convivência e amizade desde os tempos de graduação.

À FAPEMIG pelo apoio financeiro concedido ao projeto de pesquisa do qual se originou este trabalho, além de bolsas a alunos de iniciação científica que colaboraram na condução e manutenção do experimento.

Ao prof. Geraldo César de Oliveira (UFG) pela amizade, apoio, especialmente na escolha do local do experimento e pela troca de experiências.

Ao Sr. Herberes pela concessão da área em que o experimento foi instalado, oferecendo apoio e proteção aos equipamentos.

Aos prof^º Fazal Hussain Chaudhry (EESC/USP), Marx Leandro Naves Silva (DCS/UFLA), Daniel Furtado Ferreira (DEX/UFLA) e Nilton Curi (DCS/UFLA) pela disponibilidade e sugestões para melhoria do trabalho.

Ao prof. Vicente Gualberto pela amizade e apoio nas fases mais difíceis ao longo do período do curso.

Aos funcionários do Laboratório de Hidráulica Osvaldo ("Neném"), José Luiz e Lindenberg ("Só Berg") pela ajuda na construção e instalação da calha Parshall, instalação de tensiômetros e curvas características do solo, além da amizade e boa vontade.

Aos funcionários do Departamento de Ciência do Solo José Roberto ("Pesão"), Carlos Ribeiro (Carlinhos), Dulce e Adriana pela amizade, acolhida e ajuda nas diversas fases do projeto.

Aos colegas de curso Ana Rosa, Júlio César Nóbrega, Marcos Carolino, Jonas, João Bosco, Gisleine (“Gigi”), Wellington, Marcos Kondó, Totó, Vinícius, Maria Aparecida (Dedé), Alexandre, Sérgio Gualberto, Tadeu, Antônio Marcos e Isabel pelo convívio e pela “agradável troca de experiência”.

A todos que colaboraram com o desenvolvimento do trabalho, o meu muito obrigado.

SUMÁRIO

LISTA DE SÍMBOLOS	i
RESUMO GERAL	iv
GENERAL ABSTRACT	v
CAPÍTULO 1	1
1 INTRODUÇÃO GERAL	1
2 REFERENCIAL TEÓRICO	3
2.1 O ciclo hidrológico	3
2.2 Microbacias hidrográficas	6
2.3 Modelos hidrológicos	7
3 MATERIAL E MÉTODOS	10
3.1 Características morfométricas da microbacia	10
3.2 Monitoramento hidrológico da microbacia	13
3.2.1 Dados climatológicos	13
3.2.2 Escoamento superficial	13
3.3 Monitoramento da umidade do solo	17
4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	20
CAPÍTULO 2: Balanço hídrico e consumo de água pelas plantas associado à umidade do solo em microbacia hidrográfica com regime de escoamento efêmero	24
RESUMO	24
ABSTRACT	26
1 INTRODUÇÃO	27
2 MATERIAL E MÉTODOS	30
2.1 Evapotranspiração potencial	30
2.2 Balanço hídrico	32
2.3 Relação entre evapotranspiração e umidade do solo	35

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	36
3.1 Comportamento do balanço hídrico e de seus componentes na microbacia.....	36
3.2 Avaliação da relação entre a evapotranspiração e a umidade do solo..	44
4 CONCLUSÕES.....	51
5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	52
CAPÍTULO 3: Influência da umidade antecedente do solo nas variáveis de escoamento superficial e erosão em microbacia hidrográfica com regime de escoamento efêmero	55
RESUMO.....	55
ABSTRACT.....	57
1 INTRODUÇÃO.....	58
2 MATERIAL E MÉTODOS.....	60
2.1 Obtenção das variáveis de escoamento superficial.....	60
2.2 Tratamento estatístico	61
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	62
3.1 Análise qualitativa.....	62
3.2 Análise quantitativa.....	73
4 CONCLUSÕES.....	76
5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	77
CAPÍTULO 4: Aplicabilidade do método CN-SCS a eventos isolados de precipitação em microbacia hidrográfica com regime de escoamento efêmero.....	79
RESUMO.....	79
ABSTRACT.....	81
1 INTRODUÇÃO.....	82
2 MATERIAL E MÉTODOS.....	85
2.1 Descrição do método CN-SCS.....	85

2.2 Aplicação do método CN-SCS a eventos isolados.....	88
2.3 Análise das variáveis do método CN-SCS.....	89
2.3.1 Abstração inicial (A_i), Número da Curva (NC) e razão tr/ta	89
2.3.2 Tempo de concentração (t_c).....	91
2.4 Estudo de caso: modelagem do deflúvio e vazão de pico, baseada no método CN-SCS, numa microbacia hidrográfica com regime de escoamento efêmero.....	92
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	94
3.1 Aplicação do método CN-SCS a eventos isolados.....	94
3.2 Análise das variáveis do método CN-SCS.....	98
3.2.1 Abstração inicial (A_i), Número da Curva (NC) e relação tr/ta	98
3.2.2 Tempo de concentração.....	105
3.3 Estudo de caso: modelagem do deflúvio e vazão de pico, baseada no método CN-SCS, numa microbacia hidrográfica com regime de escoamento efêmero	108
3.3.1 Deflúvio.....	108
3.3.2 Vazão de Pico.....	111
4 CONCLUSÕES.....	117
5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	118
ANEXOS.....	121

LISTA DE SÍMBOLOS

A_i	Abstração inicial
a	Albedo
A	Área
S	Armazenamento potencial de água do solo
L	Comprimento do curso d'água principal
σ	Constante de Stefan-Boltzmann
DL	Declividade do curso d'água principal
D_p	Drenagem profunda
D_c	Duração da chuva
D	Duração da chuva efetiva
D_e	Duração do escoamento
e	Erro absoluto
EM	Erro médio
ES	Escoamento superficial ou deflúvio
E_i	Evapotranspiração para condições isotérmicas
ET_p	Evapotranspiração potencial
ET_r	Evapotranspiração real
I_{10}	Intensidade máxima de 10 minutos
I	Intensidade média de precipitação
MO	Matéria orgânica
H	Nível de água na calha
NC	Número da Curva
NC_{II}	Número da Curva correspondente à umidade da capacidade de campo
NC_{III}	Número da Curva correspondente à umidade maior que a capacidade de campo
NC_I	Número da Curva correspondente à umidade menor que a capacidade

de campo

NC A	Número da Curva correspondente às características do solo A
NC B	Número da Curva correspondente às características do solo B
NC C	Número da Curva correspondente às características do solo C
NC D	Número da Curva correspondente às características do solo D
PT	Porosidade total
P	Precipitação
Pe	Precipitação efetiva
Pu	Precipitação unitária
qef	Radiação líquida
G	Radiação solar incidente
C	Razão de escoamento (ES/P)
VI/ES	Razão entre deflúvio de ascensão e deflúvio total da hidrógrafa
$\frac{\Delta}{\gamma}$	Relação entre a tangente à curva de pressão de saturação de vapor e constante psicrométrica
T	Temperatura
tabs	Tempo de abstração inicial
ta	Tempo de ascensão da hidrógrafa
tc	Tempo de concentração
tp	Tempo de pico da hidrógrafa ($t_a - D/2$)
tr	Tempo de recessão da hidrógrafa
ti	Tempo para intensidade máxima da chuva
es	Tensão de vapor saturado
ea	Tensão parcial de vapor
θ_{rel}	Umidade relativa
θ_{20}	Umidade relativa a 20 cm de profundidade
θ_{50}	Umidade relativa a 50 cm de profundidade

θ_{80}	Umidade relativa a 80 cm de profundidade
θ_{critico}	Umidade relativa crítica
U	Umidade relativa do ar
θ_{perfil}	Umidade relativa média no perfil
θ_{cc}	Umidade volumétrica correspondente à capacidade de campo
θ_{s}	Umidade volumétrica correspondente à saturação
θ_{pmp}	Umidade volumétrica correspondente ao ponto de murcha permanente
θ_{r}	Umidade volumétrica residual
V_{estimado}	Valor estimado da variável
V_{real}	Valor real da variável
ΔA	Varição de armazenamento de água no solo
Q_{p}	Vazão de pico da hidrógrafa
q_{p}	Vazão de pico da hidrógrafa unitária
Q	Vazão na calha
w2	Velocidade média do vento a 2,0 m do solo
V1	Deflúvio de ascensão da hidrógrafa
V2	Deflúvio de recessão da hidrógrafa

RESUMO GERAL

MELLO, Carlos Rogério de. Estudo hidrológico em microbacia hidrográfica com regime de escoamento efêmero. 2003. 133p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras¹

Este trabalho objetiva ao estudo hidrológico de uma microbacia hidrográfica de fluxo efêmero, notadamente, balanço hídrico, consumo de água pela cobertura vegetal associado à umidade do solo, influência da umidade antecedente à precipitação no escoamento superficial e erosão, além de modelar a aplicação do método CN-SCS a eventos isolados de precipitação. Foi feito monitoramento do ciclo hidrológico em microbacia cuja área é de 1,03 ha, na região de Lavras, MG, no período de nov/02 a abril/03, avaliando-se o escoamento superficial por calha Parshall e linígrafo automático, características climatológicas, através de estação climatológica compacta, umidade do solo em 3 profundidades (20, 50 e 80 cm), empregando sensores do tipo bloco de resistência elétrica e nível do lençol freático em área de surgência do mesmo. O balanço hídrico mostrou pequena contribuição do escoamento superficial (2,2%) e elevado percentual da evapotranspiração (51,6%) no ciclo hidrológico. A evapotranspiração, associada à umidade do solo, foi caracterizada por uma função logarítmica, determinando-se um valor crítico de umidade que correspondeu a 76% da capacidade de campo. A umidade antecedente, nas três profundidades, mostrou elevada influência nas características do escoamento superficial e erosão, determinando-se uma umidade relativa máxima de influência igual a 0,90. Foi verificado que o método CN-SCS não produziu bons resultados quando aplicado a eventos isolados de precipitação, produzindo erros médios, respectivamente, para o deflúvio e vazão de pico, de 400 e 200%, com elevada sensibilidade dos parâmetros de entrada do método. Foram ajustados modelos semi-conceituais para abstração inicial, número da curva, tempo de ascensão e relação tempo de recessão e tempo de ascensão da hidrógrafa, com base nas características da precipitação e umidade média no perfil do solo até 80 cm. Com estes modelos foram obtidas boas estimativas para o deflúvio e vazão de pico, podendo ser referência para a estruturação de modelos de simulação hidrológica.

¹ Comitê Orientador: José Maria de Lima – DCS/UFLA (Orientador) e Antônio Marciano da Silva – DEG/UFLA (Co-orientador).

GENERAL ABSTRACT

MELLO, Carlos Rogério de. **Hydrological study in a small-ephemeral watershed**. 2003. 133p. Dissertation (Doctorate on Soil Science and Plant Nutrition) – Federal University of Lavras, Lavras (MG)².

This study aimed to measure water balance, soil-moisture-related water uptake by plants, and the influence of antecedent soil moisture on runoff and erosion, besides modeling the CN-SCS method for isolated rainfall events in a small-ephemeral watershed (1,03 ha). Data were collected from Nov/02 until April/03. Runoff was evaluated using a Parshall flume with an automatic water-sensor level, meteorological data were measured using a compact weather station, soil moisture at the depths of 20, 50, and 80 cm were measured by electrical-resistance sensors, and the level of water table, on the wetland area within the watershed, was monitored through piezometers. Runoff accounted only for 2.2% of the water balance, whereas evapotranspiration accounted for 51.6% of it. A logarithmic model relating water uptake by plants and soil moisture showed a critical value at the soil moisture close to 76% of field capacity. Runoff and erosion were strongly affected by the antecedent soil moisture, with a maximum value of relative soil moisture at 0.90. CN-SCS method did not produce good accuracy to estimate the runoff and peak discharge for individual rainfall events, resulting mean errors of 400% and 200%, respectively. The parameters of CN-SCS method showed high sensibility, meaning that they need some adjustment in order to be applied to individual rainfall events. Semi-conceptual models, based on rainfall characteristics and mean soil moisture on soil profile up to 80cm depth, were adjusted for initial abstraction, curve number, rising time, and ratio between falling time and rising time were applied to individual events, showing good accuracy. Those models can be reference for generating hydrological simulation models.

² Guidance Committee: José Maria de Lima – DCS/UFLA and Antônio Marciano da Silva – DEG/UFLA.

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO GERAL

A relação do homem com a natureza tem sido nas últimas décadas altamente perturbadora. A humanidade necessita de produção de alimentos e bens de consumo em escala cada vez maior e para isto é necessária a utilização incessante dos recursos naturais, em especial, o solo agrícola e os recursos hídricos. Esses últimos são responsáveis pelo funcionamento de toda a cadeia produtiva (industrial e agrícola) e também pela matriz energética de vários países, em especial o Brasil.

Para se ter uma idéia da importância do manejo adequado da água, o Brasil precisa urgentemente de um considerável aumento do Produto Interno Bruto (PIB), nos próximos anos, para geração de produção e empregos. Porém, tal aumento da atividade econômica se reflete em um consumo extraordinário de água, sendo necessária na indústria, na agricultura irrigada e, principalmente, na geração de energia, havendo possibilidade de um novo “apagão” em 2007.

Cabe aos cientistas buscar alternativas consistentes, seja desenvolvendo equipamentos mais eficientes para a indústria, agricultura e usinas hidrelétricas, ou desenvolvendo técnicas de manejo, no contexto ambiental, que permitam otimizar o uso dos recursos naturais, garantindo sua longevidade. É importante um manejo menos agressivo dos recursos naturais, em especial do solo e da água, assim como o entendimento do mecanismo pelo qual a natureza gerencia a interação solo-água e a dinâmica dessa última no meio ambiente e propor ações para o seu correto uso.

As atividades humanas ocorrem em microbacias hidrográficas (rurais e urbanas), com as unidades de produção inseridas nas mesmas. Tais atividades estão provocando alterações expressivas na dinâmica da água nas microbacias, levando à redução dos níveis dos corpos d'água pelo assoreamento, que é gerado

pela combinação de chuvas de elevada intensidade e manejo incorreto do solo, que facilita a ação erosiva. Uma série de outros problemas advindos desta cadeia de atividades mal planejadas, pode levar ao secamento completo de algumas bacias. Ao se analisar esta seqüência de ações percebe-se que, primeiramente, o produtor irá sentir falta de água para suas atividades, inclusive consumo próprio, iniciando pelas sub-bacias, as quais compõem uma bacia maior, que produz água para abastecimento de uma cidade, um distrito industrial ou mesmo geração de energia, afetando o desenvolvimento e a produção.

Este trabalho não tem a pretensão de resolver o problema de produção de água no Brasil, mesmo porque o objeto de estudo é uma pequena microbacia hidrográfica experimental sem importância econômica. Mas sua relevância científica é de grande valia pois representa a realidade típica das pequenas propriedades rurais brasileiras e especialmente sul mineiras, encontrando-se inclusive próxima a um reservatório de uma usina hidrelétrica de porte médio recentemente construída. Portanto, o entendimento da dinâmica da água na mesma é suporte para geração de conhecimento científico que se tomará prático à medida que outros trabalhos, embasados neste, tomarem-se realidade.

O primeiro capítulo traz uma consideração geral, destacando-se aspectos ligados à ciência hidrológica. No capítulo 2, intitulado *“Balanço hídrico e consumo de água pelas plantas associado à umidade do solo em microbacia hidrográfica de fluxo efêmero”* apresenta um trabalho no qual busca-se entender o ciclo hidrológico numa microbacia tipicamente de fluxo efêmero, algo que ainda não é explorado no Brasil. Estudou-se neste capítulo o comportamento do consumo de água pelas plantas da microbacia em função da umidade do solo, desenvolvendo uma metodologia para obtenção da umidade crítica a partir da qual as plantas começam a sofrer estresse hídrico.

O capítulo 3, *“Influência da umidade antecedente nas condições de escoamento superficial e erosão em microbacia hidrográfica de fluxo efêmero”*

gera um estudo qualitativo e quantitativo da forma como a umidade antecedente aos eventos de precipitação influenciam nas características do deflúvio, da hidrógrafa e da erosão. Este capítulo proporciona um aprofundamento do conhecimento da influência da profundidade do solo nas respostas hidrológicas (escoamento superficial). Desenvolveu-se, também, um modelo matemático que permite quantificar esta influência, ou seja, o modelo pode ser utilizado para, por exemplo, calcular como seria o comportamento do escoamento, para um mesmo evento de precipitação, baseado nas condições de umidade antecedente.

No capítulo 4, "*Aplicabilidade do Método CN-SCS a eventos isolados de precipitação em microbacia hidrográfica de fluxo efêmero*" busca-se verificar a aplicabilidade do método a eventos isolados de precipitação; estudar o comportamento de suas variáveis de entrada para uma precipitação isoladamente; e desenvolver um modelo físico-matemático dos parâmetros do método, com base nas condições de umidade antecedente e características da precipitação, possibilitando ao mesmo explicar o comportamento do deflúvio e da vazão de pico para uma dada precipitação na microbacia. A importância deste estudo está associada à possibilidade de aplicação deste método, bastante difundido na hidrologia, em modelos de simulação hidrológica, importantes para o correto manejo da água em microbacias e suporte para processos de Outorga do Uso da Água, subsidiando informações para seu ajuste a outras microbacias.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 O ciclo hidrológico

Em escala global, Tundisi (2003) e Silveira (2001) descrevem a quantidade total de água em cada um dos ambientes do planeta com os seguintes valores aproximados: oceanos ($1,35 \times 10^{18} \text{ m}^3$), geleiras ($2,5 \times 10^{16} \text{ m}^3$), águas subterrâneas ($8,4 \times 10^{15} \text{ m}^3$), rios e lagos ($2 \times 10^{14} \text{ m}^3$), biosfera ($6 \times 10^{11} \text{ m}^3$) e atmosfera ($1,3 \times 10^{13} \text{ m}^3$).

Até bem pouco tempo acreditava-se que o ciclo hidrológico global fosse fechado, ou seja, que não houvesse entrada ou saída de água do planeta. No entanto, descobriu-se que há pelo menos uma abertura no ciclo, onde se detectou entrada de água extra-terrestre na forma de “bolas de neve” de 20 a 40 toneladas, denominadas de “pequenos cometas”, os quais vaporizam-se ao atingir a atmosfera terrestre. Segundo Frank (1990), citado por Tundisi (2003) e Pielou (1998), este fenômeno acrescenta cerca de 3 trilhões de toneladas de água ao planeta a cada 10000 anos.

A dinâmica da água em bacias hidrográficas é marcada por vários componentes e fases. O componente de entrada do ciclo hidrológico é a precipitação, que pode ser chuva, granizo, orvalho, neve ou geada, sendo a chuva o elemento de maior peso, especialmente em regiões tropicais e subtropicais e, portanto, predominante nas discussões sobre o tema (Silveira, 2001; Mendonça, 2001; Watson & Burnett, 1995; Woolhiser & Brakensiek, 1982).

A chuva, ao atingir a superfície do solo, sofre dissipação, com uma parcela sendo retida pela cobertura vegetal, tão mais intensa quanto mais densa for a vegetação, outra parcela infiltra-se no solo, com o excedente escoando pela superfície. As plantas, juntamente com a própria superfície do solo, lagos e rios, transferem para a atmosfera grandes volumes de água na forma de vapor, sendo este componente conhecido pelo termo único evapotranspiração e corresponde a, aproximadamente, 50 a 60% do ciclo hidrológico (Righetto, 1998).

A parcela que infiltra no solo pode ser dividida em 2 componentes: um que irá drenar para os lençóis freático e artesianos, constituindo-se na recarga dos mesmos, sendo normalmente denominado pelo termo percolação (Machado, 2002) e outro, retido pela matriz do solo, sendo o reservatório de água disponível para as plantas, objeto freqüente de estudos, principalmente associados à irrigação (Libardi, 1995; Chancellor, 1994). Existem outros

componentes do ciclo que, na realidade, constituem parte dos já destacados, como o escoamento subsuperficial e a retenção pela cobertura vegetal e depressões no terreno (Chow et al., 1988). Estes componentes, porém, podem ser desprezados pela pequena parcela que representam no todo e pelo elevado custo experimental que demandam, tomando-se pouco práticos em estudos mais gerais.

O escoamento superficial é uma parcela importante da dinâmica da água numa microbacia hidrográfica. Deve-se destacar que o mesmo apresenta dois componentes: o escoamento superficial direto e o escoamento base, este em microbacias de fluxo perene (Tucci, 2001). O primeiro é provocado pelo excesso ou alta intensidade de precipitação, que ultrapassa a capacidade de infiltração do solo (Pruski et al., 2001). Esta parcela do ciclo pode ser danosa para o meio ambiente pois representa, além de perda de água, o risco de colapso em obras hidráulicas (Kraatz & Mahajan, 1982) e promovem o transporte de sedimentos pela erosão laminar, num primeiro estágio, e erosão em sulcos, que representam perda de solo fértil e insumos agrícolas, alterando inclusive, o ciclo biogeoquímico (Tiktak & Grinsuen, 1995; Lane & Nearing, 1989; Running & Coughlan, 1988). A parte associada ao escoamento base é essencial para manutenção e produção de água na microbacia, sendo um indicador ambiental da mesma, uma vez que reflete a qualidade do manejo do solo e da água empregado (Anido, 2002; Vörösmarty et al., 2000; Chahine, 1992). Analisa-se que manejos inadequados que levem a desmatamentos, compactação do solo, remoção e queima de palhada, preparo inadequado do solo e outros, provocam aumento da parcela do escoamento superficial direto, reduzindo portanto, a presença de água no solo e, conseqüentemente, a recarga de lençol freático e nascentes, podendo conduzi-la a um processo irreversível de seca dos cursos d'água, transformando uma bacia de fluxo perene em bacia de fluxo efêmero.

2.2 Microbacias hidrográficas

Microbacias hidrográficas são unidades físicas de estudo da ciência ambiental que devem ser consideradas e analisadas de acordo com o objetivo dos estudos. Não existe uma definição exata sobre o que se considera uma microbacia em termos de área e, portanto, o termo mais correto seria sub-bacia.

Os elementos que constituem uma microbacia hidrográfica influenciam diretamente as respostas aos eventos de precipitação, destacando-se, segundo Goldenfum (2001) e Righetto (1998), as suas unidades pedológicas, cobertura vegetal, características geomorfológicas (declividade, formato, área e rede de drenagem) e também as características geológicas (Resende et al., 1999). Isto ocorre porque o comportamento do ciclo hidrológico será definido por estas condições, sendo praticamente único em uma determinada microbacia.

Um dos grandes problemas em estudo numa microbacia é a elevada variabilidade espacial e temporal das características mencionadas e, por extensão, a dificuldade em se aplicar um modelo hidrológico a microbacias não monitoradas (Dolman et al., 2001). Segundo a Associação Internacional de Ciências Hidrológicas, um dos grandes desafios da hidrologia, especialmente em países em desenvolvimento, é a predição em bacias não monitoradas, que receberam a sigla, em inglês, PUB (*Prediction on Ungaged Basins*), destacando a importância da geração de modelos em regiões tropicais e subtropicais, haja vista o elevado custo para o monitoramento hidrológico. Além disto, são especialmente importantes estudos que tenham como objeto de análise microbacias de fluxo efêmero, cujo comportamento do ciclo hidrológico é consideravelmente diferente de microbacias perenes, segundo pesquisas recentes desenvolvidas na Austrália (Ye et al., 1997) e em Portugal (Croker et al., 2003). O termo efêmero refere-se à bacia cujo escoamento superficial somente ocorre durante ou logo após a precipitação, referindo-se ao escoamento superficial direto, comentado anteriormente (Silveira, 2001). A transformação do regime de

escoamento de perene em efêmero tem aumentado nos últimos anos, sendo normalmente ocasionada por atividades antrópicas mal planejadas, produzindo rebaixamentos, por vezes irreversíveis, do lençol freático junto às nascentes, impossibilitando seu fluxo natural e causando impacto de grande magnitude no ciclo hidrológico.

Um bom estudo hidrológico numa microbacia hidrográfica de pequenas dimensões deve ser realizado com dados monitorados com boa precisão onde se pode dominar todos os processos e seus condicionantes, especialmente os hidrológicos antecedentes. Busca-se, inicialmente, um laboratório com o mínimo de variabilidade possível, a partir da qual a dinâmica da água possa ser bem entendida e posteriormente modelada, para então adaptar e ou ajustar os parâmetros do modelo de acordo com as características de outras microbacias (Snorrason et al., 2002; Goldenfum, 2001; Dolman et al., 2001; Tucci, 1998;).

Goldenfum (2001), apoiado em outros trabalhos, define uma microbacia experimental como sendo área homogênea, ou o mais próximo possível desta situação, em termos de solo e vegetação. Isto é necessário para que as medições do ciclo hidrológico sejam as mais fidedignas possíveis, com redução de aspectos associados à variabilidade espacial. Não há definição de área, em termos dimensionais, desde que seus divisores sejam conhecidos, não podendo haver interferência de microbacias adjacentes na contribuição para o fluxo superficial.

2.3 Modelos hidrológicos

A ciência hidrológica é constituída por outras ciências, entre as quais a matemática e a estatística. Estas fornecem ferramentas fundamentais para o desenvolvimento de uma área da hidrologia extremamente importante e de ampla aplicação, a de modelagem matemática, cujo produto é a simulação de eventos hidrológicos.

Quintela & Portela (2002), Tucci (1998) e Fendrich (1984), com algumas diferenças de nomenclatura, dividem os modelos hidrológicos em determinísticos e não-determinísticos. Os primeiros são divididos em empíricos e fisicamente baseados no processo. Este último, Tucci (1998) chama de conceitual, dividindo-os em dois outros grupos: semiconceituais ou híbridos (ou determinístico-empírico na linguagem adotada por Fendrich (1984) e conceituais propriamente ditos (físicos). Na realidade, segundo este mesmo autor, não há nenhum modelo hidrológico que seja absolutamente físico, pois sempre há partes do modelo trabalhadas de forma empírica. Um modelo semi-conceitual é uma mescla entre as causas de um fenômeno e seu ajuste matemático, este normalmente feito por métodos estatísticos. Os modelos não-determinísticos são classificados em probabilísticos e estocásticos. Segundo Quintela & Portela (2002), os modelos não-determinísticos correspondem a 54% dos modelos hidrológicos, enquanto os determinísticos, os outros 46%.

Os modelos determinísticos visam à previsão hidrológica necessitando-se de variáveis de entrada condicionadoras do fenômeno e que, por meio de algoritmos desenvolvidos para solução matemática de equações, produzem uma saída, a qual se constitui na predição ou previsão do fenômeno hidrológico (Tucci, 1998). Quando se trabalha com um modelo determinístico conceitual, busca-se a estruturação de um modelo matemático que explique um fenômeno com base nas leis da física, gerando equações diferenciais parciais ou ordinárias, cuja solução, por vezes, baseia-se em técnicas cuja complexidade varia com a equação, podendo ser analítica ou numérica. Nestes modelos são necessários parâmetros físicos para sua estruturação e geração das condições de contorno (Spiegel, 1971). Modelos determinísticos semi-conceituais são estruturados com base em variáveis físicas que explicam o comportamento do fenômeno na natureza, porém, não se tem explicação física direta por meio de uma equação diferencial. Portanto, a parcela de empirismo está associada ao ajuste do modelo

matemático, que pode ser linear ou não-linear, sendo os parâmetros determinados por mínimos quadrados (regressão) no primeiro caso (Charnet et al., 1999) e técnicas numéricas de regressão múltipla, como Gauss-Newton, no segundo caso (Gallant, 1987).

Como exemplo de modelos hidrológicos determinísticos pode-se citar a equação de Richards para a modelagem do movimento de água e solutos no solo, sendo uma equação diferencial parcial, modelos de escoamento em rios e canais (equação da continuidade, por exemplo), modelos para o hidrograma unitário (equações de convolução, que são modelos lineares), modelos de previsão em tempo real (modelos semi-conceituais para o balanço hídrico), modelos chuva-vazão como SWAT (Soil and Water Assessment Tool), IPH I, II e III, Stanford e método CN-SCS (Curve Number – Soil Conservation Service) (esses últimos são uma combinação de modelos conceituais e empíricos, estruturados em parâmetros de entrada que explicam o fenômeno do escoamento superficial). Modelos de previsão de perda de solo como USLE (Universal Soil Loss Equation) e seus derivados (empírico) e WEPP (Water Erosion Prediction Project) (semi-conceitual) são outros exemplos de modelos importantes, especialmente por se tratar de interação entre a hidrologia e a conservação do solo. Um outro exemplo semi-conceitual, bastante difundido e usado, são modelos para cálculo da evapotranspiração potencial, como o de Penman, ou seja, um modelo determinístico, por considerar as variáveis físicas que interferem no fenômeno, mas empírico no ajuste matemático, pois se trata de um modelo não linear (Quintela & Portela, 2002; Soares & Almeida, 2001; Beven, 1989; Abbott et al., 1986).

Modelos não-determinísticos são aqueles em que se trabalha com séries históricas de dados, ajustando-se modelos de probabilidade aos mesmos, ou seja, “os dados falam por si só”, expressão usada por Clark (2002). Modelos típicos desta classificação são equações de chuvas intensas (observa-se que não há

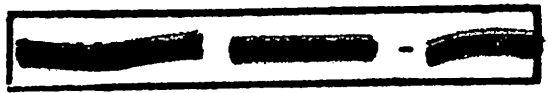
nenhum parâmetro físico que explique o comportamento dos valores da precipitação), análise de vazões, ajustando-se modelos probabilísticos como log-normal, Pearson tipo III, Weibull e outros, verificando sua adequacidade por meio de testes estatísticos, normalmente, Kolmogorov-Smirnov. Neste caso, são necessárias séries históricas consistentes ou representativas, com no mínimo 15 anos de registros (Bertoni & Tucci, 2001).

Uma das principais variáveis hidrológicas que condicionam o comportamento do escoamento superficial é a umidade antecedente do solo, não muito explorada nos modelos pelas dificuldades práticas de sua obtenção. Atualmente, porém, existem equipamentos que fornecem a umidade em tempo real, armazenando-a em um banco de dados, na profundidade desejada, com base na tecnologia da “Reflectometria do Domínio do Tempo” (TDR, em inglês), com um custo/benefício razoável, principalmente quando se trata do desenvolvimento de modelos para simulação hidrológica. É importante destacar também que a umidade pode ser obtida, da mesma forma anterior, por meio de imagens de satélite, disponibilizadas pela Internet. Isto mostra menor dificuldade para obtenção destes dados que podem ser utilizados como variável de entrada dos modelos de previsão hidrológica, melhorando consideravelmente a precisão dos mesmos.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Características morfométricas da microbacia

A microbacia hidrográfica experimental monitorada está localizada a 11 km da cidade de Lavras, sul de Minas Gerais, próxima ao Aproveitamento Hidrelétrico do Funil (AHF), entre as coordenadas UTM 496734E – 496834E e 7658285N – 7658440N, possuindo área de 1,03 ha, sendo 14% ocupada por eucalipto (*Eucalyptus grandis*), com idade aproximada de 7 anos, 76,1% ocupada por braquiária (*Brachiaria decumbens*), 3,6% por vegetação típica de várzea em



uma pequena área de surgência, no terço inferior de encosta e 6,3% de um remanescente de mata nativa. Na área de eucalipto constata-se também a existência de braquiária entre as árvores. Os solos da microbacia constituem-se de Cambissolo (CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico), em aproximadamente 80% da área, Podzólico Vermelho-Amarelo (ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico típico) em 10% e Gleí Pouco Húmico (GLEISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico) nos outros 10%. A microbacia não possui curso d'água perene e ou intermitente, sendo hidrologicamente caracterizada como de fluxo efêmero (Silveira, 2001). A declividade média da microbacia é de 17,44%, variando de 5,86 a 32,64%. O clima da região, pela classificação de Köppen, é uma transição Cwb para Cwa (Nimer, 1989). Na Figura 1 tem-se a localização da microbacia, com seus divisores de água, rede de drenagem, curvas de nível, uso atual e localização dos equipamentos de monitoramento hidrológico.

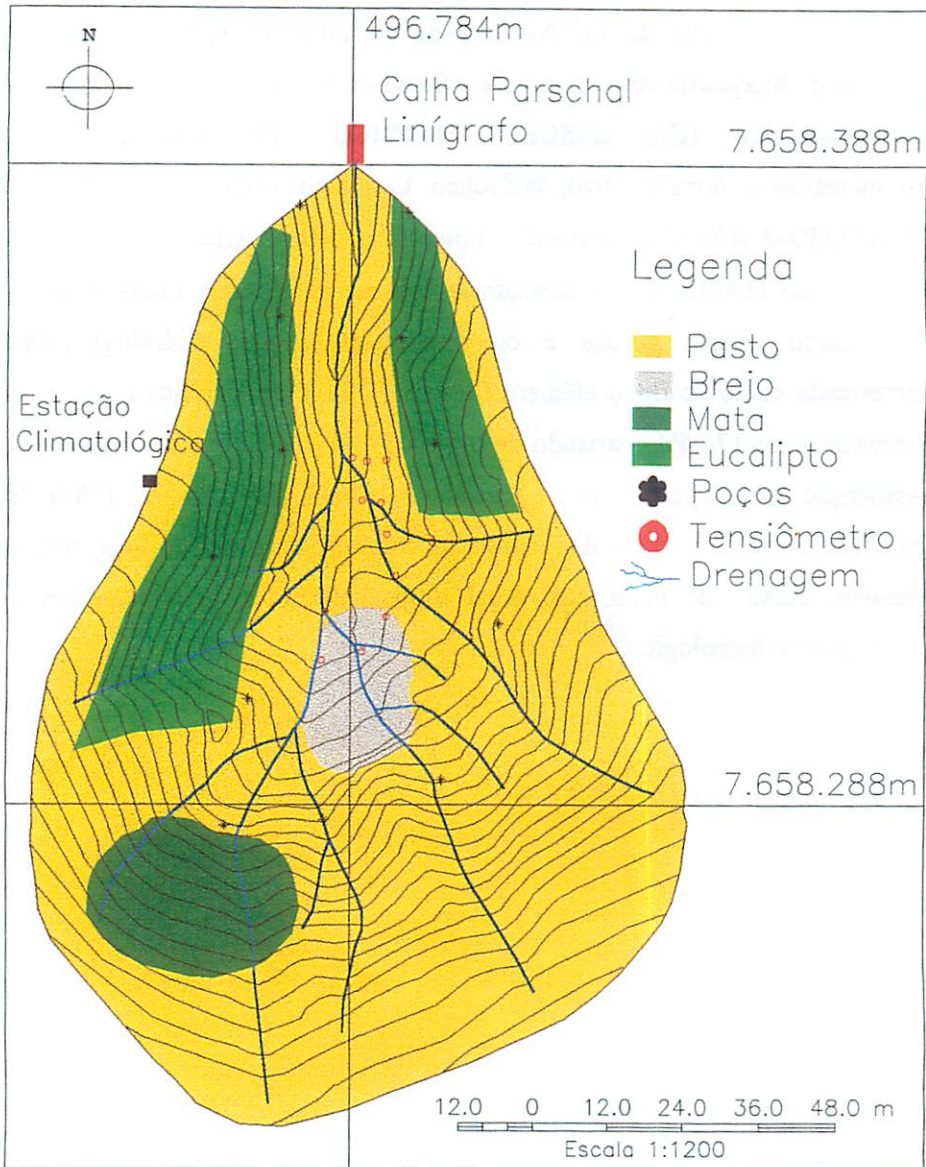


FIGURA 1. Mapa da microbacia hidrográfica monitorada com suas características morfométricas e equipamentos utilizados no monitoramento hidrológico.

3.2 Monitoramento hidrológico da microbacia

3.2.1 Dados climatológicos

Os dados climatológicos foram monitorados por uma Estação Meteorológica Compacta completa, da marca Davis, com fornecimento de energia por um painel solar, programada para obtenção dos dados meteorológicos a cada 10 minutos, com autonomia de memória, correspondente a este intervalo de leitura, de 7 dias. Os dados são descarregados por meio de computador portátil em programa específico da estação. Esta estação foi previamente testada e calibrada com dados do posto meteorológico do 5º Distrito de Meteorologia, localizado no campus da Universidade Federal de Lavras (UFLA), havendo boa aproximação dos resultados. Com os totais precipitados a cada 10 minutos foi construído o respectivo hietograma para o evento.

3.2.2 Escoamento superficial

O deflúvio superficial foi monitorado por meio de uma calha tipo Parshall, determinando-se a curva-chave da mesma com base em monitoramento direto da vazão com a correspondente lâmina, em canal hidráulico no Laboratório de Hidráulica da UFLA. No ponto de leitura da calha foi construído um poço tranquilizador para instalação de um linígrafo automático da marca Global Water, modelo WKL 15, programado para fornecer um nível d'água a cada 10 minutos. Da mesma forma, por meio de computador portátil, os dados foram descarregados na forma de planilha eletrônica e, posteriormente, construídas as hidrógrafas de cada evento, trabalhando-se com vazão e tempo, a partir da seguinte curva-chave:

$$Q = 2,21 \times H^{1,03} \quad (1)$$

Com $R^2 = 0,96$. Q obtido em $l\ s^{-1}$ e H em cm.

A partir das hidrógrafas, determinou-se o deflúvio total, em mm, pela regra dos Trapézios (Tucci, 2001). Com estas informações, calculou-se o índice ϕ para cada evento e com isto, as precipitações efetivas para os mesmos. O monitoramento dos dados foi feito no ano hidrológico 2002/2003, especificamente de novembro/02 a abril/03, num total de 30 eventos.

Os dados de erosão foram coletados mediante a instalação de 4 caixas coletoras à jusante da calha na seção de controle, conectadas por estruturas do tipo Geib, com 15 janelas cada. Com o material colhido das caixas, após homogeneização, obteve-se uma concentração média de sedimentos, em $g\ l^{-1}$, para cada evento, sendo extrapolado para o deflúvio total e área da microbacia, sendo trabalhado na forma de $kg\ ha^{-1}$. As Figuras 2 e 3 mostram, respectivamente, a estação meteorológica utilizada no trabalho e a calha, juntamente com as caixas coletoras, instaladas na seção de controle da microbacia hidrográfica.

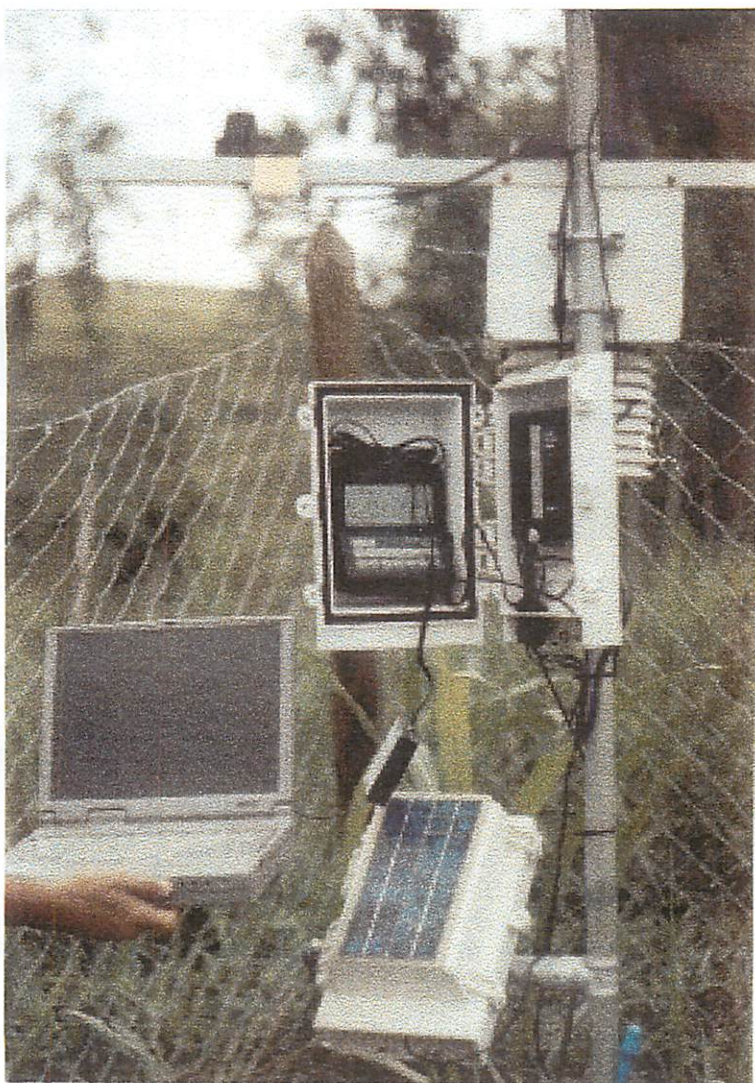


FIGURA 2. Estação climatológica compacta utilizada no monitoramento climatológico em microbacia hidrográfica da região de Lavras, MG, com seus detalhes de coletor de energia, dispositivos de leituras e descarregamento de dados.



FIGURA 3. Calha Parshall e caixas coletoras de sedimentos instaladas na seção de controle de microbacia hidrográfica da região de Lavras, MG, com detalhes do poço tranquilizador, deflúvio coletado e descarregamento dos dados.

3.3 Monitoramento da umidade do solo

Foram instalados blocos de resistência elétrica da marca *WaterMark* que fornecem leituras já convertidas em tensão matricial da água no solo (Irmak & Haman, 2001), em 12 pontos na microbacia, nas profundidades de 20, 50 e 80 cm, constituindo-se num grid aproximado de 20 x 100 m, ou seja, a cada 20 m uma bateria de blocos. Amostras em cada ponto e profundidade foram coletadas para determinação das respectivas curvas características (Figura 4) e alguns atributos do solo, para cada profundidade, nos Laboratórios de Física do Solo (DCS) e Relação Água-Solo-Planta (DEG) (Tabela 1).

TABELA 1. Atributos do solo dominante (Cambissolo) de uma microbacia hidrográfica da região de Lavras, MG.

Atributo (%)	0-20 cm	20-50 cm	50-80 cm
Areia	50,30	46,90	42,30
Argila	23,90	23,70	20,80
Silte	25,80	29,40	36,90
θ_s	49,90	47,60	45,50
θ_{cc}	40,10	38,00	36,70
θ_{PMP}	20,70	19,30	18,90
Micro*	13,80	14,20	13,40
Macro**	36,10	33,40	32,10
PT	49,90	47,60	45,50
MO	1,57	0,93	0,76

* Microporosidade; ** Macroporosidade; PT, porosidade total; θ_s , umidade volumétrica de saturação; θ_{cc} , umidade volumétrica à capacidade de campo; θ_{PMP} , umidade volumétrica correspondente ao ponto de murcha permanente (15 atm). A umidade correspondente à capacidade de campo foi determinada com base no ponto de inflexão da curva característica (Mello et al., 2002; Ferreira & Marcos, 1983).

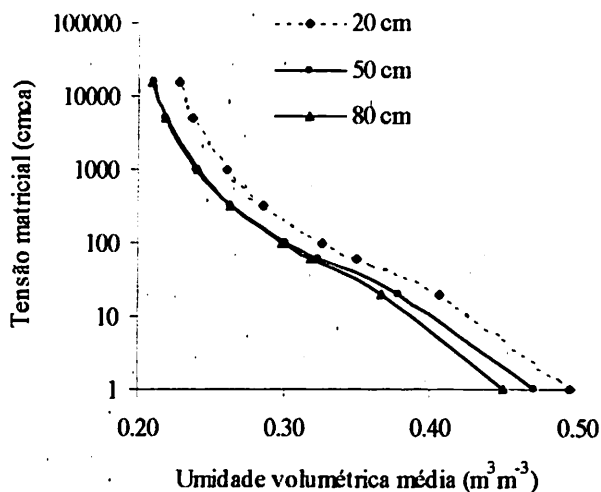


FIGURA 4. Curvas características médias para três profundidades do solo dominante em microbacia hidrográfica da região de Lavras, MG.

Os dados de tensão foram coletados a cada 2 dias e convertidos em umidade volumétrica, por meio das curvas características ajustadas, e transformados em umidade relativa segundo Brandes & Wilcox (2000), por esta expressar a ocupação do solo por água em relação ao máximo possível:

$$\theta_{rel.} = \frac{(\theta - \theta_r)}{(\theta_s - \theta_r)} \quad (2)$$

Em que θ_r é a umidade residual, θ_s , a umidade de saturação e θ , o valor de umidade num instante qualquer.

Foram construídos 12 poços de observação do lençol freático na área de surgência, que foram protegidos do escoamento superficial direto e das perdas diretas por evaporação. Estes dados foram coletados a cada semana, no período de abril/02 a março/03, medindo-se a profundidade do mesmo em relação à superfície.

A Figura 5 mostra as leituras dos tensiômetros por meio de *data logger* específico e os poços na área de surgência.

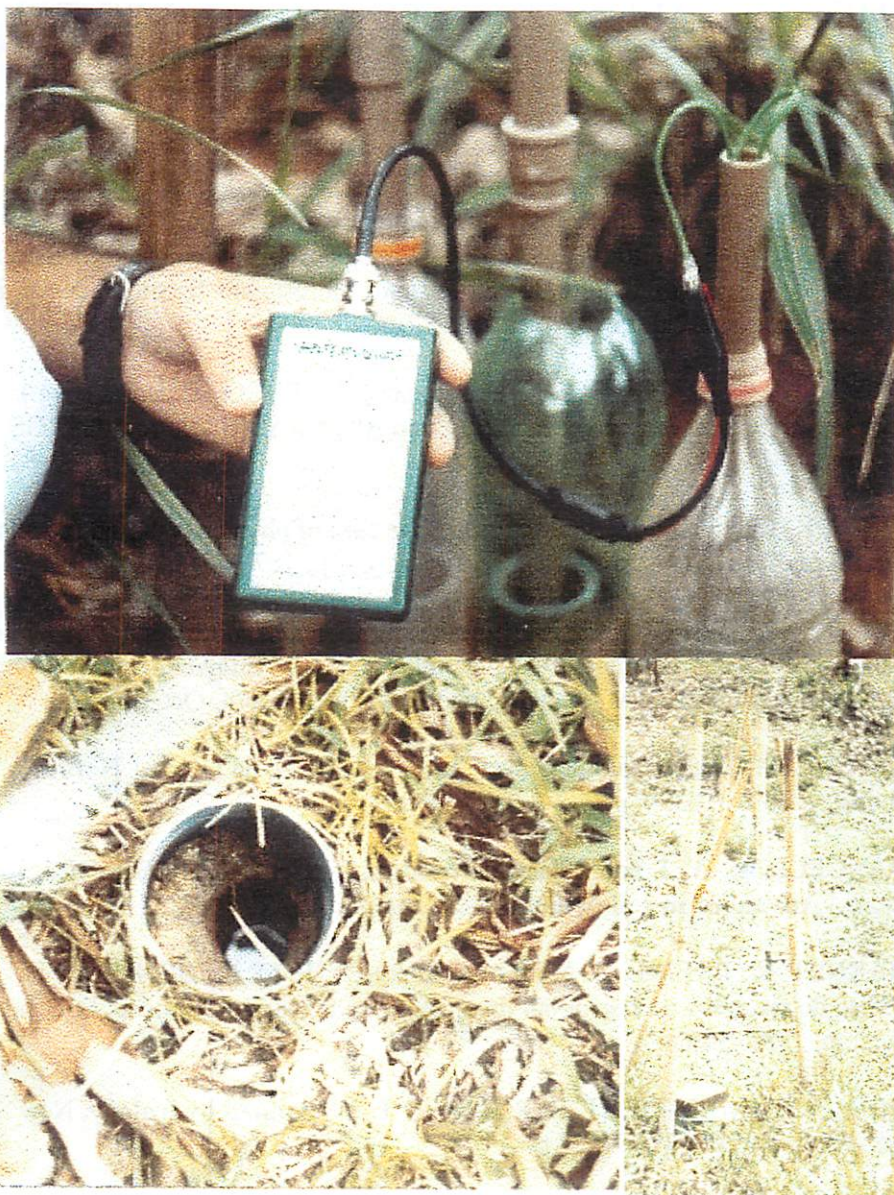


FIGURA 5. Bateria de sensores de umidade do solo, instalados em três profundidades com detalhe do *data logger* utilizado (acima) e poços na área de surgência (abaixo).

4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABBOTT, M. B.; BATHURST, J. C.; O'CONNELL, J. A.; RASMUSSEN, J.** An introduction to the European Hydrogeological System – Système Hydrologique Européen – SHE, 2. Structures of a physically-based distributed modelling system. *Journal of Hydrology*, Amsterdam, v. 87, n. ½, p. 61-77, Oct. 1986.
- ANIDO, N. M. R.** Caracterização hidrológica de uma microbacia experimental visando identificar indicadores de monitoramento ambiental. 2002. 69 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP.
- BERTONI, J. C.; TUCCI, C. E. M.** Precipitação. In: TUCCI, C. E. M. (Org.) *Hidrologia: ciência e aplicação*. 2. ed. Porto Alegre: ABRH/Editora UFRGS, 2001. p. 177-242.
- BEVEN, K.** Changing ideas in hydrology: the case of physically-based models. *Journal of Hydrology*, Amsterdam, v. 105, n. 1/2, p. 157-172, Jan. 1989.
- BRANDES, D.; WILCOX, B. P.** Evapotranspiration and soil moisture dynamics on a semiarid ponderosa pine hillslope. *Journal of the American Water Resources Association*, Middleburg, v. 36, n. 5, p. 965-974, Oct. 2000.
- CHAHINE, M.** The hydrological cycle and its influence on climate. *Nature*, London, v. 359, n. 6394, p. 373-379, Oct. 1992.
- CHANCELLOR, W. J.** Soil Physical properties. In: CHANCELLOR, W. J. (Coord.) *Advanced in soil dynamics*. St. Joseph: ASAE, 1994. p. 21-254.
- CHARNET, R.; FREIRE, C. A. D. L.; CHARNET, E. M. R.; BONVINO, H.** Análise de modelos de regressão linear com aplicações. Campinas: Editora da Unicamp, 1999. 356 p.
- CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W.** *Applied hydrology*. New York: McGraw-Hill, 1988. 572 p.
- CLARKE, R. T.** Stochastic hydrology revisited. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. Porto Alegre, v. 7, n. 4, p. 97-104, 2002.

CROKER, K. M.; YOUNG, A. R.; ZAIDMAN, M. D.; REES, H. G. Flow duration curve estimation in ephemeral catchments in Portugal. **Hydrological Science Journal**, Wallingford, v. 48, n. 3, p. 427-440, June 2003.

DOLMAN, A. J.; HALL, A. J.; KAVVAS, M. L.; OKI, T.; POMEROY, J. W. **Soil-vegetation-atmosphere transfer schemes and large-scale hydrological models**. Oxford: IAHS, 2001. 372 p.

FENDRICH, R. **Modelação de hidrogramas multi-modais**. 1984. 174 p. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, SP.

FERREIRA, M. M.; MARCOS, Z. Z. Estimativa da capacidade de campo de Latossolo Roxo distrófico e Regossolo através do ponto de inflexão da curva característica de umidade. **Ciência e Prática**, Lavras, v. 7, n. 1, p. 96-101, jan./jun. 1983.

GALLANT, A. R. **Non linear statistical models**. New York: J. Wiley, 1987. 610 p.

GOLDENFUM, J. A. Pequenas bacias hidrológicas: conceitos básicos. In: PAIVA, J. B.; PAIVA, E. M. C. D. **Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas**. Porto Alegre: ABRH, 2001. p. 3-14.

IRMAK, S.; HAMAN, D. Z. Performance of the Watermark Granular Matrix Sensor in sandy soils. **Applied Engineering in Agriculture**, St. Joseph, v. 17, n. 6, p. 787-796, Nov. 2001.

KRAATZ, D. B.; MAHAJAN, I. K. **Small hydraulic structures**. 2. ed. Roma: FAO/ONU, 1982. v. 2, 292 p.

LANE, L. J.; NEARING, M. A. (Ed.). **USDA – Water erosion prediction project: hillslope profile version documentation**. West Lafayette: NSERL, 1989. (Report 2).

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. Piracicaba: [S.n.], 1995. 497 p.

MACHADO, R. E. **Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento**. 2002. 152 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP.

MELLO, C. R. de; OLIVEIRA, G. C.; RESCK, D. V. S.; LIMA, J. M.; DIAS JUNIOR, M. S. Estimativa da capacidade de campo baseada no ponto de inflexão da curva característica. *Ciência e Agrotecnologia*, Lavras, v. 26, n. 4, p. 836-841, jul./ago. 2002.

MENDONÇA, A. S. Balanço hídrico. In: PAIVA, J. B. D.; PAIVA, E. M. C. D. (org.) *Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas*. Porto Alegre: ABRH, 2001. p. 165-168.

NIMER, E. *Climatologia do Brasil*. Rio de Janeiro: Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 1989. 421 p.

PIELOU, E. C. *Freshwater*. Chicago: The University of Chicago Press, 1998. 275 p.

PORTO, R. M. *Hidráulica básica*. São Carlos: EESC/USP, 1998. 540 p.

PRUSKI, F. F.; GRIEBELER, N. P.; SILVA, D. D. Comparação entre dois métodos para determinação do volume de escoamento superficial. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 25, n. 2, p. 403-410, abr./jun. 2001.

QUINTELA, A. C.; PORTELA, M. M. A modelação hidrológica em Portugal nos últimos 25 anos do século XX, nas perspectivas determinística, probabilística e estocástica. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Porto Alegre, v. 7, n. 4, p. 51-64, 2002.

RESENDE, M.; CURI, N.; REZENDE, S. B.; CORREA, G. F. *Pedologia: base para distinção de ambientes*. Viçosa: NEPUT, 1999. 338 p.

RIGHETTO, A. M. *Hidrologia e recursos hídricos*. São Carlos: EESC/USP, 1998. 840 p.

RUNNING, S. W.; COUGHLAN, J. C. A general model of forest ecosystem processes for regional applications I. hydrological balance, canopy gas exchange and primary production processes. *Ecological Modelling*, Amsterdam, v. 42, n. 2 p. 125-154, Aug. 1988.

SILVEIRA, A. L. L. A. Ciclo hidrológico e bacia hidrográfica. In: TUCCI, C. E. M. *Hidrologia: ciência e aplicação*. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS, 2001. p. 35-52.

SNORRASON, Á.; FINNSDÓTTIR, H. P.; MOSS, M. E. **The extremes of the extremes: extraordinary floods.** Oxford: IAHS, 2002. 394 p.

SOARES, J. V.; ALMEIDA, A. C. Modeling the water balance and soil water fluxes in a fast growing Eucalyptus plantation in Brazil. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 253, n. 1/4, p. 130-147, Nov. 2001.

SPIEGEL, M. R. **Advanced mathematics for engineers and scientists.** New York: McGraw-Hill, 1971. 407 p. Schaum's Outline Series.

TIKTAK, A.; GRINSVEN, H. J. M. van. Review of sixteen forest-soil-atmosphere models. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 83, n. 1/2, p. 35-53, Dec. 1995.

TUCCI, C. E. M. Escoamento superficial. In: TUCCI, C. E. M. (Org.) **Hidrologia: ciência e aplicação.** 2. ed. Porto Alegre: ABRH/Editora UFRGS, 2001. p. 391-441.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos.** Porto Alegre: Ed. Universidade, UFRGS, ABRH, 1998. 669 p.

TUNDISI, J. G. **Água no século XXI: enfrentando a escassez.** São Carlos: RiMa, IIE, 2003. 248 p.

VÖRÖSMARTY, C. J.; GREEN, P.; SALISBURY, J.; LAMMERS, R. B. Global water resources: vulnerability from climate change and population growth. **Science**, London, v. 289, n. 5477, p. 284-288, July 2000.

WATSON, I.; BURNETT, A. D. **Hydrology: an environmental approach.** Boca Raton: Lewis Publishers, 1995. 702 p.

WOOLHISER, D. A.; BRAKENSIEK, D. L. Hydrologic modeling of small watershed. In: HAAN, C. T.; JOHNSON, H. P.; BRAKENSIEK, D. L. **Hydrologic Modeling of Small Watersheds.** St. Joseph: ASAE, 1982. Cap. 1, p. 3-18.

YE, W.; BATES, B. C.; VINEY, N. R.; SIVAPALAN, M. Performance of conceptual rainfall-runoff models in low-yielding ephemeral catchments. **Water Resources Research**, Washington, v. 33, n. 1, p. 153-166, Jan. 1997.

CAPÍTULO 2

BALANÇO HÍDRICO E CONSUMO DE ÁGUA PELAS PLANTAS ASSOCIADO À UMIDADE DO SOLO EM MICROBACIA HIDROGRÁFICA COM REGIME DE ESCOAMENTO EFÊMERO

RESUMO

MELLO, Carlos Rogério de. Balanço hídrico e consumo de água pelas plantas associado à umidade do solo em microbacia hidrográfica com regime de escoamento efêmero. In: _____. **Estudo hidrológico em microbacia hidrográfica com regime de escoamento efêmero**, 2003, Cap.2, p.24 a 54. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) Universidade Federal de Lavras, Lavras – MG.³

O entendimento da dinâmica da água em microbacias hidrográficas é essencial para nortear ações de manejo, em especial para microbacias de escoamento efêmero, cujas informações são escassas. Objetiva-se com este trabalho ao estudo do balanço hídrico numa microbacia hidrográfica de escoamento efêmero na região de Lavras, MG, no período de outubro/02 a março/03, tendo como variável dependente a evapotranspiração e com estes valores, estudar o comportamento do consumo de água pelas plantas associado à umidade do solo. Os dados de precipitação foram monitorados por uma estação climatológica compacta, que forneceu informações meteorológicas necessárias ao cálculo da evapotranspiração potencial pelo método de Penman. O escoamento superficial foi monitorado através de uma calha tipo Parshall, com auxílio de um linígrafo automático. A variação do armazenamento de água no solo foi calculada com base numa camada de controle de 80 cm, instalando-se tensiômetros nas profundidades de 20, 50 e 80 cm. As leituras de umidade foram feitas a cada 2 dias, com o balanço hídrico seguindo este intervalo de tempo. A drenagem profunda foi considerada como sendo a porosidade drenável e para se ter uma avaliação comparativa da mesma, o lençol freático foi monitorado numa pequena área de surgência na microbacia. Constatou-se que o deflúvio superficial representou apenas 2,2% no balanço hidrológico, a evapotranspiração, 51,6% e a água no solo com 46,2%. Houve uma boa aderência entre a evapotranspiração real e a potencial, a partir de uma determinada umidade do solo, caracterizando a existência de uma umidade crítica para o consumo de água pelas plantas em nível potencial na microbacia. Esta umidade crítica foi, em termos de umidade relativa, de 0,340 para 20 cm de

³ Comitê Orientador: José Maria de Lima – DCS/UFLA (Orientador) e Antônio Marciano da Silva – DEG/UFLA (Co-orientador).

profundidade, 0,352 para 50 cm e 0,309 para 80 cm. Estes valores correspondem, em média, a 76% da umidade à capacidade de campo nesta camada do solo.

ABSTRACT

MELLO, Carlos Rogério de. Water balance and water uptake by plants associated with soil moisture in a small-ephemeral watershed. In: _____. **Hydrological study in small-ephemeral watershed**, 2003, Chap.2, p.24 to 54. Dissertation (Doctorate Program on Soil Science and Plant Nutrition) Federal University of Lavras, Lavras – MG⁴.

The dynamic of water accounts for most of the environmental behavior at small watersheds. Understanding these phenomena is essential toward management actions, especially in watersheds that are characterized by ephemeral water flow. The objective of this study was the water balance in a small ephemeral watershed in Lavras, Minas Gerais, Brazil and to use the evapotranspiration data calculated to study the relation between them and soil moisture. Meteorological data, including precipitation, were monitored by a compact weather station and used to calculate the potential evapotranspiration by the Penman method. Runoff was monitored through a Parshall flume using an automatic water-level sensor. Soil moisture was measured at 0-80cm depth, by tensiometers at 20, 50, and 80cm depth. Soil moisture and the water balance were evaluated every other day. Deep drainage was calculated using drainable porosity which was evaluated using the level of water table in a wetland area in the watershed. Runoff accounted for 2.2% of the water balance, whereas evapotranspiration accounted for 51.6%, and soil water (storage and deep drainage) accounted for 46.2%. The potential and real evapotranspiration ratio was closely related to relative soil moisture, above a given soil moisture that represented a critical value for water uptake by plants. The relative values of critical soil moisture were 0.340, at 20cm depth, 0.352, at 50cm depth, and 0.309 at 80cm depth. These values represent 76% of field capacity at the considered soils layer.

⁴ Guidance Committee: José Maria de Lima – UFLA, Antônio Marciano da Silva – UFLA.

1 INTRODUÇÃO

A questão dos recursos hídricos tem sido de importância ímpar nos dias atuais, no Brasil e no mundo, envolvendo governos, organizações não-governamentais (ONG^s), empresas privadas (indústrias e agroindústrias) e públicas, universidades e centros de pesquisa. No contexto conservacionista, a pesquisa científica, no que diz respeito ao entendimento do ciclo da água, ganha notória relevância, sendo fundamental para estabelecer estratégias de manejo em nível de microbacias hidrográficas.

Existe uma íntima relação entre a vida na Terra e o ciclo hidrológico, em que o comportamento deste último condiciona a existência do primeiro. Alterações mínimas podem ser imediatamente sentidas, não somente em características ambientais regionais, mas também no comportamento das espécies, uma vez que há profunda dependência das condições climáticas e, por consequência, da cadeia alimentar, em relação ao ciclo hidrológico (Chahine, 1992).

Estudos do ciclo hidrológico devem tomar como base a microbacia hidrográfica como unidade de pesquisa, pois esta funciona como um laboratório específico, que fornecerá dados comportamentais do ciclo da água em seus diversos componentes e fases, para subsidiar estudos em escala global. Assim, a microbacia hidrográfica deve fazer parte do desenvolvimento de modelos que visem ao entendimento da dinâmica da água, não só como geradora de dados, mas proporcionando condições para calibração dos modelos e fornecendo informações peculiares sobre a interação entre os fatores físicos, químicos, biológicos e climáticos da mesma (Xavier, 2002; Anido, 2002; Resende et al., 2003).

Desse contexto, emerge a importância do estudo do balanço hídrico, tendo-se como referência uma microbacia hidrográfica. Informações sobre estes

estudos, neste nível, são extremamente raras, mesmo em países desenvolvidos (Tucci & Beltrame, 2001). Estudos de comportamento da evapotranspiração, em microbacias hidrográficas, determinadas por balanço hídrico, são pouco observados e, quando existem, há simplificações consideráveis dos componentes do ciclo hidrológico, em especial da dinâmica da água no solo (Brandes & Wilcox, 2000).

As relações entre o consumo de água pelas plantas e as condições de umidade do solo ainda são incipientes sob condições tropicais e subtropicais em escala de microbacias. O conhecimento de um valor da umidade a partir da qual não há restrições ao consumo de água pela planta em nível de microbacias hidrográficas necessita de estudos, especialmente experimentais, para posterior modelagem (Soares & Almeida, 2001). Existem várias controvérsias a respeito do comportamento da relação entre a evapotranspiração real (ET_r) e a evapotranspiração potencial (ET_p) com a umidade do solo. Veihmeyer & Hendrickson (1955) relatam que este comportamento é exponencial a partir de uma determinada umidade, decrescendo até o ponto de murcha. Flint & Childs (1991), Giles et al. (1985) e Black (1979) determinaram em seus experimentos, comportamentos linear, não-linear e também exponencial. No entanto, Brandes & Wilcox (2000) sugerem que haja influência da cobertura vegetal neste comportamento e que a relação no intervalo entre o ponto de murcha permanente (PMP) e a umidade crítica pode ser explicada por diferentes funções matemáticas. Além deste aspecto, Chang (1971) cita que este comportamento é influenciado pelas características texturais do solo. A Figura 1 exemplifica a influência citada por Brandes & Wilcox (2000) e por Chang (1971).

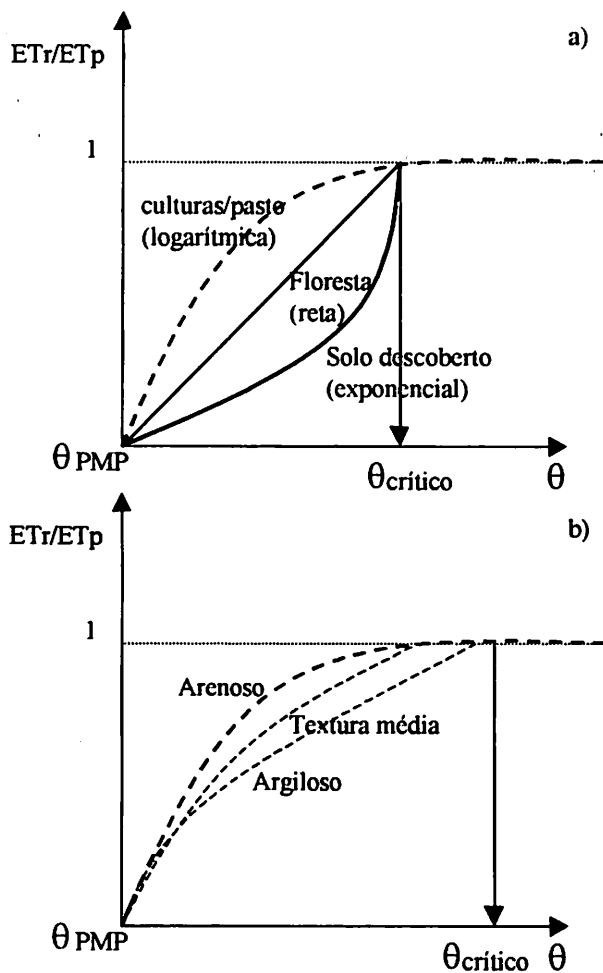


FIGURA 1. Relação entre evapotranspiração real (E_{Tr}) e evapotranspiração potencial (E_{Tp}) em função da umidade do solo (Brandes & Wilcox, 2000 (a), Chang, 1971 (b)).

Outra observação importante diz respeito ao fato de que mesmo em condições de umidade do solo abaixo da crítica, a evapotranspiração real pode ser igual à potencial, desde que as condições atmosféricas reinantes não exijam

elevado consumo de água pelas plantas, o que pode ser constatado em dias nublados (Klar, 1984; Saxton & McGuinness, 1982).

O monitoramento e posterior análise de microbacias hidrográficas tem sido pouco desenvolvido, apesar dos recentes avanços proporcionados, especialmente por empresas dos setores elétrico e florestal, contudo voltados para grandes bacias. Mais restritas ainda são informações a respeito do comportamento do ciclo hidrológico em microbacias caracterizadas como de escoamento efêmero, ou seja, aquelas em que somente há escoamento superficial durante ou imediatamente após as precipitações intensas (Silveira, 2001; Goldenfum, 2001; Ye et al., 1997). No Brasil, microbacias com estas características de escoamento têm aumentado nos últimos anos, fruto de manejos inadequados das mesmas, especialmente no tocante à conservação do solo e aproveitamento dos recursos hídricos.

Entender o comportamento dos componentes do ciclo hidrológico sob condições de escoamento efêmero será de importância única para nortear ações de manejo que sejam mais racionais, possibilitando melhor utilização dos recursos naturais, especialmente a água. Assim, objetiva-se com este estudo avaliar o comportamento do balanço hídrico, analisando seus componentes principais, em uma microbacia hidrográfica de escoamento efêmero, e identificar um modelo matemático representativo do comportamento da evapotranspiração em relação à umidade do solo na microbacia.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Evapotranspiração potencial

A evapotranspiração potencial foi calculada pelo método de Penman, ajustado com base em dados meteorológicos, por permitir maior precisão nos cálculos de balanço hídrico (Soares & Almeida, 2001). O método possui a seguinte formulação (Tucci, 1998):

$$ETp = \frac{\frac{\Delta}{\gamma} \cdot \frac{q_{ef}}{L} + E_i}{\frac{\Delta}{\gamma} + 1} \quad (1)$$

em que ETp é a evapotranspiração, em mm; $\frac{\Delta}{\gamma}$ é a relação entre a tangente à curva de pressão de saturação de vapor e a constante psicrométrica e pode ser calculada, com base na temperatura em °C, diretamente por:

$$\frac{\Delta}{\gamma} = \frac{38640 \cdot 10^{7,5T(237,3+T)}}{(237,3+T)^2} \quad (2)$$

O termo q_{ef} refere-se à radiação efetiva (líquida) da atmosfera e calculada por:

$$q_{ef} = \left[G \cdot (1 - a) - \sigma \cdot T^4 \cdot (0,56 - 0,09 \cdot e^{1/2}) \cdot (0,1 + 0,9 \cdot p) \right] \quad (3)$$

em que q_{ef} é obtido em mm, G é a radiação solar incidente (cal cm^{-2}), T a temperatura do ar (K), σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($1,19 \times 10^{-7} \text{ cal cm}^{-2}$) e a o albedo (adimensional), adotado um valor médio entre pastagem e floresta temporária igual a 0,15 (Tucci, 1998). Os valores de G foram fornecidos diretamente pela estação meteorológica na microbacia.

O termo E_i refere-se à evapotranspiração para condições isotérmicas sendo obtido por:

$$E_i = 0,35 \cdot \left(1 + \frac{w_2}{160} \right) \cdot (e_s - e_a) \quad (4)$$

em que w_2 é a velocidade média do vento em km h^{-1} , e_a , a tensão parcial de vapor de água, calculada por:

$$e_a = \frac{U \cdot e_s}{100} \quad (5)$$

em que U refere-se à umidade relativa média do ar, em %, e_s representa a tensão de vapor no ar saturado, obtido com base na temperatura em °C por:

$$e_s = 4,58 \cdot 10^{7,5 \cdot T / (237,3 + T)} \quad (6)$$

2.2 Balanço hídrico

O balanço hídrico consiste em uma contabilização de entradas e saídas de água numa determinada área, no caso específico, de uma microbacia hidrográfica. A equação abaixo é a base para a determinação do balanço hídrico:

$$P = E_{Tr} + D_p + ES + \Delta A \quad (7)$$

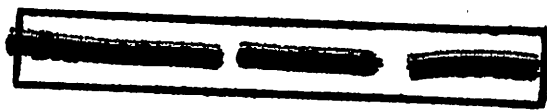
em que P é o total precipitado (mm), E_{Tr} é a evapotranspiração (mm), D_p drenagem profunda, abaixo de uma camada de controle do balanço hídrico (mm), ES, o escoamento total ou deflúvio superficial (mm) e ΔA , a variação do armazenamento de água no solo (mm). O intervalo de tempo das variáveis é adotado de acordo com o interesse e a disponibilidade dos dados.

A variação de armazenamento foi calculada entre uma leitura e outra das umidades, determinando-se o armazenamento de água para cada data, após extração da porosidade drenável (quando esta existiu), para cada camada monitorada, e a lâmina no perfil constituiu-se da soma dos armazenamentos:

$$A_t = \bar{\theta}_0 - 20 \times 200 + \bar{\theta}_{20-50} \times 300 + \bar{\theta}_{50-80} \times 300 \quad (8)$$

$$\Delta A = A_{t2} - A_{t1} \quad (9)$$

em que A_{t1} representa o armazenamento, em mm, na data $t1$; A_{t2} , representa o armazenamento na data $t2$; ΔA , corresponde à variação de armazenamento no período $t2-t1$. As umidades estão na forma volumétrica e são



as médias nos respectivos perfis (de 0 a 20 cm, adotou-se o valor da umidade a 20 cm; média de 20 e 50 cm; média de 50 e 80 cm). Assim, determinou-se uma variação de armazenamento em cada ponto na microbacia, calculando-se 12 valores. O valor contabilizado para o balanço hídrico foi a média aritmética dos dados.

Neste trabalho alguns componentes de pequeno peso e de difícil monitoramento, como interceptação vegetal, escoamento subsuperficial e capilaridade, não foram contabilizados. Foi considerada a profundidade de controle de 80 cm, pois reflete uma profundidade efetiva teórica média do solo da microbacia, fruto de sua cobertura vegetal. A drenagem profunda foi considerada como potencial, uma vez que foi determinada com base na porosidade drenável nas camadas monitoradas, conforme Machado (2002) e Mello et al. (2002). O intervalo de tempo utilizado foi determinado de acordo com o intervalo entre as leituras de umidade do solo, normalmente de 2 em 2 dias, com algumas exceções, não ultrapassando 4 dias, apresentando o balanço hídrico na forma mensal. As leituras dos poços na várzea foram feitas semanalmente, adotando-se o valor médio de 12 poços monitorados e espalhados na área.

A variável dependente foi a evapotranspiração, ficando a equação 7 da seguinte forma:

$$ETr = P - Dp - ES - \Delta A \quad (10)$$

A seguir, determinou-se a taxa média diária da evapotranspiração e da drenagem profunda uma vez que o intervalo de cálculo do balanço hídrico não foi fixo.

Na Figura 2 apresenta-se o comportamento de algumas variáveis climáticas caracterizadoras da evapotranspiração na microbacia no período de monitoramento do balanço hídrico, tendo-se na letra a, o comportamento da temperatura média diária e umidade relativa média diária e na letra b, a

velocidade média diária do vento. Estas informações são importantes para subsidiar as respostas hidrológicas obtidas na microbacia.

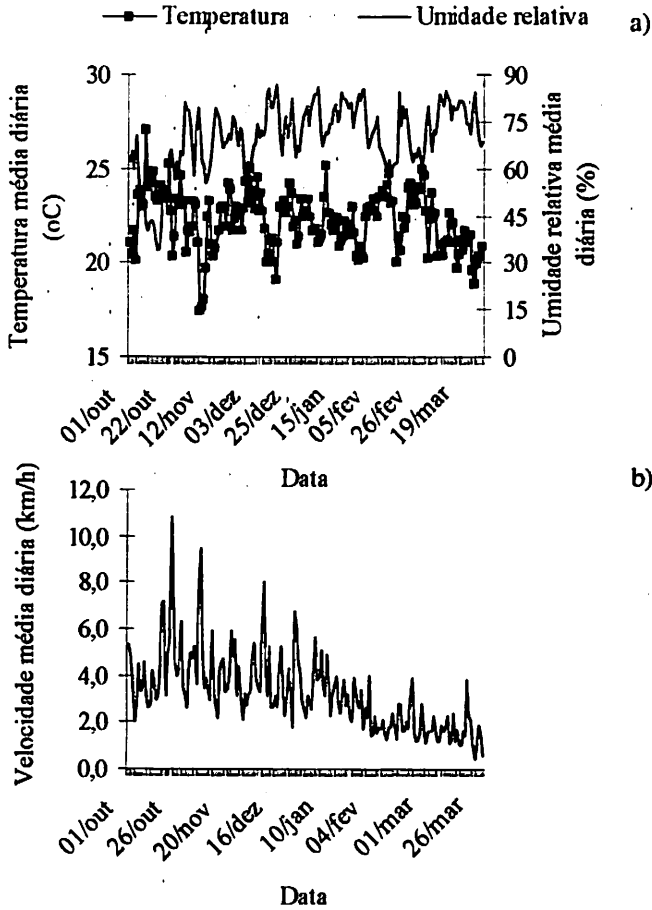


FIGURA 2. Variação de temperatura e umidade relativa do ar e da velocidade média do vento na microbacia hidrográfica durante o período de outubro/02 a março/03.

2.3 Relação entre evapotranspiração e umidade do solo

Por meio do balanço hídrico determinou-se a evapotranspiração real (ET_r) na microbacia e por meio de dados meteorológicos determinou-se a evapotranspiração potencial (ET_p). Em seguida, estas foram relacionadas, determinando-se um fator, o qual foi associado à umidade relativa média em cada profundidade monitorada. A umidade relativa foi adotada, pois, segundo Brandes & Wilcox (2000), esta reflete um percentual da disponibilidade máxima de água no solo, sendo de uso comum e indicada para este tipo de estudo. Esta umidade é calculada por:

$$\theta_{rel} = \frac{(\theta - \theta_r)}{(\theta_s - \theta_r)} \quad (11)$$

em que θ_r representa a umidade residual (ponto de murcha), θ_s , a umidade de saturação e θ , o valor de umidade num instante qualquer.

O procedimento para determinação de um modelo matemático representativo para o comportamento da relação ET_r/ET_p, em função da umidade do solo na microbacia e da umidade crítica, que diz respeito à umidade do solo mínima a partir da qual não há restrição de água para as plantas (Figura 1), foi o seguinte:

- a) primeiramente, plotaram-se os valores da relação ET_r/ET_p em função da umidade;
- b) por meio do gráfico, verificou-se a tendência de formação de um patamar, que é característico da existência da umidade crítica, conforme Figura 1;
- c) adotaram-se valores iniciais para a umidade crítica, no intervalo de 0,30 a 0,50 (0,30; 0,35; 0,40; 0,45; 0,50), extraindo-se as umidades superiores a estes valores. A seguir, ajustou-se um modelo linear ($y = a + bx$) e um logarítmico ($y = a \ln(x) + b$), conforme sugere a teoria comportamental destes dados, sendo a adoção destes modelos influenciada pelas características da cobertura vegetal da microbacia. Com base no melhor

- coeficiente de determinação obtido pelo ajuste considerando valores da umidade crítica, determinou-se a umidade crítica inicial;
- d) para os valores da relação superiores à umidade crítica inicial, adotou-se o valor médio representando uma reta paralela ao eixo X (este valor deve ser próximo de 1 para que os dados representem o comportamento esperado);
 - e) finalmente, a umidade crítica foi calculada com base no ponto de encontro das equações do item c, adotando-se a de melhor ajuste, com a reta do item d.
 - f) com base no melhor ajuste dos modelos do item c, concluiu-se a respeito do comportamento da evapotranspiração na microbacia, associado às características vegetais da mesma.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Comportamento do balanço hídrico e de seus componentes na microbacia

Na Tabela 1 apresenta-se o balanço hídrico mensal durante o período de análise de outubro/02 a março/03.

TABELA 1. Balanço hídrico mensal de monitoramento e análise para uma microbacia hidrográfica da região de Lavras, MG, durante o período de outubro/02 a março/03.

Mês	P	ES	ETr	Dp	ΔA
	----- mm -----				
Outubro	80,70	0,00	58,55	2,89	+19,26
Novembro	119,50	0,49	160,83	42,81	-84,63
Dezembro	224,30	1,66	82,39	119,15	+21,60
Janeiro	453,10	17,80	104,75	154,94	+175,61
Fevereiro	44,35	0,23	103,37	53,69	-112,95
Março	226,43	4,94	83,30	101,31	+36,88
Total	1148,88	25,12	593,19	474,79	+55,78

Primeiramente, tomando-se como base o total precipitado nos últimos 12 meses, medido de março/02 a março/03 na microbacia hidrográfica, igual a 1273,28 mm, observa-se que a precipitação no período de análise (out/02-mar/03) foi equivalente a 90,2% do total precipitado. Este fato mostra a elevada concentração pluviométrica nos meses de primavera e verão, sendo esta situação típica do clima Cwb, caracterizado para a região de estudo como transição Cwb-Cwa, da classificação de Köppen (Nimer, 1989). Ao se analisar o deflúvio total, observa-se que o mesmo é equivalente, em média, a apenas 2,2% do total precipitado no período, sendo que o mês de janeiro, apresenta um percentual consideravelmente superior, de 3,9%, ainda relativamente pequeno. No entanto, Ye et al. (1997), analisando dados de balanço hídrico em microbacias hidrográficas de escoamento efêmero na Austrália, mostraram que o deflúvio máximo e mínimo anual avaliados foram de 12,2% e 1,6%, respectivamente. O deflúvio com esta magnitude de valores é, portanto, típico de bacias de

escoamento efêmero, conforme concluiu os autores. Teoricamente, se houvesse curso d'água perene na microbacia, uma boa parte do total de drenagem faria parte do escoamento superficial, na forma de escoamento base, sendo o que normalmente ocorre em microbacias com escoamento perene. Nesta situação, são consideradas de alta capacidade de produção de água, conforme Anido (2002).

É importante destacar que ao se somar a drenagem potencial e o armazenamento de água no solo, chega-se à conclusão de que os mesmos correspondem a 46,2% do total precipitado. Contudo, a evapotranspiração real corresponde a 51,6% do total. Esta situação mostra que a água no solo é de extrema importância para o balanço hídrico em microbacias de escoamento efêmero, uma vez que representa um reservatório de água para consumo das plantas, sendo consideravelmente mais importante que o deflúvio em termos de manejo da microbacia. Além deste aspecto, microbacias com esta caracterização de escoamento são de suma importância ambiental, pois do total de água no solo, uma parcela irá drenar e abastecer nascentes em microbacias vizinhas. Neste estudo, boa parte do total de água no solo foi drenado para um pequeno reservatório que recebe contribuição de outras 2 microbacias de escoamento efêmero, o que garante o abastecimento de água na propriedade (Figura 3, capítulo 1). No entanto, não foi possível quantificar exatamente esta parcela de contribuição, devido à existência de outras microbacias que também drenam para o reservatório.

Ainda analisando-se os dados da Tabela 1, é interessante destacar os valores negativos da variação do armazenamento da água no solo na microbacia nos meses de novembro e fevereiro. Para o mês de novembro foi detectada uma elevada taxa de evapotranspiração, apesar do total precipitado estar próximo à média histórica para o mês na região. A concentração da maior parte da precipitação no início do mês (Figura 3) e as condições atmosféricas reinantes

(temperatura elevada, especialmente, Figura 2) foram amplamente favoráveis à evapotranspiração (Doorembos & Kassam, 1979). Para fevereiro, a situação foi proporcionada pela ocorrência de veranico, período no qual houve forte calor e baixa umidade relativa para o período, sem chuva nos primeiros 15 dias do mês. Esta situação é comum na região, conforme relata Cupolillo (1997), havendo considerável probabilidade de ocorrência de veranico nos meses de janeiro e fevereiro. No caso específico, no mês de fevereiro ocorreu uma precipitação de apenas 44,35 mm, quando a média histórica do mês é de 192,3 mm. Sendo assim, verifica-se uma elevada taxa de evapotranspiração, podendo, neste período, ocorrer sérios problemas de estresse hídrico nas plantas, dificultando sobremaneira o manejo da cobertura vegetal na microbacia. A considerável taxa de drenagem em fevereiro foi reflexo da elevada taxa de precipitação no mês de janeiro, produzindo alta umidade do solo e, por conseqüência, elevado potencial de drenagem, acumulado no mês de fevereiro.

O gráfico da Figura 3 apresenta o comportamento da precipitação e do deflúvio, durante o período de análise. Verifica-se que os eventos de escoamento superficial começaram a ocorrer no início do mês de novembro, intensificando-se em dezembro e atingindo o máximo no final de janeiro. Durante o mês de fevereiro ocorreu apenas um evento, próximo ao dia 18, voltando a apresentar concentração considerável em meados do mês de março. É importante destacar também que houve elevada concentração da precipitação entre os meses, de onde se observa que praticamente 40% do total precipitado no período ocorreu no mês de janeiro. Mesmo dentro dos meses, observa-se forte concentração de precipitação, quando em apenas um semana, verificou-se mais de 50% da precipitação de todo o mês de janeiro (próximo ao dia 18). Esta situação ocorreu também em dezembro, concentrando próximo ao dia 19, em fevereiro próximo ao dia 20, e também nos outros meses, conforme pode-se observar pela Figura 3. Assim, verifica-se que, apesar do total precipitado estar dentro do esperado, em

termos probabilísticos, há distribuição temporal irregular da chuva, mostrando haver normalidade do regime hídrico, o que não ocorre na prática. Esta elevada concentração implica em dificuldades consideráveis de manejo, pois há potencial para produção de erosão devido à elevada concentração do deflúvio, sendo reflexo do comportamento da precipitação (mais de 70% do deflúvio ocorreu em janeiro) e problemas com estresse hídrico, pois, há elevada evapotranspiração e drenagem, bem como pouca chuva.

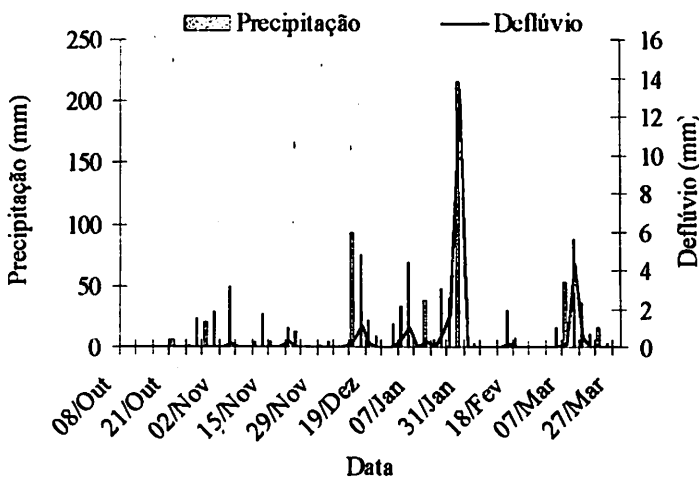


FIGURA 3. Comportamento da precipitação e do deflúvio em uma microbacia hidrográfica da região de Lavras, MG, no período de outubro/02 a março/03.

Na Figura 4, tem-se o comportamento da umidade do solo nas três profundidades monitoradas e da drenagem potencial durante o período de análise, além do comportamento do lençol freático em área de surgência do mesmo, na microbacia hidrográfica, durante o período de abril/02 a março/03.

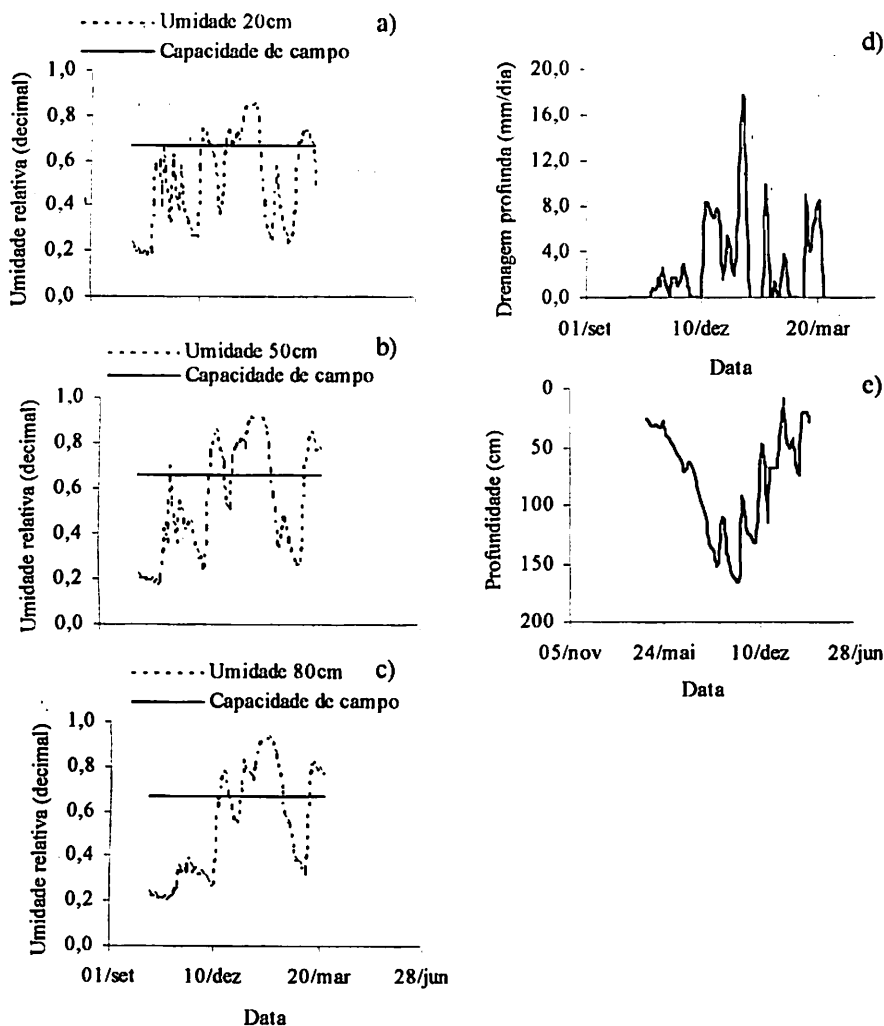


FIGURA 4. Umidade relativa do solo em três profundidades (a, b e c), drenagem potencial (d) e profundidade do lençol freático (e) em solo de uma microbacia hidrográfica da região de Lavras, MG.

Primeiramente, destaca-se a elevada oscilação da umidade a 20 cm em relação às demais profundidades, em especial a 80 cm. Isto ocorre devido a dois fatores essenciais: elevada ação evaporativa, por estar mais próximo à superfície,

e também, à maior densidade de raízes, aumentando a taxa de transpiração (Saxton & McGuinness, 1982). É possível observar um gradiente nesta oscilação até a profundidade de 80 cm. A influência do comportamento da umidade no balanço hídrico é verificado em vários aspectos, dentre os quais, no deflúvio, onde o mesmo se concentrou nos períodos em que a umidade estava muito elevada, facilitando o processo de escoamento (Figura 3 confrontada às letras a, b e c da Figura 4). Além deste aspecto, verifica-se elevada taxa de drenagem potencial (Figura 4d), especialmente próxima à data de 29 de janeiro, provocada por umidades consideravelmente altas, em boa parte do tempo superiores à capacidade de campo; caracterizando alta porosidade drenável (Figura 4a, b e c). Há elevada concentração de drenagem potencial nos meses de dezembro e janeiro, sendo esta informação importante em termos ambientais, uma vez que se verifica elevada recarga de lençol freático na área de surgência da microbacia, conforme Figura 4e, em que as menores profundidades do lençol foram verificadas neste período, caracterizando a maior disponibilidade de água. É possível observar que a maior porosidade drenável ocorreu próxima ao dia 29 de janeiro em todas as profundidades. Nesta data, o nível do lençol freático encontrava-se mais próximo da superfície. Esta situação é de grande importância para o manejo da microbacia, pois é indicador da qualidade ambiental da mesma, refletindo potenciais de produção de água e contaminação da mesma por lixiviação de produtos químicos comuns na agricultura, especialmente neste período na região.

Na Figura 5 apresenta-se o comportamento da taxa de evapotranspiração potencial e medida pelo balanço hídrico, ao longo do período de análise. É possível observar que as menores taxas de evapotranspiração ocorreram próximas ao dia 29 de janeiro, uma vez que o solo encontrava-se saturado e as condições climáticas, caracterizadas por temperaturas médias mais baixas, elevada umidade atmosférica e baixa velocidade do vento (Figura 2),

produziram este efeito fisiológico (baixo consumo de água) sobre as plantas na área da microbacia.

É importante destacar que no início do monitoramento (início de outubro) há uma diferença considerável entre os valores. Esta situação não é verificada, notadamente, a partir do mês de novembro, cujos dados praticamente se sobrepõem. Ao se confrontar o gráfico da Figura 5 aos de umidade da Figura 4, observa-se que é exatamente neste período que a umidade do solo começa a elevar-se, especialmente a 20 cm, seguida da profundidade de 50 cm. Além disto, entre 29/01 e 20/03 ocorreu redução da umidade, devido a veranico, havendo, concomitantemente, pequenos afastamentos entre ET_r e ET_p . Estas características mostram que a umidade do solo é um fator limitante à evapotranspiração e que existe um valor crítico a partir do qual o processo é atenuado.

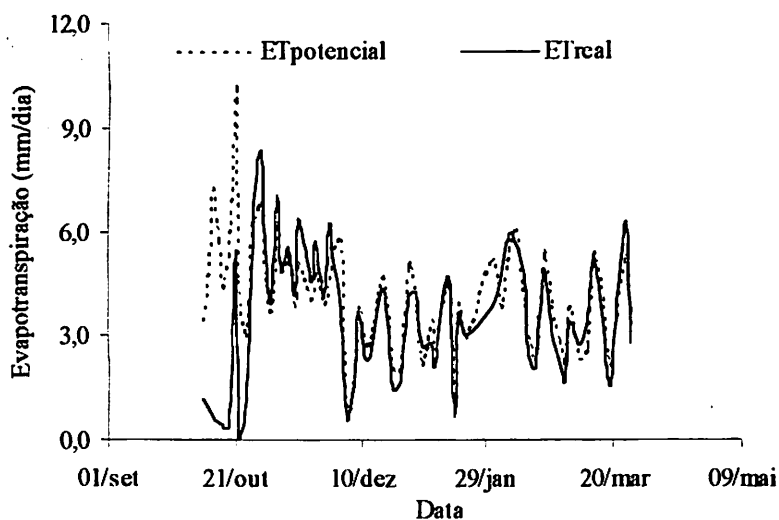


FIGURA 5. Evapotranspiração potencial e real em uma microbacia hidrográfica da região de Lavras, MG, no período de outubro/02 a março de /03.

3.2 Avaliação da relação entre a evapotranspiração e a umidade do solo

Na Figura 6 apresentam-se gráficos que associam a relação entre as evapotranspirações e a umidade a 20 cm, permitindo análise da umidade crítica a esta profundidade.

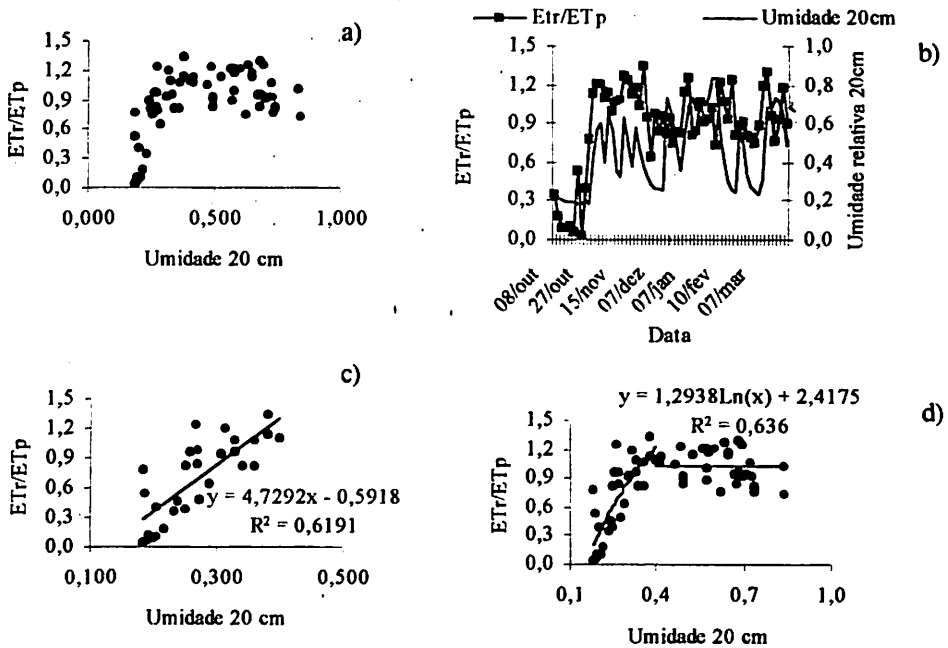


FIGURA 6. Comportamento da relação E_{Tr} e E_{Tp} em função da umidade relativa do solo a 20 cm de profundidade em uma microbacia hidrográfica da região de Lavras, MG.

Analisando-se a Figura 6a, observa-se a tendência de crescimento da relação entre a evapotranspiração real (E_{Tr}) e a potencial (E_{Tp}) com aumento da umidade relativa até o valor aproximado de 0,40, caracterizando a formação de um patamar a partir deste valor. Observa-se a manutenção de um valor próximo entre as evapotranspirações, oscilando de aproximadamente 0,74 a 1,29, à

medida que a umidade do solo aumenta. Avaliando a Figura 6b, verifica-se que quando a umidade do solo é superior a 0,40, a relação das evapotranspirações comporta-se como descrito anteriormente, ou seja, atinge um patamar, mantendo-se próximas entre si (relação próxima da umidade). O valor médio da relação ET_r/ET_p , a partir da umidade próxima da crítica, é de 1,02, com os dados produzindo coeficiente de variação de 16%. Estes resultados mostram que o comportamento da relação em função da umidade a 20 cm, obedece à teoria apresentada na Figura 1. É interessante notar também que a relação ET_r/ET_p acompanha a oscilação da umidade mesmo quando esta é superior a 0,40, isto é, verificam-se pequenos abaixamentos da relação quando a umidade diminui, mas dentro do intervalo destacado anteriormente. Observa-se que a umidade a 20 cm apresenta grande oscilação ao longo do tempo e somente a partir de novembro é que a mesma atinge valor próximo a 0,40. Em fevereiro há queda considerável da umidade, o que é acompanhado pela relação ET_r/ET_p , atingindo valores abaixo de 0,70. Isto mostra o elevado peso da umidade à profundidade de 20 cm no comportamento evapotranspirativo da microbacia, com as plantas apresentando sensibilidade ao abaixamento da umidade, mesmo quando esta é superior a 0,40.

As Figuras 6c e 6d representam os ajustes dos dados da relação entre as evapotranspirações e a umidade relativa a 20 cm, até o valor da umidade crítica. Conforme já destacado no tocante ao comportamento do ajuste em relação à cobertura vegetal, analisa-se que o modelo logaritmico apresenta um coeficiente de determinação ligeiramente superior, apesar de ambos os ajustes serem bastante próximos. Isto é reflexo da cobertura vegetal da microbacia, destacando-se que a mesma é coberta por pastagem (braquiária e vegetação da área de surgência) e floresta (eucalipto e mata nativa), com braquiária entre as árvores, estando portanto, de acordo com a teoria comportamental dos dados explicitada na Figura 1. O valor calculado para a umidade crítica, de acordo com

a metodologia adotada é igual a 0,340. Este valor, transformado para umidade volumétrica, corresponde a $0,306 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, o que está associado a uma tensão de 181,3 cmca. A esta profundidade, a umidade volumétrica associada à capacidade de campo é de $0,401 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (capítulo 1), mostrando a sensibilidade da cobertura vegetal da microbacia a abaixamento da umidade do solo, pois a umidade crítica corresponde a 76,3% da capacidade de campo. A umidade na qual a relação E_{Tr}/E_{Tp} é igual a zero (0), ou seja, quando as plantas deixam de consumir água, é aproximadamente igual a 0,182 ($0,260 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$).

Na Figura 7 tem-se o comportamento da relação E_{Tr}/E_{Tp} com a umidade relativa a 50 cm de profundidade.

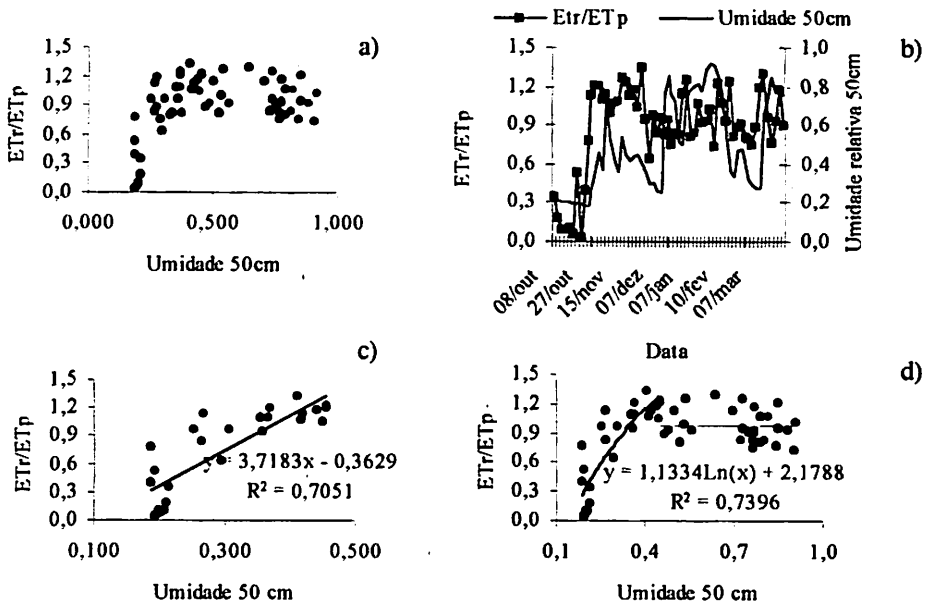


FIGURA 7. Comportamento da relação E_{Tr} e E_{Tp} em função da umidade relativa do solo a 50 cm de profundidade em microbacia hidrográfica na região de Lavras, MG.

A Figura 7a permite observar que o comportamento da relação das evapotranspirações associado à umidade na profundidade de 50 cm, mantém certa semelhança em relação à umidade a 20 cm, ou seja, observa-se tendência de formação de um patamar. No entanto, avalia-se que a umidade crítica a esta profundidade é ligeiramente superior à profundidade de 20 cm, encontrando-se, neste caso, valor inicial da região do patamar próximo a 0,45. Nota-se, também, na Figura 7b, menor oscilação em comparação à profundidade de 20 cm, conforme já comentado. Isto tem relação com as características da cobertura vegetal, principalmente pastagem, ou seja, à medida que se aumenta a profundidade, reduz-se a densidade de raízes. Os percentuais de matéria orgânica, calculados com base no teor de carbono (Capítulo 1), é um indicativo da densidade de raízes, uma vez que a vegetação na microbacia está presente a um longo tempo.

Similarmente à profundidade de 20 cm, verifica-se o mesmo intervalo de valores para a relação ET_r/ET_p a partir da umidade crítica, bem como baixo coeficiente de variação dos dados (17%) e um valor médio de 0,994, muito próximo de 1. O melhor modelo ajustado foi o logarítmico, em detrimento do linear, assim como na situação anterior, porém neste caso havendo uma diferença um pouco maior entre os coeficientes de determinação dos modelos (linear e logarítmico), além de melhores ajustes em comparação com aqueles realizados para a situação de profundidade de 20 cm. Trabalhando-se com o valor médio da relação e o modelo logarítmico, a umidade crítica a esta profundidade, é igual a 0,352. Esta umidade relativa corresponde à umidade volumétrica de $0,293 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e um potencial matricial de 138 cmca. A capacidade de campo a esta profundidade é de $0,380 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, mostrando a mesma característica apresentada para a profundidade de 20 cm, ou seja, a umidade crítica corresponde a 77,1% da capacidade de campo. A umidade na qual a

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANIDO, N. M. R. **Caracterização hidrológica de uma microbacia experimental visando identificar indicadores de monitoramento ambiental.** 2002. 69 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba.
- BLACK, T. A. Evapotranspiration from Douglas Fir Stands exposed to soil water deficits. **Water Resources Research**, Washington, v. 15, n. 1, p. 164-170, Feb. 1979.
- BRANDES, D.; WILCOX, B. P. Evapotranspiration and soil moisture dynamics on a semiarid ponderosa pine hillslope. **Journal of the American Water Resources Association**, Middleburg, v. 36, n. 5, p. 965-974, Oct. 2000.
- CHAHINE, M. The hydrological cycle and its influence on climate. **Nature**, Londres, v. 359, n. 6394, p. 373-379, Oct. 1992.
- CHANG, J. **Climate and agriculture: an ecological survey.** Chicago: Aldine Publ. Company, 1971. 296 p.
- CUPOLILLO, F. **Períodos de estiagem durante a estação chuvosa no estado de Minas Gerais: espacialização e aspectos dinâmicos relacionados.** 1997. 148 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.
- DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Yield response to water.** Roma: FAO/ONU, 1979. 306 p.
- FLINT, A. L.; CHILDS, S. W. Use of the Priestley-Taylor evaporation equation for soil water limited conditions in a small forest clearcut. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 56, n. 3/4, p. 247-260, Sept. 1991.
- GILES, D. G.; BLACK, T. A.; SPITTLEHOUSE, D. L. Determination of growing season soil water deficits on a forested slope using water balance analysis. **Canadian Journal Forest Research**, Ottawa, v. 15, n. 1, p. 107-114, Jan. 1985.
- GOLDENFUM, J. A. Pequenas bacias hidrológicas: conceitos básicos. In: PAIVA, J. B.; PAIVA, E. M. C. D. **Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas.** Porto Alegre: ABRH, 2001. Cap. 1, p. 3-14.

KLAR, A. E. *A água no sistema solo-planta-atmosfera*. São Paulo: Nobel, 1984. 408 p.

MACHADO, R. E. *Simulação de escoamento e produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento*. 2002. 152p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP.

MELLO, C. R.; OLIVEIRA, G. C.; FERREIRA, D. F.; LIMA, J. M. Predição da porosidade drenável e disponibilidade de água para Cambissolos da Microrregião Campos das Vertentes, MG. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 37, n. 9, p. 1319-1324, set. 2002.

NIMER, E. *Climatologia do Brasil*. Rio de Janeiro: Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 1989. 421 p.

RESENDE, M.; CURI, N.; REZENDE, S. B.; CORREA, G. F. *Pedologia: base para distinção de ambientes*. 5. ed. Viçosa: NEPUT, 2003. 338 p.

SAXTON, K. E.; McGUINNESS, J. L. Evapotranspiration. In: HAAN, C. T.; JOHNSON, H. P.; BRAKENSIEK, D. L. *Hydrologic Modeling of Small Watersheds*. St. Joseph: ASAE, 1982. Cap. 6, p. 229-276.

SILVEIRA, A. L. L. A. Ciclo hidrológico e bacia hidrográfica. In: TUCCI, C. E. M. *Hidrologia: ciência e aplicação*. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS, 2001. Cap. 2, p. 35-52.

SOARES, J. V.; ALMEIDA, A. C. Modeling the water balance and soil water fluxes in a fast growing Eucalyptus plantation in Brazil. *Journal of Hydrology*, Amsterdam, v. 253, n. 1/4, p. 130-147, Nov. 2001.

TUCCI, C. E. M. *Modelos hidrológicos*. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 1998. 669 p.

TUCCI, C. E. M.; BELTRAME, L. F. S. Evaporação e evapotranspiração. In: TUCCI, C. E. M. *Hidrologia: ciência e aplicação*. Porto Alegre: UFRGS, 2001. Cap. 7, p. 253-288.

VEIHMEYER, F. J.; HENDRICKSON, A. H. Does transpiration decrease as the soil moisture decreases? *Transactions of American Geophysical Union*, Washington, v. 36, p. 425-448, 1955.

XAVIER, A. C. Estimativa da dinâmica do índice de área foliar em uma microbacia hidrográfica por meio de técnicas de sensoriamento remoto. 2002. 111p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP.

YE, W.; BATES, B. C.; VINEY, N. R.; SIVAPALAN, M. Performance of conceptual rainfall-runoff models in low-yielding ephemeral catchments. **Water Resources Research**, Washington, v. 33, n. 1, p. 153-166, Jan. 1997.

CAPÍTULO 3

INFLUÊNCIA DA UMIDADE ANTECEDENTE DO SOLO NAS VARIÁVEIS DE ESCOAMENTO SUPERFICIAL E EROSÃO EM MICROBACIA HIDROGRÁFICA COM REGIME DE ESCOAMENTO EFÊMERO

RESUMO

MELLO, Carlos Rogério de. Influência da umidade antecedente do solo nas variáveis de escoamento superficial e erosão em microbacia hidrográfica com regime de escoamento efêmero. In: _____. **Estudo hidrológico em microbacia hidrográfica com regime de escoamento efêmero**, 2003, Cap.3, p. 55 a 78. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) Universidade Federal de Lavras, Lavras – MG.⁵

Processos hidrológicos em microbacias hidrográficas são importantes no contexto ambiental, subsidiando manejos voltados à conservação do solo e da água. A geração de escoamento superficial é regida por vários processos, destacando-se a umidade antecedente do solo. Este trabalho objetiva estudar qualitativa e quantitativamente a influência da umidade antecedente às precipitações no escoamento superficial e na erosão em uma microbacia hidrográfica com regime de escoamento efêmero. Foram construídos hietogramas e hidrógrafas, além de determinação da perda de solo e monitoramento da umidade do solo, em 3 profundidades (20, 50 e 80 cm) em 12 pontos na microbacia, trabalhando-se com a umidade relativa do solo, no período de nov/02 a abril/03. Variáveis do escoamento (razão de escoamento, deflúvio total, número da curva), da hidrógrafa (vazão de pico, tempo de ascensão, volume de ascensão, duração do escoamento, razão volume de ascensão e volume total) e perda de solo foram correlacionados às umidades em todas as profundidades e com a média no perfil do solo. Um modelo matemático para expressar a umidade relativa no perfil do solo em função das características da precipitação e do escoamento superficial foi desenvolvido para avaliação quantitativa, mostrando boa precisão. As correlações foram significativas para todas as variáveis estudadas, exceção do tempo de ascensão e da razão entre volumes da hidrógrafa, sendo que houve significância estatística a 1% de probabilidade, para razão de escoamento, número da curva e erosão. Pôde-se constatar aumento das correlações em profundidade, significando que no mínimo, a profundidade a 80 cm ou a média no perfil deve ser considerada nos

⁵ Comitê Orientador: José Maria de Lima – DCS/UFLA (Orientador) e Antônio Marciano da Silva – DEG/UFLA (Co-orientador).

modelos hidrológicos. Verificou-se que, quando a umidade relativa atinge um valor próximo a 0,90, esta não mais influencia os parâmetros hidrológicos.

ABSTRACT

MELLO, Carlos Rogério de. Influence of the antecedent soil moisture content about runoff and erosion on small-ephemeral watershed. In: _____. **Hydrological study in small-ephemeral watershed**, 2003, Chap.3, p. 55 to 78. Dissertation (Doctorate Program on Soil Science and Plant Nutrition) Federal University of Lavras, Lavras – MG⁶.

Hydrological processes at small watersheds level are important parameters, concerning conservation of natural resources, specially soil and water. Runoff is controlled by several hydrological parameters. Antecedent soil moisture is one of the most important parameter to be considered. The objective of this work was to evaluate the influence of antecedent soil moisture on the runoff and erosion of a small watershed. Precipitation hietograms, hydrographs, and erosion were analyzed, as well as the soil moisture at three depths (20, 50 and 80 cm) over twelve points in the watershed, shown as relative soil moisture, during the period between nov/02 and april/03. Runoff parameters (runoff ratio, total runoff, curve number), hydrograph parameters (peak discharge, time to peak, ascent volume of the hydrograph, runoff duration time, ratio between ascent volume and total volume of hydrograph) and erosion were correlated to the soil moisture for each depth and for profile mean soil. A mathematical model having the mean relative soil moisture as dependent variable, and precipitation and runoff parameters as independent variable was adjusted for quantitative evaluation, showing good accuracy. The correlation coefficients were significant for all variables, except for the time to peak and ratio between ascent volume of hydrograph and total volume of hydrograph, with statistic significance at level of 1% of probability for runoff ratio, curve number and erosion. The correlation coefficients were higher to soil moisture on layers more depth. This information means that soil moisture should be considered to 80 cm, at least, or the profile mean. When the relative soil moisture to be close value of 0,90, the hydrological parameters are not influenced by antecedent soil moisture.

⁶ Guidance Committee: José Maria de Lima – UFLA, Antônio Marciano da Silva – UFLA.

1 INTRODUÇÃO

A busca pelo entendimento dos componentes do ciclo hidrológico, em nível de microbacias hidrográficas, é essencial para nortear ações que visem ao manejo sustentável dos recursos naturais, notadamente solo, água e suas interações. A agricultura moderna exige produtividade cada vez maior, no entanto, é imprescindível que os recursos que lhe dão sustentação, sejam cientificamente compreendidos, a fim de fornecer subsídios técnicos suficientes para melhor utilizá-los e preservá-los.

No contexto do ciclo hidrológico destacam-se os processos físicos associados à produção de escoamento superficial e todas as conseqüências pertinentes ao mesmo, entre estas, a produção e transporte de sedimentos e a perda de água. Para geração do escoamento superficial existem inúmeras variáveis e atributos físicos que determinam o processo, destacando-se as características da precipitação e da capacidade de infiltração de água do solo (Bertoni & Tucci, 2001; Tucci, 2001; Righetto, 1998; Huggins & Burney, 1982).

A influência da precipitação nos processos ligados ao escoamento superficial já é bastante conhecida e aplicada, conforme se pode analisar em vários modelos de precipitação-vazão, desde os mais simples, como o método Racional e método CN-SCS (Curve-Number – Soil Conservation Service) até mais complexos, inclusive de simulação hidrológica, como Stanford IV (Crawford & Linsley, 1966), IPH (Tucci, 1998), Smap (Lopes et al., 1982, citado por Tucci, 1998) e vários outros. Em tais modelos, as variáveis de entrada contemplam a umidade do solo, sendo que esta variável tem ganhado cada vez mais importância na modelagem hidrológica (Quintela & Portela, 2002; Silveira et al., 2000; Tucci, 1998).

A importância da umidade do solo nos processos de geração de escoamento superficial é conhecida de maneira generalizada, fundamentada na influência desta nas características de infiltração, dada a sua relevância em

termos de potencial total da água no solo e, conseqüentemente, no seu deslocamento (infiltração ou ascensão) no perfil do solo. Esta situação é matematicamente explicada pelas equações que regem o fluxo de água no solo, em especial, a equação Richards (Dong et al., 2003; Sparovek et al., 2002; Libardi, 1995). Todo atributo que influencia a infiltração de água no solo, influencia também a geração de escoamento de maneira contrária. Sendo assim, soluções para a citada equação são incorporadas aos modelos de escoamento superficial.

A umidade do solo é importante não somente no total de escoamento superficial como também no comportamento do escoamento, no tocante à sua duração e vazões escoadas que poderão ocorrer. Este comportamento é expresso pelas hidrógrafas, as quais relacionam vazão escoada (ou lâmina) com o tempo (Braga, 2000; Fendrich, 1984).

A influência da umidade do solo no escoamento superficial é tratada nos modelos por meio de equações que descrevem a infiltração. Entretanto, ainda não há condições para se conhecer e predizer como a umidade antecedente ao escoamento pode influenciá-lo, bem como a perda de solo na microbacia hidrográfica. Alguns questionamentos podem ser feitos, tais como: até que profundidade é importante considerar a umidade antecedente; como será a resposta em uma microbacia hidrográfica, para um mesmo evento de precipitação, se os solos estiverem sob diferentes condições de umidade; em que época do período chuvoso a influência da umidade é mais sensível; se e como a umidade antecedente pode influenciar as vazões de pico (máximas) de uma hidrógrafa. Respostas para estas perguntas ainda não são possíveis com os modelos existentes. Tal conhecimento, a partir do monitoramento da umidade do solo, será bastante útil para previsões do comportamento hidrológico em microbacias hidrográficas.

Além do aspecto hidrológico do escoamento superficial, é igualmente importante analisar como a umidade antecedente pode influenciar a perda de solo na microbacia hidrográfica, possibilitando inferir, qualitativamente, sobre a influência da umidade na erodibilidade dos solos da mesma. El Swaify & Dangler (1977) relataram que a erodibilidade do solo é função, além dos atributos físico-químicos dos solos, das condições hidrológicas, notadamente, da umidade do solo. Portanto, para um mesmo evento de precipitação, mantendo todas as condições de manejo e cobertura vegetal da microbacia, diferenças em perdas de solo podem ser explicadas pelas condições hidrológicas reinantes.

Desta forma, objetiva-se com este trabalho, estudar de forma qualitativa e quantitativa a influência da umidade antecedente aos eventos de escoamento em uma microbacia hidrográfica, a fim de fornecer subsídios para melhor estruturação de modelos para predição do escoamento superficial e da erosão do solo.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Obtenção das variáveis de escoamento superficial

O fator C foi calculado pela relação entre a precipitação efetiva (deflúvio total) e a precipitação total, representando uma razão de escoamento. Os valores do Número da Curva (NC) foram calculados com base no método do Soil Conservation Service, do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (Huggins & Burney, 1982):

$$ES = \frac{(P - A_i)^2}{P - A_i + S} \quad (1)$$

$$S = \frac{25400}{NC} - 254 \quad (2)$$

em que ES é o deflúvio total (mm), P representa a precipitação total (mm), A_i , abstração inicial (mm) e S, o armazenamento potencial dos solos da

microbacia (mm). A abstração inicial foi determinada avaliando-se os hietogramas com as respectivas hidrógrafas, uma vez que esta é definida como sendo a parcela da precipitação ocorrida antes do início do escoamento superficial (Suarez, 1995). Assim, dispondo-se de ES, P e A_i , calculou-se o valor de S para cada evento com a equação 1. Com este valor e a equação 2, determinou-se a NC para evento. O tempo e o volume de ascensão da hidrógrafa, vazão de pico, duração do escoamento e razão entre volume de ascensão e volume total da hidrógrafa foram extraídos diretamente das hidrógrafas geradas pela microbacia.

2.2 Tratamento estatístico

Foram calculadas as umidades relativas médias antecedentes a cada evento de escoamento, de acordo com a última leitura feita antes dos mesmos, havendo no máximo 1 dia entre o escoamento e a umidade do solo. Para avaliação qualitativa da influência da umidade antecedente foram feitas correlações estatísticas, em níveis de significância de 1 e 5% pelo teste “t” de Student, entre variáveis associadas ao escoamento propriamente dito, às hidrógrafas e à erosão, com as umidades a 20, 50 e 80 cm e média no perfil. As variáveis estudadas foram a razão de escoamento (C), deflúvio de ascensão da hidrógrafa (V1), deflúvio total ou escoamento superficial (ES), vazão de pico (Qp), duração do escoamento (De), Número da Curva (NC), tempo de ascensão (ta), razão deflúvio de ascensão e deflúvio total da hidrógrafa (V1/ES) e erosão, em kg ha^{-1} . Além disto, foram construídos gráficos que mostram o comportamento das variáveis ao longo do tempo, permitindo avaliar com maior clareza o comportamento das mesmas em relação ao da umidade. Gráficos mostrando o comportamento da umidade antecedente em função das variáveis hidrológicas analisadas também foram gerados, para determinação do valor máximo de umidade antecedente que influencia no comportamento das mesmas.

Outras variáveis físicas monitoradas, diretamente relacionadas com o escoamento, como variação de armazenamento da água no solo, tensão da água no solo e porosidade drenável (drenagem potencial) foram utilizadas para reforçar a análise qualitativa.

Para avaliação quantitativa da umidade antecedente no comportamento do escoamento superficial, foi ajustado um modelo linear de regressão para explicar o comportamento do fator C em função das seguintes variáveis: características da precipitação (precipitação total, intensidade máxima de 10 minutos e duração), vazão de pico e umidade relativa antecedente média no perfil (0-80 cm). O modelo foi ajustado com auxílio de programa SAS for Windows (Statistical Analyses System, 1985), com a rotina "Proc Reg" e procedimento "Backward", o qual seleciona variáveis significativamente diferentes de zero (0) a um determinado nível de significância. Para avaliação da precisão do modelo, trabalhou-se com o coeficiente de determinação, significância estatística dos parâmetros das variáveis a 10% de probabilidade e os erros médio, máximo e mínimo dos dados utilizados no ajuste. Os erros foram calculados com base no seguinte procedimento:

$$e(\%) = \frac{|V_{\text{real}} - V_{\text{estimado}}|}{V_{\text{real}}} \times 100 \quad (3)$$

em que V_{real} e V_{estimado} são, respectivamente, o valor real e o valor estimado da umidade média no perfil do solo.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise qualitativa

Na Tabela 1 apresentam-se as correlações obtidas entre a umidade relativa em profundidade e média no perfil até 80 cm, antecedente aos eventos de escoamento superficial, com as principais características do escoamento

superficial (deflúvio), da hidrógrafa e da respectiva perda de solo, medidas na microbacia hidrográfica.

TABELA 1. Correlações entre umidade média relativa antecedente aos eventos de escoamento, em diferentes profundidades, com variáveis do escoamento superficial e perda de solo (erosão) em uma microbacia hidrográfica da região de Lavras, MG.

Variáveis	$\theta_{20\text{cm}}$	$\theta_{30\text{cm}}$	$\theta_{80\text{cm}}$	θ_{perfil}
C	0,571**	0,569**	0,679**	0,623**
V1	0,406*	0,439*	0,460*	0,446*
ES	0,437*	0,439*	0,520**	0,478*
Qp	0,421*	0,444*	0,497*	0,467*
De	0,356†	0,365*	0,446*	0,400*
NC	0,530**	0,480*	0,534**	0,530**
ta	-0,010 ^{ns}	-0,009 ^{ns}	-0,005 ^{ns}	-0,002 ^{ns}
V1/ES	-0,034 ^{ns}	-0,049 ^{ns}	-0,052 ^{ns}	-0,046 ^{ns}
Erosão	0,448*	0,456*	0,539**	0,493**

ns = não significativo; † = Significativo a 10%; * = Significativo a 5%; ** = Significativo a 1%.

Destaque-se que o fator C (razão de escoamento), o deflúvio total (ES) e o Número da Curva (NC) obtiveram as maiores correlações, em especial o fator C, que foi altamente significativo a 1% de probabilidade em todas as profundidades. É importante destacar, ainda, que a umidade correlacionou-se significativamente, a 5% de probabilidade, com as variáveis que caracterizam o comportamento das hidrógrafas, como volume de ascensão da hidrógrafa, a vazão de pico e duração do escoamento. Para tempo de ascensão e relação volume de ascensão e volume total da hidrógrafa, observa-se que não houve correlação significativa.

Estas correlações significativas e positivas da umidade com as variáveis do deflúvio e da hidrógrafa são explicadas pelo fato de que quanto maior a umidade antecedente do solo menor será sua capacidade de absorver água de precipitação e, conseqüentemente, maior o deflúvio. Com base no método do Número da Curva, observa-se que os valores de NC são função inversa do armazenamento potencial do solo (equação 2); este será tanto menor quanto maior o valor de NC. O reservatório potencial do solo será menor com o aumento de NC e a correlação positiva entre esta, e a umidade permite concluir que quanto maior a umidade do solo, maior a NC e menor o armazenamento potencial do solo. Esta situação provocará maiores escoamentos superficiais na microbacia, em todas as suas características.

Para se avaliar a influência da umidade antecedente no comportamento da vazão de pico, deve-se, primeiramente, avaliar os resultados da Tabela 2, os quais mostram as correlações entre a vazão de pico, associadas ao escoamento superficial e à precipitação. Isto é necessário, pois, fisicamente, há alguma dificuldade para se verificar tal influência, já que a umidade antecedente não se correlacionou significativamente com o tempo de ascensão e este, juntamente com o volume de ascensão da hidrógrafa (ou o deflúvio total), definem o valor da vazão de pico.


TABELA 2. Correlações entre vazão de pico e variáveis do escoamento superficial e da precipitação em microbacia hidrográfica da região de Lavras, MG.

	VI	ES	C	De	I ₁₀	Dc	I	ta
Qp	0,91**	0,93**	0,81**	0,78**	0,50**	0,44*	-0,006 ^{ns}	-0,39*

Dc = duração da chuva; I₁₀ = intensidade de precipitação de 10 minutos; I = intensidade média de precipitação.

Observa-se que a vazão de pico correlaciona-se fortemente com o volume de ascensão da hidrógrafa, com o deflúvio total, com o fator C e com a duração do escoamento. Além disto, há correlação significativa, a 1% de probabilidade, com a intensidade máxima de 10 minutos e com a duração da precipitação, a 5%. É interessante destacar, também, que a vazão de pico correlacionou-se, significativamente, a 5% de probabilidade e, negativamente, com o tempo de ascensão da hidrógrafa, refletindo uma situação física de que quanto menor ta maior a vazão de pico. Estas correlações mostram que o comportamento da vazão de pico é afetado tanto pelos fatores associados ao deflúvio quanto associados à precipitação. No entanto, destaca-se que as correlações com as variáveis do deflúvio foram bem mais significativas. Estas, por sua vez, produziram correlação altamente significativa com a umidade antecedente, conforme já destacado na Tabela 1, significando que há influência da umidade antecedente na vazão de pico. Isto também pode ser constatado diretamente pela sua correlação significativa (a 5%) com a umidade, reforçando ainda mais os comentários anteriores.

Avaliando-se ainda a Tabela 1, para verificação das correlações da erosão, constatam-se valores significativos e positivos entre esta e as umidades relativas tanto em profundidade quanto na média do perfil. Estes valores permitem analisar que quanto maior a umidade do solo maiores serão as suas perdas, mantendo-se fixas as principais variáveis causadoras de erosão. Isto se deve ao fato de que haverá maiores condições para produção de escoamento superficial e este é o mecanismo principal de transporte de sedimentos, além de ser produtor de erosão laminar e em sulcos, pois pode gerar tensões de cisalhamento capazes de desprender partículas do solo. Assim, é possível inferir que as condições antecedentes de umidade dos solos de uma microbacia são fatores de grande influência na erodibilidade dos solos, o que não vem sendo considerado nos modelos desenvolvidos para predição da erosão.



Além da análise da influência da umidade antecedente nos fatores de escoamento, uma avaliação direta da Tabela 1 permite verificar o quanto a profundidade do solo tem influência no processo. Observa-se que, para as correlações significativas, houve um aumento do coeficiente de correlação com a profundidade para todas as variáveis analisadas, exceção feita à variável NC, na qual a umidade antecedente à profundidade de 50 cm foi inferior a de 20 cm, mas ambas foram consideravelmente inferiores à umidade correspondente a 80 cm de profundidade. As correlações a esta profundidade foram superiores às demais para todas as variáveis analisadas. Esta situação ocorreu pela diferença de comportamento da umidade com a profundidade, em que se verifica maior oscilação da umidade quanto mais próximo da superfície. Além deste aspecto, detecta-se aumento de silte em profundidade, sendo esta uma característica do Cambissolo, a qual influi na retenção de água pelo solo, resultando num comportamento diferencial da umidade. Verifica-se que é importante considerar a profundidade a 80 cm ou a média no perfil para se estudar o comportamento do escoamento superficial, bem como da perda de solo. É possível verificar que houve, para erosão, aumento da correlação em profundidade e neste caso, especificamente, aumento inclusive da significância. Não foi possível detectar a profundidade a partir da qual não há mais significância estatística e por conseqüência, influência no processo de escoamento superficial, uma vez que houve aumento da correlação com a profundidade e não se dispõe de monitoramento a profundidades superiores a 80 cm. Na Figura 1 observa-se o comportamento das variáveis estudadas correlacionadas significativamente com a umidade antecedente ao longo do período de análise.

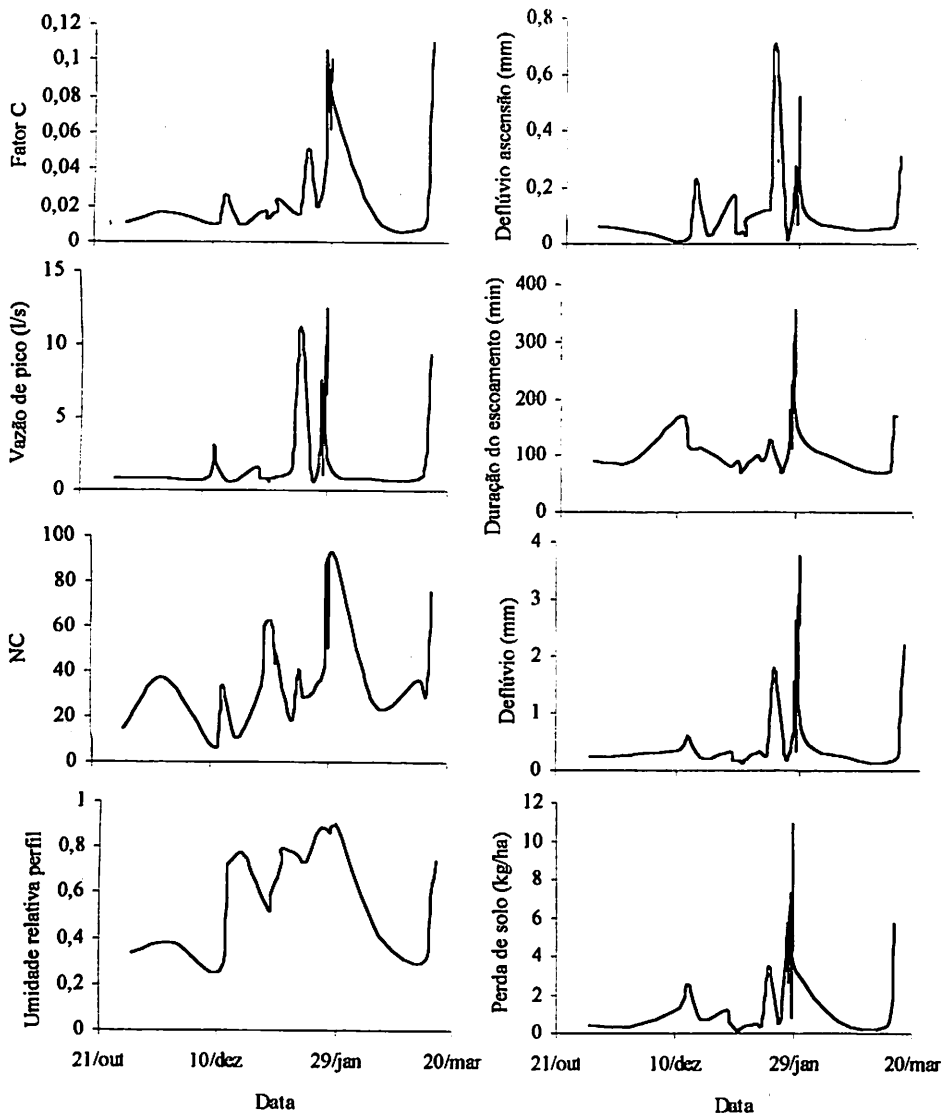


FIGURA 1. Comportamento das variáveis de escoamento superficial, da perda de solo e da umidade média relativa do perfil do solo ao longo do tempo em uma microbacia hidrográfica da região de Lavras, MG.

Primeiramente, é possível verificar comportamento semelhante das variáveis sob influência da umidade, notando-se, precisamente, de que forma a umidade antecedente influencia nas variáveis.

Ao se analisar o fator C (Figura 1), observa-se que os valores máximos ocorreram quando a umidade relativa antecedente ficou próxima a 0,90, sendo este o valor máximo atingido pela umidade. Onde houve abaixamento da umidade, como entre 29/01 e próximo a 20/03, houve uma resposta imediata do fator C e de todas as demais variáveis. Os maiores valores do deflúvio, bem como da perda de solo, foram alcançados no intervalo de tempo em que a umidade antecedente foi mais elevada, da mesma forma que o fator C.

Outra observação importante, associada à Figura 1, é com relação à forma como a umidade antecedente atua, ou seja, quando está muito baixa, verifica-se uma resposta mais contundente das variáveis, significando que, no início do período chuvoso e após situações de veranicos, detecta-se maior influência da umidade antecedente no comportamento do escoamento e por conseqüência, na perda de solo. Quando a umidade tende a ser aproximadamente constante, verificada entre meados do período de 10/12 a 29/01, até 29/01 e final do período entre 29/01 e 20/03, pode-se ver uma resposta de menor magnitude do escoamento, detectando-se menor influência da umidade no processo.

É possível verificar oscilação considerável do número da curva, o que pode significar maior sensibilidade desta variável a pequenas alterações da umidade. Isto não é verificado com a mesma magnitude para as demais variáveis. Na realidade, os valores de NC são obtidos a partir do armazenamento potencial do solo e este é função, além da precipitação e do deflúvio, da abstração inicial da precipitação que apresenta alta variabilidade natural.

Na Figura 2 apresenta-se o comportamento de variáveis associadas à umidade e, por conseqüência, ao escoamento superficial, bem como da umidade antecedente, em função do tempo. Na Figura 2a, pode-se observar que mais de

90% das recargas de lençol freático ocorreram entre os dias 10/12 e 29/01, correspondentes ao período em que a umidade antecedente média do solo é bastante superior à capacidade de campo, conforme Figura 2d, produzindo uma alta porosidade drenável. Analisando-se a variação do armazenamento de água no solo, na Figura 2b, observa-se os maiores valores positivos no período de 10/12 a meados de 29/01 e 20/03, período este de maiores umidades relativas, acima da capacidade de campo. A variação positiva do armazenamento nos períodos de 21/10 a 10/12 e próximo a 20/03 se deve à baixa umidade do solo neste período, onde a maior parte das precipitações provoca apenas aumento de umidade do solo, não havendo condições para produção de escoamento superficial e, conseqüentemente, erosão. Pelo fato da umidade do solo estar baixa, qualquer pequena entrada de água provocará variação positiva. Estas observações são importantes na medida em que refletem a capacidade de absorção de água pelo solo e, conseqüentemente, influenciam nas características do escoamento superficial, ou seja, quando há maior drenagem subterrânea juntamente com variação positiva do armazenamento, ambos provocados por alta umidade antecedente, há maiores deflúvios, perdas de solo, vazões de pico e duração do escoamento. É exatamente este comportamento que se observa do escoamento superficial e da erosão na Figura 1, nos intervalos de tempo destacados.

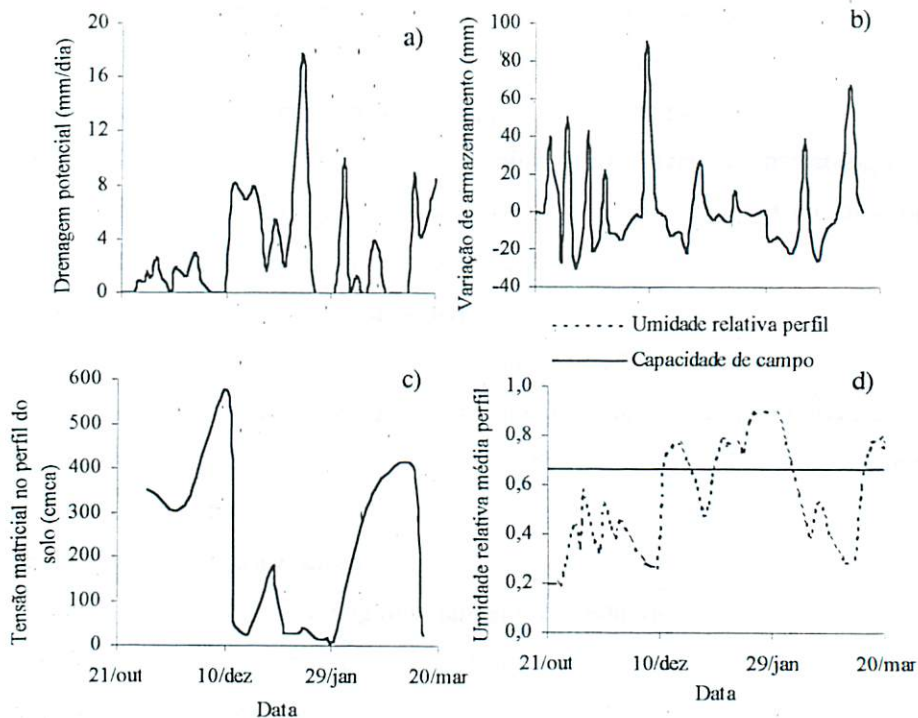


FIGURA 2. Comportamento da recarga do lençol freático (a), variação de armazenamento de água no solo (b), tensão matricial de água no solo (c) e umidade relativa no perfil do solo (d) ao longo do tempo em uma microbacia hidrográfica da região de Lavras, MG.

Ao se analisar a Figura 2c, constatam-se menores tensões de água no solo, logicamente, no período de maior umidade do solo (10/12 a 29/01). Assim, de acordo com a equação de Darcy-Buckingham ($\vec{q} = -K(\theta)\vec{\nabla}\phi_{TOTAL}(\theta)$), ocorrerá redução da densidade de fluxo da água no solo, devido ao menor gradiente do potencial matricial e por consequência do potencial total. Isto acarretará numa menor velocidade de infiltração, haja vista que esta diminui à medida em que a umidade aumenta, pois é definida como $v = q/\theta$, e se desloca

do maior para o menor potencial total. Desta forma, a parcela do ciclo hidrológico correspondente à infiltração será menor e, conseqüentemente, o escoamento será maior.

Na Figura 3 pode-se observar o comportamento da umidade relativa antecedente no perfil do solo em função das variáveis associadas ao escoamento superficial, à hidrógrafa e à perda de solo.

Observa-se comportamento semelhante para as variáveis vazão de pico, volume de ascensão da hidrógrafa, deflúvio total, duração do escoamento, fator C e perda de solo. Este padrão de comportamento está associado ao aumento da umidade em proporção bastante superior ao aumento das variáveis, ou seja, a umidade aumenta, praticamente em todos os casos, de 0,20 a 0,90, correspondendo a acréscimo de 70% da umidade, enquanto que ocorrem aumentos bem menos expressivos das variáveis. Isto significa que a umidade antecedente aos eventos de escoamento têm grande influência quando o solo está anteriormente mais seco, uma vez que quando a umidade atinge o valor aproximado de 0,90 (90% da capacidade máxima de água no solo), as variáveis continuaram a crescer mesmo sem aumento de umidade, isto é, quando o solo atinge este nível de umidade, outros fatores, tais como a precipitação e as características fisiográficas da microbacia, são mais importantes para determinar o comportamento do escoamento superficial e, conseqüentemente, das hidrógrafas e da perda de solo.

Para a variável NC, houve uma maior sensibilidade, conforme já destacado. É possível verificar que o aumento dos valores de NC são superiores, em termos proporcionais, ao aumento das outras variáveis. Verifica-se que a NC sai de um valor próximo a 10 e atinge um valor acima de 50, quando a umidade é de 0,90. Nota-se que o valor máximo da NC está em torno de 90, mostrando substancial aumento da NC, quando comparada às outras variáveis, para um mesmo aumento de umidade.

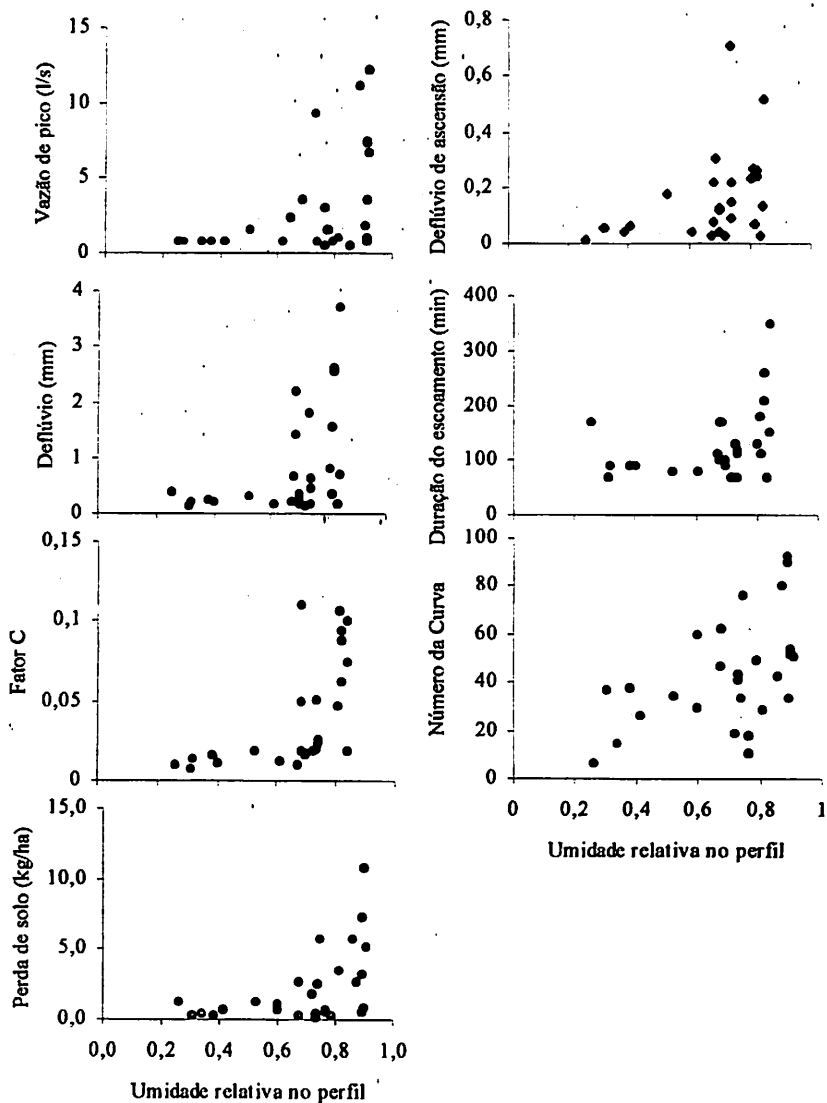


FIGURA 3. Relação entre as variáveis associadas ao escoamento superficial, hidrógrafa e perda de solo e à umidade relativa antecedente no perfil do solo da microbacia hidrográfica da região de Lavras, MG.

3.2 Análise quantitativa

Apresenta-se a seguir o modelo matemático ajustado para estimar o fator C (razão de escoamento) em função das variáveis vazão de pico, umidade relativa média antecedente no perfil do solo e características da precipitação. Do ponto de vista da precisão do modelo, pode-se observar que suas características estatísticas, dadas pelo coeficiente de determinação, significância estatística e erro médio, apresentados na Tabela 3, permitem analisar que o modelo pode ser aplicado para descrever o comportamento do deflúvio em função das variáveis destacadas, devido à boa qualidade das mesmas. A Figura 4 demonstra este comportamento, com pequena dispersão dos pontos ao redor da reta 1:1, significando erros que são de pequena magnitude.

TABELA 3. Estimativas dos parâmetros estatísticos do modelo ajustado para o fator C em uma microbacia hidrográfica da região de Lavras, MG.

Variável	Estimativa do Parâmetro	Significância
Intercepto	-0,0197	0,1983 ^{ns}
θ_{perfil}^2	0,0693	0,0181*
$P \cdot \theta_{\text{perfil}}$	$-3,278 \times 10^{-3}$	0,0498*
$Q_p \cdot P$	$-2,27 \times 10^{-4}$	0,0348*
$I_{10} \cdot D_c$	$-4,017 \times 10^{-6}$	0,0229*
$Q_p \cdot D_c$	$3,342 \times 10^{-5}$	0,045*
$Q_p \cdot \theta_{\text{perfil}}$	0,01310	0,011*
P	0,00264	0,05*
D_c^2	$2,29 \times 10^{-7}$	0,343 ^{ns}
R^2	0,9327	
Erro médio	22,85%	

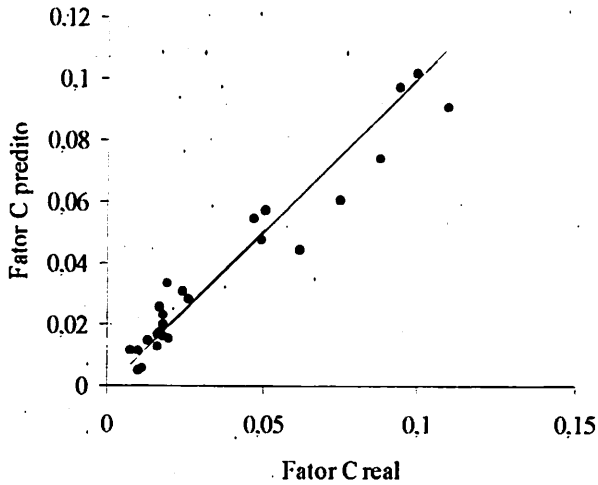


FIGURA 4. Dispersão dos valores preditos e reais em torno da reta 1:1 para o fato C (razão de escoamento) numa microbacia hidrográfica da região de Lavras, MG.

Uma das aplicações do modelo ajustado está exemplificada na Figura 5, onde tem-se o comportamento do fator C, em função da umidade relativa antecedente no perfil do solo (0-80 cm). Este gráfico foi construído com base em 3 dos eventos monitorados, que são:

Evento de 01/01/2003	Evento de 13/03/2003	Evento de 13/01/2003
P = 18,28 mm	P = 20,04 mm	P = 20,3 mm
Dc = 50 minutos	Dc = 120 minutos	Dc = 90 minutos
I ₁₀ = 39,6 mm/h	I ₁₀ = 45,7 mm/h	I ₁₀ = 47,2 mm/h
Q _p = 1,6 l/s	Q _p = 9,3 l/s	Q _p = 1,1 l/s
θ _{antecedente} = 0,524	θ _{antecedente} = 0,745	θ _{antecedente} = 0,764
C = 0,018	C = 0,11	C = 0,017

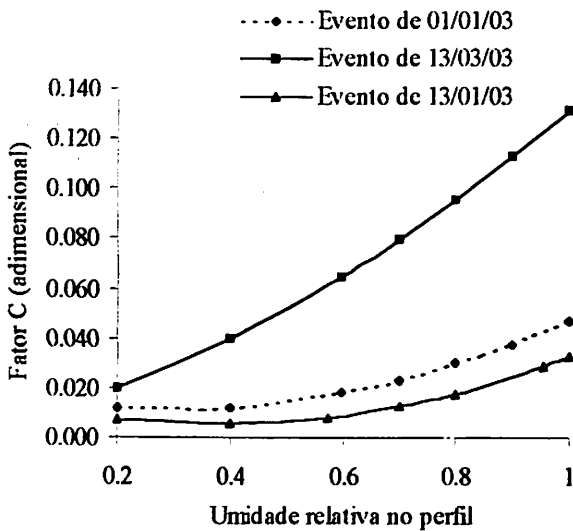


FIGURA 5. Comportamento do fator C (razão de escoamento) em função da umidade relativa média antecedente no perfil do solo para os eventos de 01/01/03, 13/03/03 e 13/01/03 em microbacia hidrográfica da região de Lavras, MG.

Observa-se, primeiramente, aumento do fator C (aumento do escoamento superficial) com aumento da umidade antecedente, sendo que para o evento do dia 13/03, a taxa crescimento do fator C é maior que dos demais eventos. É interessante destacar que o fator C máximo possível para os respectivos eventos de precipitação são de 0,047 (01/01/03), 0,132 (13/03/03) e 0,032 (13/01/03). Nesta situação as vazões de pico foram mantidas constantes, conforme gerado pelas hidrógrafas monitoradas. Ao se variar a vazão de pico no modelo, pode-se avaliar a sua influência na razão de escoamento. Esta é uma outra forma de se avaliar quantitativamente o deflúvio na microbacia.

Aplicando-se o modelo aos eventos mencionados, é possível fazer algumas previsões. Assim, por exemplo, se a umidade antecedente aos

respectivos eventos de precipitação fosse 25% menor que os respectivos valores monitorados, mantendo-se a vazão de pico correspondente, o fator C estimado pelo modelo seria de 0,012 para o evento de 01/01/03, 0,059 para 13/03/03 e 0,008 para 13/01/03, o que corresponde a um abaixamento, respectivamente, de 33,3; 86,4 e 53% do fator C monitorado. De modo similar, se a umidade antecedente fosse 25% superior ao valor real, o deflúvio seria aumentado em 16,7 (fator C igual a 0,021); 8,2 (0,119) e 64,7% (0,028), respectivamente para 01/01/03, 13/03/03 e 13/01/03.

Desta forma, ao se verificar o comportamento das variáveis hidrológicas estudadas neste trabalho em função da umidade, pode-se observar que as condições antecedentes são responsáveis por parcela significativa do escoamento superficial e por conseqüência, da erosão. Assim, é de substancial importância a consideração da umidade antecedente quando se busca a modelagem do deflúvio e da erosão em microbacias hidrográficas, não só na superfície, mas, pelo menos a 80 cm de profundidade.

4 CONCLUSÕES

- a) A umidade antecedente tem influência no comportamento das variáveis hidrológicas razão de escoamento, volume de ascensão da hidrógrafa, deflúvio, vazão de pico, duração do escoamento, número da curva e erosão e deve ser diretamente considerada em modelos hidrológicos.
- b) A influência da umidade antecedente é maior quando a umidade do Cambissolo é baixa, com respostas mais consistentes dos eventos no início do período chuvoso e ou após veranicos, verificando-se que há influência da umidade a 20, 50 e 80 cm, com aumento de correlação com a profundidade, devido à influência diferencial da evapotranspiração e textura, especialmente aumento de silte, com a profundidade.

- c) É possível avaliar numericamente o comportamento das variáveis hidrológicas em função da umidade por meio de um modelo matemático e ou estatístico numa microbacia hidrográfica, sendo útil para aplicações em previsão hidrológica.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BERTONI, J. C.; TUCCI, C. E. M. Precipitação. In: TUCCI, C. E. M. (Org.) **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2. ed. Porto Alegre: ABRH/Editora UFRGS, 2001. p. 177-242.
- BRAGA, J. C. **Modelo hidrológico de parâmetros distribuídos para obtenção do hidrograma de escoamento superficial**. 2000. 82 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.
- CRAWFORD, M.; LINSLEY, R. **Digital simulation in hydrology**. San Francisco: Stanford University, 1966. (Technical Report, n. 39).
- DONG, W. Q.; YU, Z. B.; WEBER, D. Simulations on soil water variation in arid regions. **Journal of Hydrology**. Amsterdam, v. 275, n. 3/4, p. 162-181, May 2003.
- EL SWAIFY, S. A.; DANGLER, E. W. Erodibilities of selected tropical soils in relation to structural and hydrologic parameters. In: NATIONAL CONFERENCE ON SOIL EROSION, 30., 1976, West Lafayette. **Proceedings...** Ankeny: Soil and Water Conservation Society, 1977. p. 105-110.
- FENDRICH, R. **Modelação de hidrogramas multi-modais**. São Carlos: EESC/USP, 1984. 174 p. Dissertação Mestrado.
- HUGGINS, L. F.; BURNEY, J. R. Surface runoff, storage and routing. In: HAAN, C. T.; JOHNSON, H. P.; BRAKENSIEK, D. L. **Hydrologic modeling os small watersheds**. St. Joseph: American Society of Agricultural Engineering, 1982. p. 169-228.
- LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. Piracicaba, 1995. 497 p.
- MELLO, C. R.; OLIVEIRA, G. C.; FERREIRA, D. F.; LIMA, J. M. Predição da porosidade drenável e disponibilidade de água para Cambissolos da

Microrregião Campos das Vertentes, MG. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 9, p. 1319-1324, set. 2002.

QUINTELA, A. C.; PORTELA, M. M. A modelação hidrológica em Portugal nos últimos 25 anos do século XX, nas perspectivas determinística, probabilística e estocástica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Porto Alegre, v. 7, n. 4, p. 51-64, 2002.

RIGHETTO, A. M. Hidrologia e recursos hídricos. São Carlos: EESC/USP, 1998. 840 p.

SILVEIRA, A. L. L. Ciclo hidrológico e bacia hidrográfica. In: TUCCI, C. E. M. (Org.) **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2. ed. Porto Alegre: ABRH/Editora UFRGS, 2001. p. 35-52.

SILVEIRA, L.; CHARBONNIER, F.; GENTA, J. L. The antecedent soil moisture condition of the curve number procedure. **Hydrological Science Journal**, Wallingford, v. 45, n. 1, p. 3-12, Feb. 2000.

SPAROVEK, G.; JONG VAN LIER, Q.; MARCINKONIS, S.; ROGASIK, J.; SCHNUG, E. A simple model to predict river floods – a contribution to quantify the significance of soil infiltration rates. **Landbauforschung**, Braunschweig, v.52, n. 3, p. 187-194, 2002.

STATISTICAL ANALYSES SYSTEM. **Language guide for personal computers**. 6. ed. Cary: SAS Instituto, 1985. 429 p.

SUAREZ, G. A. S. **Abstração inicial de uma bacia hidrográfica de floresta natural na região de Viçosa, MG**. 1995. 54 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

TUCCI, C. E. M. Escoamento superficial. In: TUCCI, C. E. M. (Org.) **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2. ed. Porto Alegre: ABRH/Editora UFRGS, 2001. p. 391-441.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 1998. 669 p.

CAPÍTULO 4

APLICABILIDADE DO MÉTODO CN-SCS A EVENTOS ISOLADOS DE PRECIPITAÇÃO EM MICROBACIA HIDROGRÁFICA COM REGIME DE ESCOAMENTO EFÊMERO

RESUMO

MELLO, Carlos Rogério de. Aplicabilidade do método CN-SCS a eventos isolados de precipitação em microbacia hidrográfica com regime de escoamento efêmero. In: _____. *Estudo hidrológico em microbacia hidrográfica com regime de escoamento efêmero*, 2003, Cap.4, p.79 a 120. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) Universidade Federal de Lavras, Lavras – MG.⁷

O método CN-SCS (Curve Number – Soil Conservation Service) é um importante modelo que aborda o escoamento superficial, porém sua aplicação a eventos isolados de precipitação precisa ser analisada e ajustada. Objetiva-se com este trabalho avaliar a aplicação do método CN-SCS a eventos isolados, analisar o comportamento de suas variáveis e propor modelagem para as variáveis de entrada com base na umidade antecedente e características da precipitação, visando à sua aplicação a eventos isolados e, conseqüentemente, em modelos de simulação hidrológica, num estudo de caso. Foram monitorados 30 eventos de deflúvio-precipitação, com a umidade do solo avaliada a cada 2 dias, numa microbacia hidrográfica de escoamento efêmero, de nov/02 a abril/03. Com base em tabela do método CN-SCS adotou-se um número da curva para a microbacia em função de sua cobertura vegetal. O armazenamento potencial de água foi calculado, para cada evento, a partir do deflúvio e precipitação monitorados e da determinação da abstração inicial, com posterior determinação do número da curva. Aproximando-se as hidrógrafas da forma triangular, mantendo-se o deflúvio, a vazão de pico e o tempo de ascensão registrados, determinou-se a relação tempo de recessão/tempo ascensão. Foram testados 4 métodos de cálculo para o tempo de concentração, analisando sua relação com valor do tempo de pico extraído de cada evento. Foram propostos modelos semi-conceituais para o tempo de ascensão, relação tempo de recessão e tempo ascensão, abstração inicial e número da curva para a microbacia hidrográfica. Verificou-se que a aplicação do método CN-SCS a eventos isolados não é viável, produzindo erros médios superiores a 400% para deflúvio e 200% para a vazão de pico. Verificou-se também que não há um padrão de comportamento entre as variáveis do método, não sendo possível adotar uma

⁷ Comitê Orientador: José Maria de Lima – DCS/UFLA (Orientador) e Antônio Marciano da Silva – DEG/UFLA (Co-orientador).

única constante para representá-las. A modelagem gerada permite que sejam estimados o deflúvio e a vazão de pico para cada evento isolado de precipitação, com boa precisão, na microbacia hidrográfica, podendo ser atualizada em tempo real, permitindo sua aplicação a modelos de simulação hidrológica.

ABSTRACT

MELLO, Carlos Rogério de. Applicability of CN-SCS method at isolated rainfall events in small-ephemeral watershed. In: _____. **Hydrological study in small-ephemeral watershed**, 2003, Chap.4, p.79 to 120. Dissertation (Doctorate Program on Soil Science and Plant Nutrition) Federal University of Lavras, Lavras – MG⁸.

CN-SCS method is an important model to estimate the design runoff and peak discharge in watersheds. However, its application to isolated rainfall events needs to be evaluated and adjusted. This work objectives to evaluate the application of CN-SCS method for isolated rainfall events in a ephemeral small watershed, to analyze its variables, comparing them to the values recognized by the method, and to generate semi-conceptual models based on the antecedent soil moisture and rainfall characteristics, making the CN-SCS method able to be applied to isolated events and to be used in hydrologic simulation models, in a case study. CN-SCS method was applied to 30 rainfall-runoff events that were monitored from Nov/02 to April/03. Curve numbers were taken from CN-SCS tables. Antecedent soil moisture was monitored each 2 days. Potential water storage was calculated for each event based on monitored runoff and rainfall and determined initial abstraction. Then, the real curve number was calculated. Hydrographs were close to a triangular shape, with runoff, peak discharge, and ascension time monitored. It was calculated the ratio between recession and ascension time. Time of concentration was estimated by 4 different methods and associated to the time to peak, extracted from each hydrograph. The results showed that the CN-SCS method can not be applied to isolated rainfall events since it produced mean errors greater than 400% for runoff and 200% for peak discharge. The analyze of variables did not show a clear trends that express the relations using only one value. This suggests that the CN-SCS method needs adjustment in order to be applied to isolated rainfall events. Semi-conceptual models were adjusted to ascension time, ratio between recession and ascension time, initial abstraction and the curve number, and they have produced good results, being suitable to the monitored watershed.

⁸ Guidance Committee: José Maria de Lima – UFLA, Antônio Marciano da Silva – UFLA.

1 INTRODUÇÃO

A manutenção ou melhoria da qualidade ambiental em microbacias hidrográficas deve ser referência para implementação de atividades de exploração econômica sendo exigido para obtenção legal, via Estudo e Relatório de Impacto Ambiental (EIA/RIMA), do direito de implantação de indústrias, agroindústrias, atividades agropecuárias, florestal, mineração e outras atividades. Além disto, atualmente existem as Outorgas do Uso da Água as quais, para sua obtenção legal, prevêm a aplicação e ou desenvolvimento de modelos de simulação hidrológica, cujo objetivo é prever possíveis comportamentos do regime hídrico na microbacia (Fischer, 2003; Silva et al., 2003; Rocha, 1997).

Vários modelos de simulação hidrológica têm sido desenvolvidos com base em outros modelos hidrológicos, destacando-se o modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool), que vem sendo utilizado com freqüência principalmente nos EUA (Machado, 2002). Este modelo incorpora o método CN-SCS (Curve Number – Soil Conservation Service), bastante difundido na literatura sobre hidrologia para simulação do escoamento superficial (Tucci, 2001; Lewis et al., 2000; Righetto, 1998; Tucci, 1998; Huggins & Burney, 1982), por ser um modelo simples, com poucas variáveis e de precisão considerável para condições norte-americanas.

O método CN-SCS foi desenvolvido com base nas condições hidrológicas e pedológicas dos EUA, e sua função não é simular eventos isoladamente e, sim, conforme Tucci (1998) e Huggins & Burney (1982), gerar o hidrograma de projeto para microbacias hidrográficas. A sua aplicabilidade para um evento em específico, algo necessário em modelos de simulação e previsão hidrológica é questionável, pois várias condições hidrológicas prévias influenciam na resposta da microbacia a um evento em específico, conforme constatado por Sheeder et al. (2002), Espírito Santo et al. (2001), Silveira et al. (2000), Lewis et al. (2000) e Perrone et al. (1998). Isto ocorre porque a adoção

de um número da curva constante, com base nas características físicas dos solos, cobertura vegetal e precipitação antecedente, pode ser prático, mas produz erros de grande magnitude na estimativa do deflúvio, quando se trata de um evento isolado (Grove et al., 1998).

Além deste aspecto, é interessante destacar que em microbacias hidrográficas de escoamento efêmero, cuja ocorrência tem aumentado nas últimas décadas, principalmente pela ação antrópica que altera o regime hídrico nas mesmas, o ciclo hidrológico é consideravelmente distinto de microbacias de escoamento perene. Essa situação pode levar o método CN-SCS a erros de elevada magnitude na estimativa do deflúvio. Alguns trabalhos, entre eles os de Croker et al. (2003) e Ye et al. (1997), demonstram que as respostas hidrológicas destas microbacias, em especial o escoamento superficial, são distintas, haja vista a pequena parcela desse no ciclo hidrológico, comparado a microbacias de escoamento perene.

A ciência hidrológica tem buscado explicar o comportamento da dinâmica da água, em seus diversos meios, através do desenvolvimento de modelos físico-matemáticos. Segundo Quintela & Portela (2002), Tucci (1998) e Fendrich (1984) existem 2 tipos básicos de modelos: determinísticos, os quais baseiam-se na explicação física do fenômeno, podendo ser empírico, conceitual ou semi-conceitual e, não-determinísticos, baseados em modelos probabilísticos ou estocásticos, em cujos fenômenos não são explicados por meio de outras variáveis físicas. A maior parte dos modelos hidrológicos é do tipo semi-conceitual, ou seja, buscam uma explicação baseada em variáveis físicas correlacionadas ao fenômeno, mas o modelo matemático não possui uma estrutura explicativa direta do mesmo.

Cada um dos modelos têm vantagens e desvantagens. Clarke (2002), Brun & Tucci (2002) e Tucci (1998) citam que os modelos puramente físicos têm a vantagem de poderem ser aplicados a qualquer bacia hidrográfica,

necessitando para isto calibrar seus parâmetros. O grande problema consiste, além da necessidade de um bom modelo físico, na elevada variabilidade espacial e temporal da maioria dos parâmetros, principalmente daqueles associados a solo, clima e mudanças na ocupação da microbacia, o que pode conduzir a erros de elevada magnitude.

Os modelos semi-conceituais são bastante úteis no contexto de pequenas bacias e sua aplicabilidade em modelos de simulação hidrológica pode ser aventada (Fendrich, 1984). Tucci (1998) e Barbosa (1997) citam que a grande vantagem destes modelos é o fato de se conseguir, em tempo real, a atualização de seus parâmetros. Perrone et al. (1998) trabalharam com modelos semi-conceituais para caracterização hidrológica de uma bacia hidrográfica rural em Quebec, Canadá, cujo objetivo final foi fornecer subsídios para futuros modelos de simulação hidrológica, relatando as vantagens já comentadas e desvantagens, as quais consistem da necessidade de dados em quantidade suficiente para ajuste dos modelos estatísticos e sua aplicação pode ser restrita à microbacia em questão.

Diante do exposto, objetiva-se com este trabalho, avaliar a aplicação do método CN-SCS a eventos isolados de deflúvio e vazão de pico numa microbacia hidrográfica com escoamento efêmero; analisar o comportamento das variáveis do método CN-SCS face ao que é sugerido pelo mesmo e pesquisar, por meio de um estudo de caso, uma modelagem que vise ao seu ajuste a fim de torná-lo aplicável a eventos isolados de precipitação, fornecendo subsídios a modelos de simulação hidrológica, inclusive em outras microbacias hidrográficas.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Descrição do método CN-SCS

O método CN-SCS foi originalmente desenvolvido para geração da hidrógrafa de projeto em microbacias hidrográficas rurais, estimando-se o armazenamento potencial de água do solo a partir da adoção de um número da curva, o qual reflete as condições de cobertura vegetal, atributos físico-hídricos do solo e condições de umidade antecedente, esta considerada apenas com base na precipitação antecedente nos últimos 5 dias (Machado, 2002).

A equação geral do Método para estimativa do deflúvio é a seguinte:

$$ES = \frac{(P - A_i)^2}{(P - A_i + S)} \quad (1)$$

em que ES é o deflúvio (mm), P é a precipitação total (mm), A_i a abstração inicial da precipitação (mm) e S, o armazenamento potencial do solo (mm). O método preconiza que haja uma relação entre A_i e S da seguinte forma:

$$A_i = K \cdot S \quad (2)$$

Com base em várias microbacias norte americanas, K é sugerido como sendo igual a 0,20.

O Número da Curva é associado ao armazenamento potencial de água no solo pela equação:

$$S = \frac{25400}{NC} - 254 \quad (3)$$

NC é o número da curva, adimensional. O valor adotado para NC refere-se à umidade nas condições de capacidade de campo. Quando há situação em que a precipitação antecedente nos últimos 5 dias é menor que 36 mm ou quando a umidade do solo está abaixo da capacidade de campo, o NC deve ser corrigido por (Machado, 2002):

$$NC_1 = \frac{4,2 \cdot NC_{II}}{10,0 - 0,058 \cdot NC_{II}} \quad (4)$$

Quando a precipitação nos últimos 5 dias superar 53 mm ou quando o solo se encontrar com umidade acima da capacidade de campo, o valor de NC deve ser calculado por:

$$NC_{III} = \frac{23 \cdot NC_{II}}{10,0 + 0,13 \cdot NC_{II}} \quad (5)$$

O método CN-SCS permite ainda estimar a vazão de pico de uma hidrógrafa de projeto aproximando-se esta a uma forma triangular, mantendo-se os valores de vazão de pico e deflúvio. A Figura 1 representa a hidrógrafa considerada pelo método, com seus parâmetros.

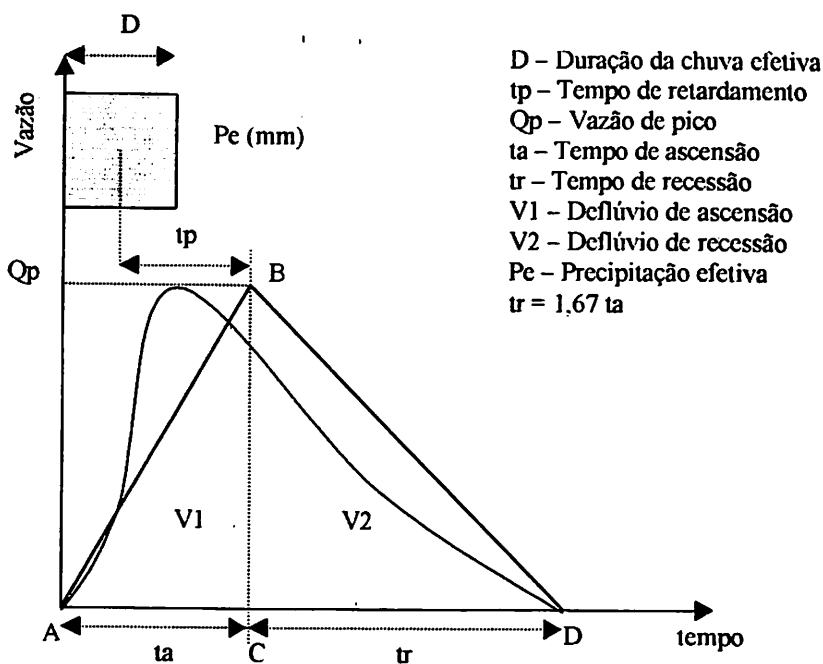


FIGURA 1. Representação da hidrógrafa triangular trabalhada pelo Método CN-SCS (Huggins & Burney, 1982).

A vazão de pico é calculada combinando-se as áreas dos triângulo ABC e BCD da Figura 1. Introduzindo-se algumas constantes transformadoras de unidade e sabendo-se que $V1+V2 = Pe$ e considerando tr/ta igual a 1,67, chega-se à seguinte equação:

$$q_p = \frac{0,208 \cdot P_u \cdot A}{t_a} \quad (6)$$

em que q_p é a vazão de pico unitária ($m^3 s^{-1}$), P_u a precipitação unitária considerada (mm), com duração D , A é área da microbacia (km^2) e t_a o tempo de ascensão da hidrógrafa (horas), o qual é obtido por:

$$t_a = t_p + \frac{D}{2} \quad (7)$$

O valor de t_p é considerado como sendo igual 0,60 do tempo de concentração, sendo obtido por:

$$t_p = 0,60 \cdot t_c = \frac{2,6 \cdot L^{0,80} \cdot \left(\frac{S}{25,4} + 1\right)^{0,70}}{1900 \cdot DL^{0,50}} \quad (8)$$

em que t_p é obtido em horas, L o comprimento do curso d'água principal (m), DL a sua declividade (%).

A vazão de pico para um determinado evento é obtida a partir da vazão de pico unitária, conforme definição do Hidrograma Unitário Triangular (HUT):

$$Q_p = q_p \cdot \frac{P_e}{P_u} \quad (9)$$

em que P_e é a precipitação efetiva que produziu o escoamento superficial, de mesma duração que P_u .

O método CN-SCS identifica os seguintes tipos de solos (extraído de Tucci, 2001):

- Solo A: solos que produzem baixo escoamento superficial e alta infiltração, arenosos, profundos, com pouco silte e argila;

- Solo B: solos menos permeáveis e menos profundos que os solos A, arenosos e com permeabilidade superior à média;
- Solo C: solos que geram escoamento superficial acima da média e com capacidade de infiltração abaixo da média, contendo percentagem considerável de argila e pouco profundo;
- Solo D: solos contendo argilas expansivas e pouco profundos, com capacidade de infiltração muito baixa, gerando o maior escoamento superficial.

2.2 Aplicação do método CN-SCS a eventos isolados

Com base na cobertura vegetal da microbacia, adotaram-se 2 valores para o número da curva na condição de capacidade de campo, extraídos de Tucci (2001), determinando-se um valor médio ponderado pela área de ocupação de cada uma. Foram considerados todos os 4 solos previstos pelo método em virtude da dificuldade e da incerteza em se enquadrar as características do solo principal da microbacia (Cambissolo) ao que é preconizado pelo método CN-SCS, uma vez que a concepção do mesmo é baseada nas condições de clima e solo dos EUA. Assim, a área coberta por eucaliptos e mata nativa foi considerada como sendo floresta esparsa e trabalharam-se com os valores 46, 68, 78 e 84, respectivamente para os solos A, B, C e D. A área com pastagem foi caracterizada como sendo de pasto pobre, em curva de nível, adotando-se os valores 47, 67, 81 e 88, respectivamente para A, B, C e D. Os números da curva I e III foram calculados com base nas equações 4 e 5, respectivamente. Os valores adotados nos cálculos foram aplicados conforme as condições de umidade antecedente do solo na microbacia, onde a umidade relativa média correspondente à capacidade de campo foi próxima a 0,60. Para vazão de pico calculou-se, para cada evento, o valor de t_p e t_a (equações 8 e 7) com o respectivo armazenamento potencial. A precipitação efetiva foi determinada

com base no índice ϕ , o qual representa a infiltração média na microbacia e considerou-se como P_u uma lâmina de 1 mm com duração igual à precipitação efetiva. Os erros produzidos pelas estimativas em relação aos respectivos valores reais foram calculados por:

$$e(\%) = \frac{|V_{\text{real}} - V_{\text{estimado}}|}{V_{\text{real}}} \cdot 100 \quad (10)$$

em que V_{estimado} e V_{real} são os valores estimados e reais do deflúvio e da vazão de pico.

2.3 Análise das variáveis do método CN-SCS

2.3.1 Abstração inicial (A_i), Número da Curva (NC) e razão tr/ta

A variável abstração inicial da precipitação, de acordo com Suarez (1995), é definido como sendo o total precipitado entre o início da precipitação e o início do escoamento superficial. A Figura 2 representa A_i a partir da combinação hietograma e hidrógrafa.

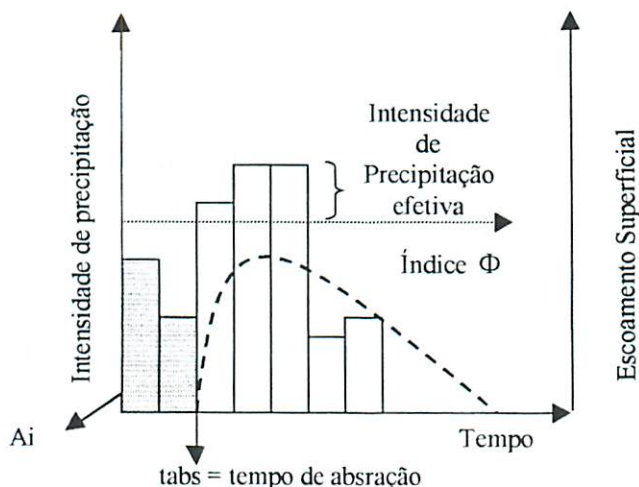


FIGURA 2. Representação gráfica da obtenção da abstração inicial bem como parâmetros hidrológicos necessários para este fim (Suarez, 1995).

Dispondo-se do deflúvio e da precipitação total medidos e da abstração inicial, pela equação 1, é possível obter o armazenamento potencial (S). Assim, para cada A_i determinado, há um correspondente S, gerando-se valores para a relação A_i/S para cada evento.

Com os valores de S, calcularam-se os respectivos números da curva (NC) com base na equação 3, para cada evento. A seguir, foram plotados o NC calculado, a umidade relativa média no perfil do solo na microbacia e o NC extraído de tabela, para cada solo previsto pelo método CN-SCS.

A variável t_r/t_a foi determinada aproximando-se as hidrógrafas monitoradas a um triângulo, conforme previsto pelo método CN-SCS. Pela Figura 1 percebe-se que a relação entre as áreas dos triângulos ABC e BCD permite fazer t_r/t_a igual a V_2/V_1 . O deflúvio de ascensão da hidrógrafa (V_1) foi calculado com base nos valores medidos de t_a e vazão de pico. O deflúvio V_2 foi calculado pela diferença entre o deflúvio medido e V_1 . Assim, construiu-se uma hidrógrafa triangular mantendo-se os principais parâmetros hidrológicos (vazão de pico, deflúvio e tempo de ascensão) medidos no campo.

A avaliação das variáveis do modelo foi feita verificando-se o comportamento dos dados, possíveis tendências, variabilidade e comparação com as constantes que são preconizadas pelo método CN-SCS. Além disto, foram feitas correlações estatísticas, acompanhadas pelo teste "t" de Student para avaliação da significância destas variáveis com as variáveis hidrológicas que podem interferir no processo, ou seja, umidade relativa antecedente nas profundidades de 20, 50 e 80 cm e média no perfil do solo (θ_{perfil}), intensidade máxima de 10 minutos (I_{10}), intensidade média da precipitação (I), precipitação total (P), duração total da chuva (D_c) e tempo necessário para que a chuva atinja sua intensidade máxima (t_i). Estas análises permitirão conhecer como as variáveis do método CN-SCS se comportam sob influência das condições hidrológicas antecedentes, norteando o ajuste de modelos.

2.3.2 Tempo de concentração (tc)

O tempo de concentração foi estimado para a microbacia monitorada com base na equação 8, considerando os 4 solos do método CN-SCS e relação tp/tc igual a 0,60. Além disto, foram aplicados outros 3 modelos para sua estimativa:

- Kirpich (Kirpich, 1940)

$$t_c = \frac{0,0195 \cdot L^{0,77}}{DL^{0,385}} \quad (11)$$

em que tc é obtido em minutos, L é o comprimento do canal principal (m) e DL declividade média (m/m).

- Bransby-Williams (Perrone et al., 1998)

$$t_c = \frac{14,6 \cdot L}{DL^{0,2} \cdot A^{0,1}} \quad (12)$$

em que tc é obtido em minutos e A, área da de drenagem da microbacia (km²).

- Airport (OMTC, 1982, citado por Perrone et al., 1998)

$$t_c = \frac{3,26 \cdot (1,1 - C) \cdot L^{0,5}}{DL^{0,33}} \quad (13)$$

em que tc é obtido em minutos e C representa o coeficiente de escoamento superficial, dado pela relação entre o deflúvio e a precipitação total.

Assim, foram analisados os valores produzidos por estes modelos em comparação com o respectivo valor de tp, o qual foi determinado com base na equação 7, uma vez que se dispõe de ta e D extraídos da respectiva hidrógrafa. Desta forma, foi possível comparar o comportamento da relação tp/tc com o valor considerado pelo método CN-SCS.

2.4 Estudo de caso: modelagem do deflúvio e vazão de pico, baseada no método CN-SCS, numa microbacia hidrográfica com regime de escoamento efêmero

A estrutura da modelagem está representada na Figura 3.

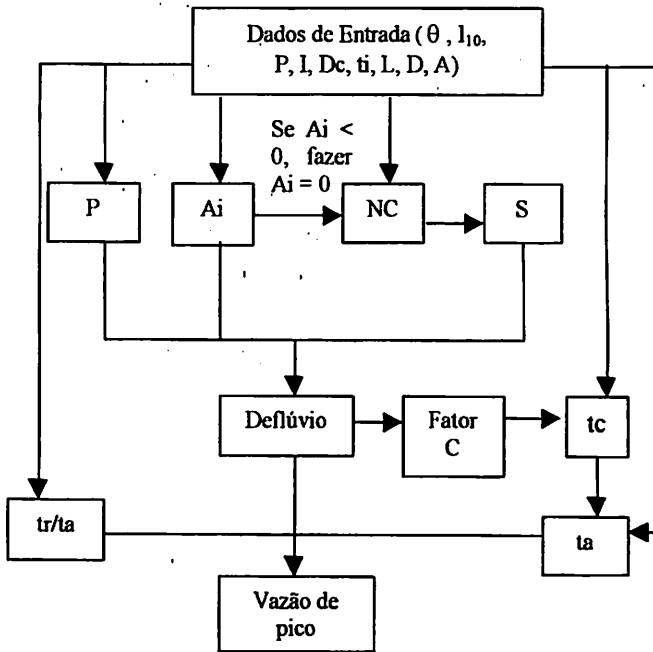


FIGURA 3. Fluxograma da modelagem adotada para ajustar o método CN-SCS a eventos isolados de precipitação numa microbacia hidrográfica da região de Lavras, MG.

A vazão de pico foi obtida a partir da seguinte seqüência:

$$\frac{tr}{ta} = \frac{V2}{V1} \quad (14)$$

$$\frac{tr}{ta} = \frac{(ES - V1)}{V1} = \frac{ES}{V1} - 1 \quad (15)$$

$$ES/VI = tr/ta + 1 \quad (16)$$

$$VI = (ta \cdot Qp) / 2 \quad (17)$$

Isolando Qp na equação 17 e substituindo VI , conforme equação 16, obtém-se:

$$Qp = \frac{2 \cdot ES}{\left(\frac{tr}{ta} + 1\right) \cdot ta} \quad (18)$$

Foram gerados modelos semi-conceituais para abstração inicial, número da curva, tr/ta e ta , com base nas variáveis hidrológicas de entrada umidade relativa antecedente no perfil do solo (0-80 cm) e características da precipitação. Para isto, trabalhou-se com o Programa SAS for Windows (Statistical Analyses System, 1985), com o procedimento "Proc Reg" e rotina "Backward", o qual seleciona as variáveis significativamente diferentes de zero de acordo com o nível de significância adotado, que no caso foi de 10%. Para avaliação dos modelos foi considerado o coeficiente de determinação, a significância dos parâmetros estimados para cada variável, os erros médio, máximo e mínimo produzidos pelos modelos, calculados com base na equação 11 e a dispersão dos valores preditos em torno da reta 1:1. Foram construídos também gráficos que mostram o comportamento do deflúvio e da vazão de pico ao longo do tempo, sendo possível verificar a aderência e a sensibilidade das variáveis preditas em relação aos valores medidos, sendo também um critério de avaliação dos modelos.

Para o cálculo de vazão de pico foram empregadas duas situações distintas (Figura 3). Foi adotado um procedimento em que se calcula ta diretamente; e adoção de um bom estimador do tempo de concentração, juntamente com uma constante que o associa a tp e, posteriormente, o cálculo de ta , pela equação 7. Neste trabalho, adotaram-se duas constantes: 0,60, conforme

o método CN-SCS e o valor médio da relação tp/tc obtido pelo melhor método de cálculo do tempo de concentração na microbacia utilizada no estudo de caso.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Aplicação do método CN – SCS a eventos isolados

Na Figura 4 apresenta-se o comportamento do deflúvio estimado pelo método CN-SCS, com base em solos hidrológicamente distintos, e os valores medidos em cada um dos 30 eventos monitorados, ao longo do tempo.

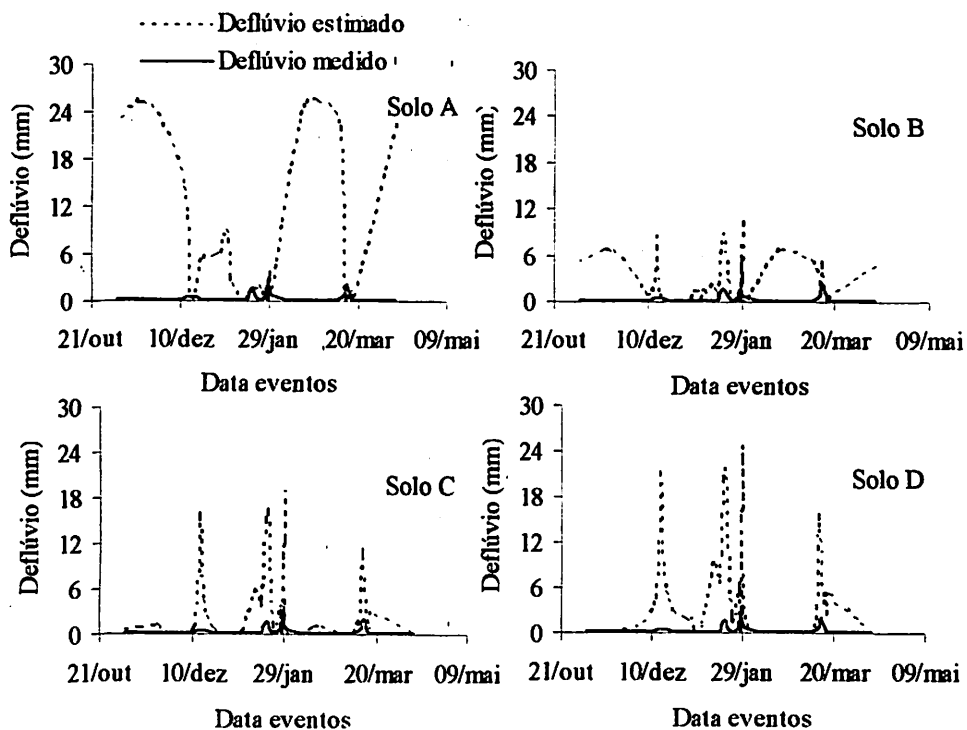


FIGURA 4. Comportamento do deflúvio estimado em relação ao medido com base nos solos previstos pelo método CN-SCS para uma microbacia hidrográfica da região de Lavras, MG.

Quanto à estimativa do deflúvio, a adoção de um solo representativo produziu resultados muito diferenciados entre si. Ao se adotar o solo A, as estimativas do deflúvio foram muito superiores aos valores medidos, produzindo resultados altamente comprometedores do método quando se avaliam os eventos de forma isolada. Ao se adotar o solo B como representativo, observou-se nítida redução nos valores de predição do deflúvio, havendo contudo, grandes diferenças, principalmente até o dia 10/12, entre 29/01 e 20/03 e após 20/03. Adotando-se o solo C, observaram-se estimativas semelhantes ao solo B; no entanto, quando se analisam as datas descritas anteriormente, observa-se maior aproximação entre os valores, amenizando as diferenças. A adoção do solo D produziu estimativas maiores que o solo C e B, mas inferiores ao A. Gráficamente, observa-se, em todas as situações, que houve superestimativa do deflúvio pelo método.

Ao se analisar, na Tabela 1, os erros provocados pela aplicação do método a eventos isolados, conclui-se que os mesmos são de elevada magnitude, variando, em média, de mais de 2600% para o solo A até próximo a 480% para o solo C. Tais valores demonstram a baixa aplicabilidade do método para estimativa de eventos isolados de deflúvio, sem nenhum tipo de ajuste ou modelagem com base nas condições hidrológicas que governam o fenômeno. Mesmo visando à geração de um hidrograma de projeto para a microbacia, apesar da pequena disponibilidade de dados, deve-se alertar para o fato de que a forma como a interação hidrologia e solo está apresentada pode comprometer a aplicação do método, pela dificuldade em se caracterizar solos tropicais ao que é proposto pelo método.

TABELA 1. Comportamento dos erros produzidos pela aplicação do método CN-SCS a eventos isolados de precipitação em microbacia hidrográfica da região de Lavras, MG.

Variável	Erro médio (%)	Erro máximo (%)	Erro mínimo (%)
Deflúvio			
- Solo A	2627,10	14237,47	10,91
- Solo B	607,22	3090,57	1,25
- Solo C	483,91	2492,83	4,25
- Solo D	841,63	3339,09	9,05
Vazão de pico			
- Solo A	207,69	453,98	46,43
- Solo B	274,76	552,97	93,09
- Solo C	314,48	603,65	101,70
- Solo D	337,84	630,12	105,98

Na Figura 5 apresentam-se os valores de vazão de pico estimados pelo método CN-SCS e os valores medidos da mesma para os eventos monitorados ao longo do tempo. Neste caso, deve-se avaliar que o valor de NC correspondente ao solo A produziu as menores diferenças nas estimativas, seguido, nesta ordem, por B, C e D, conforme constata-se também pelos erros médios na Tabela 1. Primeiramente, deve-se destacar neste caso que a escolha do solo não teve a influência nos erros que a mesma produziu para a estimativa do deflúvio, ou seja, verificam-se diferenças nos valores dos erros médios, mas não na magnitude anterior. Isto significa que caracterizar um solo com base na metodologia do método CN-SCS para estimativa da vazão de pico, na microbacia, não possui o mesmo peso que para o deflúvio. Esta situação ocorre porque o número da curva e, conseqüentemente, o armazenamento potencial, é diretamente aplicado ao cálculo do deflúvio. Para a vazão de pico, esta variável

entra no cálculo do tempo de concentração, em seguida no valor do tempo de ascensão, que é obtido pela soma de t_p (equivalente a 0,60 do tempo de concentração) mais a metade do tempo de duração da precipitação efetiva. Ocorre que a forma de cálculo proposta pelo método CN-SCS para o tempo de concentração, para esta microbacia, produziu valores muito pequenos para t_p quando comparados à duração da precipitação, tendo portanto, pouco peso no cálculo da vazão de pico. Da mesma forma que para o deflúvio, os erros produzidos para estimar isoladamente a vazão de pico foram muito elevados (acima de 200%), independentemente da escolha do solo, o que também inviabiliza sua aplicação para este fim.

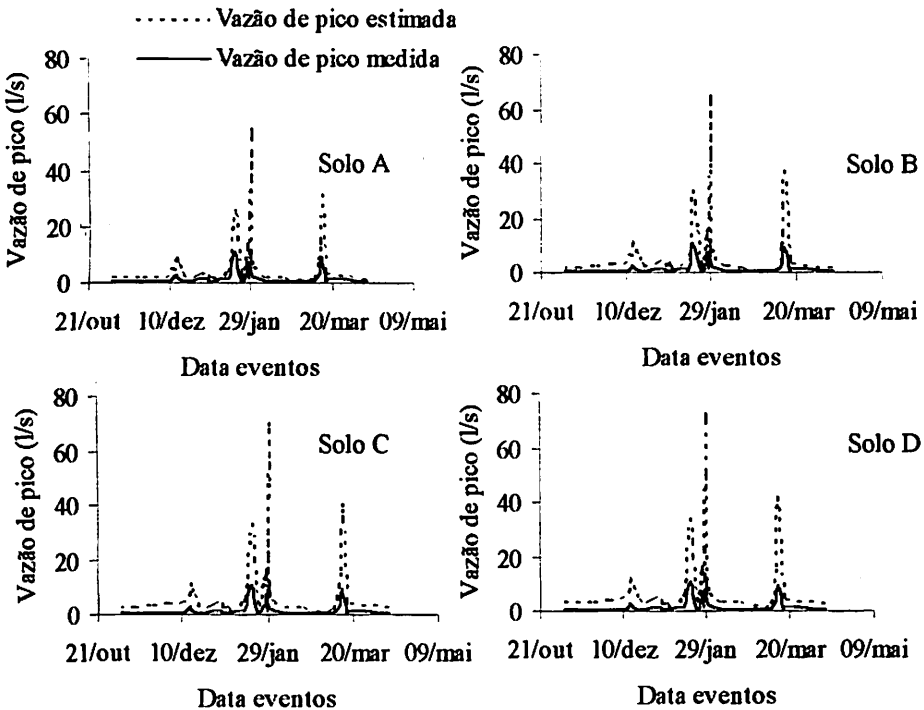


FIGURA 5. Comportamento da vazão de pico estimada e medida com base nos solos previstos pelo método CN-SCS para uma microbacia hidrográfica da região de Lavras, MG.

3.2 Análise das variáveis do método CN-SCS

3.2.1 Abstração inicial (A_i), Número da Curva (NC) e relação tr/ta

Na Figura 6a tem-se o comportamento da abstração inicial para o correspondente armazenamento potencial, calculado com base no deflúvio, precipitação total e abstração. Na Figura 6b apresenta-se o comportamento da relação A_i/S para cada evento monitorado. É possível destacar que não há padrão de comportamento desta relação, ou seja, quando se analisam isoladamente os eventos, não se verifica nenhum tipo de tendência, o que mostra uma elevada sensibilidade da variável abstração inicial. Isto dificulta sobremaneira a geração de uma relação matemática de A_i em função de S , principalmente uma associação simples, como a sugerida pelo método CN-SCS. Verifica-se, também, que o valor 0,20 é muito alto para a microbacia em questão, provocando superestimativas da abstração. Apenas em duas oportunidades esta situação ocorreu. Sheeder et al. (2002) mostraram que a abstração inicial, conforme proposta pelo método, precisa ser revista, pois, é o principal foco de erros na estimativa do deflúvio, concluindo que a relação A_i/S também foi muito menor que 0,20 para duas microbacias hidrográficas nos EUA, uma urbana e outra rural. Yuan et al. (2001) também concluíram a respeito da sensibilidade da abstração e a dificuldade em se estabelecer uma relação direta com o armazenamento potencial, sugerindo que os valores da relação devem mudar para cada situação isoladamente. Os dados apresentados neste trabalho corroboram com o que ambos trabalhos citados descrevem e permitem conjecturar a respeito de um modelo físico-matemático mais amplo para explicar o comportamento da abstração, principalmente visando à simulação hidrológica.

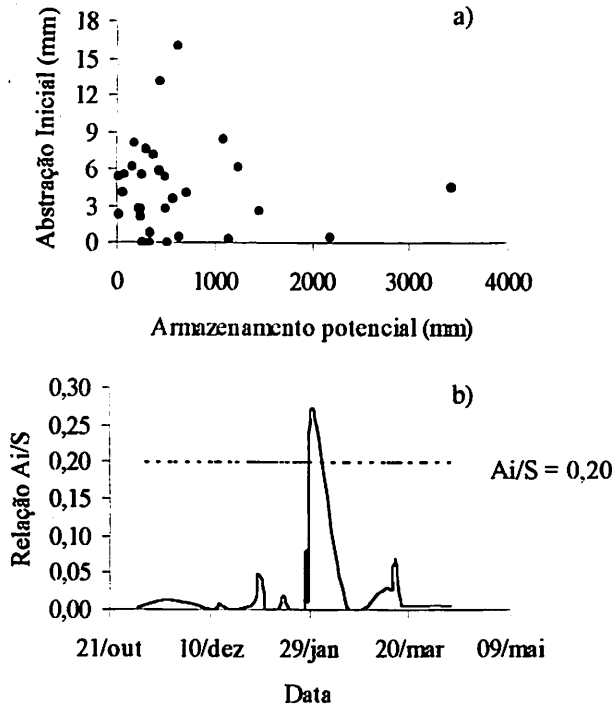
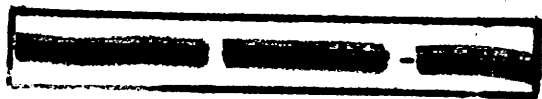


FIGURA 6. Comportamento da abstração inicial em função do armazenamento potencial para os eventos de escoamento monitorados na microbacia hidrográfica da região de Lavras, MG.

Na Figura 7 apresentam-se os valores reais do número da curva para cada um dos eventos e concomitantemente, os valores extraídos de tabelas, propostas pelo método CN-SCS, conforme Tucci (2001), Tucci (1998) e Bonta (1997), de acordo com as condições de precipitação antecedente e cobertura vegetal da microbacia, e o comportamento da umidade no perfil do solo ao longo do tempo. Observa-se grande variação do número da curva ao longo do tempo quando se tomam os eventos isoladamente. Esta situação permite avaliar que esta variável é bastante sensível às condições antecedentes de umidade e das

características da precipitação e não apenas das características físico-hídricas dos solos e cobertura vegetal. Assim, é interessante destacar que a sensibilidade do número da curva será transmitida para o armazenamento potencial e daí para a abstração inicial.

Quando se adota o NC correspondente ao solo A, observam-se valores do número da curva que são mais próximos dos valores calculados com base nos eventos, sendo que à medida que se afasta desse número, aumenta-se a distância entre os valores de tabela e os calculados, ou seja, o valor de NC do solo D foi o que produziu os valores mais distantes, seguido do C. Esta situação é conflitante haja vista que os valores de deflúvio estimados pelo método CN-SCS, considerando este último solo, produziu os menores erros. Isto mostra que o Método precisa ser revisto, introduzindo situações mais específicas sobre umidade antecedente e precipitação para possibilitar sua aplicação tanto para hidrogramas de projeto mais confiáveis para regiões tropicais e subtropicais, conforme sua proposição original, quanto, principalmente, para eventos isolados para fins de modelagem hidrológica.

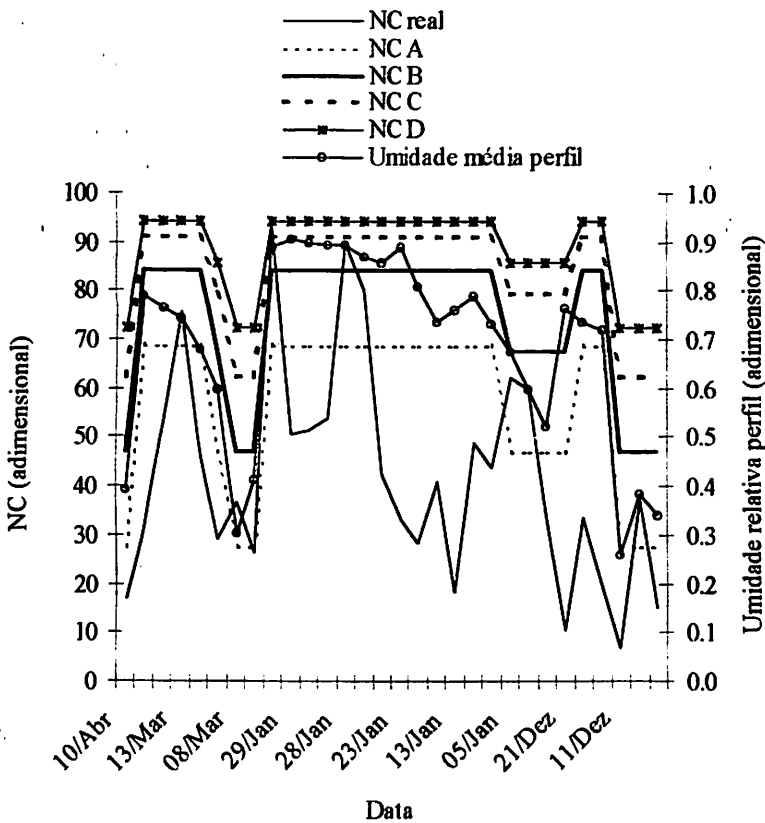


FIGURA 7. Comportamento do Número da Curva para cada evento monitorado bem como dos valores de tabela para as condições de solo expressas pelo método CN-SCS em microbacia hidrográfica da região de Lavras, MG.

Na Figura 8 tem-se a relação tempo de recessão e tempo de ascensão da hidrógrafa, produzidos por cada um dos eventos monitorados, variável esta de grande importância no cálculo da vazão de pico pelo método CN-SCS. A Figura 8 mostra situações consideravelmente superiores a 1,67 para a relação, além de alta variabilidade, gerada por valores que variaram de 1 a 13,8, apesar da maioria estar concentrada na faixa de 1 a 6, mostrando alta sensibilidade desta

variável, tomando a aplicação da constante sugerida pelo método com pequeno êxito prático para eventos isolados. O valor médio encontrando foi de 3,0, praticamente o dobro do sugerido. Estes dados, da mesma forma que abstração inicial e número da curva, demonstram não haver nenhum tipo de tendência que possibilite a aplicação de uma constante, devendo-se introduzir variáveis hidrológicas que governam o comportamento das hidrógrafas, especialmente associadas ao padrão de precipitação, num modelo para explicar o comportamento da relação.

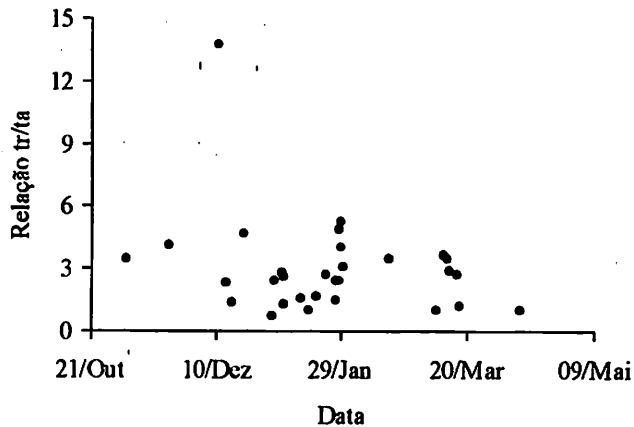


FIGURA 8. Comportamento da relação tempo de recessão e tempo de ascensão da hidrógrafa para cada um dos eventos monitorados em microbacia hidrográfica da região de Lavras, MG.

Na Tabela 2 apresentam-se as variáveis do método CN-SCS, suas correlações com a umidade antecedente, em 3 profundidades e na média do perfil do solo, e características comportamentais da precipitação, além da média e coeficiente de variação dos mesmos para os eventos monitorados.

TABELA 2. Correlações das variáveis do método CN-SCS com umidade antecedente e características da precipitação e, média e coeficiente de variação dos valores obtidos para os eventos monitorados em microbacia hidrográfica da região de Lavras, MG.

Variáveis Hidrológicas	Variáveis do método CN-SCS			
	Ai	NC	tr/ta	ta
$\theta_{20\text{cm}}$	-0,32†	0,53**	0,091 ^{ns}	-0,01 ^{ns}
$\theta_{50\text{cm}}$	-0,43*	0,48*	0,098 ^{ns}	-0,01 ^{ns}
$\theta_{80\text{cm}}$	-0,49*	0,53**	0,14 ^{ns}	-0,01 ^{ns}
θ_{perfil}	-0,43*	0,53**	0,12 ^{ns}	-0,01 ^{ns}
I ₁₀	-0,04 ^{ns}	-0,49*	0,48*	-0,35†
P	0,37†	-0,47*	0,65**	-0,34†
I	0,062 ^{ns}	-0,46*	-0,05 ^{ns}	-0,08 ^{ns}
Dc	0,35†	0,002 ^{ns}	0,62**	-0,16 ^{ns}
ti	0,72**	0,15 ^{ns}	-0,05 ^{ns}	0,18 ^{ns}
Média	4,50	42,30	3,30	25,00
CV	84,60	52,70	78,80	31,00

† = Significativo a 10%; * = significativo a 5%; ** = significativo a 1%; ns = não significativo.

Quanto à abstração inicial, observa-se que as correlações com a umidade antecedente produziram coeficientes de média magnitude e significância estatística a 5% de probabilidade pelo teste t. Estes parâmetros estatísticos são de boa qualidade principalmente em se tratando de um trabalho em nível de monitoramento de dados hidrológicos no campo. O valor negativo dos coeficientes expressam o comportamento físico esperado do escoamento numa microbacia, ou seja, quanto menor a umidade antecedente do solo maior a abstração. Em termos das características da precipitação, apenas a precipitação total e o tempo de pico da chuva foram significativos. Isto ocorreu porque a grande maioria dos eventos foi produzida por precipitações efetivas de 10

minutos e estas foram provocadas pelo pico da chuva, daí a alta relação entre as variáveis.

O número da curva foi a variável do método CN-SCS que produziu as maiores correlações, tanto em valores e significância do coeficiente, quanto em quantidade de variáveis que foram significativas, mostrando que além da elevada sensibilidade à umidade antecedente, as principais características da precipitação também influenciam no seu comportamento. Observa-se que quanto maior a umidade antecedente, maior o número da curva e maior a produção de deflúvio, pois haverá menor armazenamento potencial do solo. O coeficiente de variação produzido é de elevada magnitude, mostrando a dependência do mesmo em relação às condições que regem o fenômeno do escoamento superficial, especialmente a precipitação, a qual, por natureza, apresenta alta variabilidade natural (Bertoni & Tucci, 2001). O tempo de ascensão não se mostrou sensível às variáveis hidrológicas analisadas, produzindo, no entanto, alguma significância, a 10% de probabilidade, com as características da precipitação. Assim, espera-se que haverá maior dificuldade em se obter um modelo que possa expressar o comportamento do tempo de ascensão. A relação t_r/t_a não se mostrou sensível à umidade antecedente, mas bastante influenciável pelas características da precipitação, sendo altamente significativa para intensidade máxima de 10 minutos, precipitação total e duração da chuva. O coeficiente de variação ficou acima de 78%, reforçando os comentários já feitos a respeito deste parâmetro, ou seja, que a aplicação de uma constante para explicá-lo não será possível para representar eventos de precipitação isolados.

3.2.2 Tempo de concentração

Na Tabela 3 têm-se valores para o tempo de concentração calculados com base no método CN-SCS, adotando-se os diferentes solos previstos pelo método.

TABELA 3. Tempos de concentração calculados para uma microbacia hidrográfica da região de Lavras-MG, com base no método CN-SCS.

Solo	tc (médio)	tc mínimo	tc máximo
A	9,06	5,94	18,29
B	5,45	3,78	10,45
C	3,95	2,91	7,06
D	3,23	2,50	5,40

Analisa-se que o método CN-SCS produziu resultados mais coerentes para o tempo de concentração quando se adotou o NC correspondente ao solo A. O valor médio foi de 9,06 minutos, com máximo atingindo 18,29 minutos. Foi o mais coerente pois avaliando-se o índice ϕ de cada um dos 30 eventos monitorados, verificou-se que 24 eventos de deflúvio foram produzidos por apenas 1 evento efetivo de precipitação de 10 minutos e 6 por eventos de 20 minutos consecutivos e que em todos eles houve a formação de um pico de vazão, significando que o tempo de concentração não pode ser inferior a 10 minutos, pois de acordo com a teoria comportamental do escoamento superficial em microbacias (Tucci, 2001; Righetto, 1998) haveria a formação de um patamar de escoamento, sem vazão de pico, pois toda a microbacia contribuiria para o escoamento por um tempo superior ao necessário para isto. Este tipo de hidrógrafa é conhecido como curva "S".

No entanto, apesar dos valores para o tempo de concentração produzidos pelo valor NC do solo A estarem mais próximos da realidade, quando comparados ao comportamento dos eventos, observa-se, pela Figura 9 que a relação tp/tc comporta-se de forma muito variável, com valores superiores a 0,60, podendo significar que o método de cálculo do tempo de concentração preconizado pelo método pode não ser o mais adequado e ou a relação tp/tc não pode ser explicada por esta constante para toda e qualquer microbacia, especialmente em se tratando de eventos isolados.

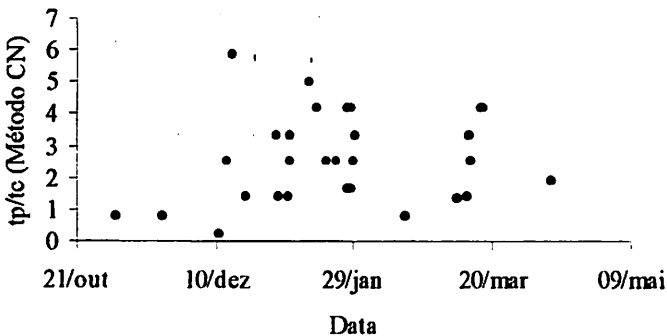


FIGURA 9. Comportamento da relação tp/tc com base nos valores medidos de tp para cada evento e tempo de concentração calculado com base no método CN-SCS para uma microbacia hidrográfica da região de Lavras, MG.

Os métodos de Kirpich e Bransby-Williams produziram valores para t_c respectivamente de 1,81 minutos e 4,92 minutos. Tais métodos dependem apenas de características fisiográficas da microbacia, como comprimento e declividade do curso d'água principal e área. Estes resultados, confrontados à duração dos eventos efetivos, mostram a impossibilidade de aplicação destes valores, conforme já discutido. O método Airport produziu um valor médio para

tc de 16,5 minutos, variando de 15,4 a 17,0 minutos, sendo o mais consistente dos métodos aplicados quando se confronta com a duração dos eventos efetivos e comportamento das hidrógrafas. Assim, o método CN-SCS e, principalmente, o método Airport foram os que produziram resultados mais coerentes para o tempo de concentração e, conseqüentemente, para estimativa da vazão de pico. Esta análise significa, tendo-se como base a estrutura destes modelos, que o método de cálculo de tc deve incorporar as condições de escoamento, umidade antecedente e ou características da precipitação, principalmente para pequenas bacias, como é o caso do presente estudo.

Na Tabela 4 apresenta-se o valor médio, mínimo e máximo da relação t_p/t_c , calculados com base nos valores reais de t_p , extraídos de cada hidrógrafa, e t_c calculado pelos métodos CN-SCS e Airport.

TABELA 4. Valores da relação t_p/t_c com base nos métodos CN-SCS e Airport e valores de t_p extraídos diretamente das hidrógrafas em microbacia hidrográfica da região de Lavras, MG.

Método	Média	Mínimo	Máximo
CN	2,51	0,27	5,89
Airport	1,17	0,30	2,10

O valor médio encontrado pelo método CN-SCS foi de 2,51 e para Airport, 1,17, ambos superiores a 0,60, especialmente o primeiro método, o qual preconiza este valor. Além disto, o método CN-SCS produziu uma variabilidade muito superior ao método Airport, tendo-se como base a amplitude dos valores. Esta situação ocorreu porque para o cálculo de t_c , com base no método CN-SCS, é necessário o parâmetro armazenamento potencial e a alta variabilidade apresentada pelo número da curva, é transferida para o cálculo de t_c . Isto, associado ao fato do número da curva apresentar correlação, com significância

estatística, em relação à umidade antecedente e características da precipitação, mostram que para estimativa do tempo de concentração em microbacias é necessário que os modelos contemplem estas variáveis, especialmente quando se busca a modelação das respostas hidrológicas a eventos isolados.

3.3 Estudo de caso: modelagem do deflúvio e vazão de pico, baseada no método CN-SCS, numa microbacia hidrográfica com regime de escoamento efêmero

3.3.1 Deflúvio

Na Tabela 5 apresentam-se os modelos desenvolvidos para predição das variáveis abstração inicial da precipitação e número da curva, baseados na umidade antecedente e características da precipitação, oriundas do hietograma, bem como suas qualidades estatísticas, expressas pelo coeficiente de determinação, significância estatística dos parâmetros ajustados pelo teste t e erro médio produzido pela média dos erros entre os valores preditos e valores originais. Observa-se a boa qualidade dos modelos ajustados, com elevados coeficientes de determinação (acima de 90%) e significância estatística das variáveis e dos parâmetros, com três exceções para o modelo da abstração inicial e uma para o modelo do número da curva. Porém, mesmo estas variáveis não significativas a 10% são importantes para os modelos, haja vista que sua remoção implica numa redução dos coeficientes de determinação dos mesmos, significando que as variáveis são de importância para a qualidade final do modelo. Em se tratando de monitoramento hidrológico, baseado em vários componentes avaliados “in situ”, os modelos ajustados podem ser considerados de ótima qualidade e explicadores das respectivas variáveis do método CN-SCS.

TABELA 5. Modelos ajustados para as variáveis abstração inicial e número da curva do método CN-SCS para uma microbacia hidrográfica da região de Lavras, MG.

Abstração Inicial			Número da Curva		
Variável	Parâmetro ¹	Sig. Est.	Variável	Parâmetro ¹	Sig. Est.
Intercepto	4,3284	0,1535 ^{ns}	Intercepto	-526,0997	0,0071**
$\theta_{\text{perfil}} \cdot Dc$	0,2557	0,0061**	$\theta_{\text{perfil}} \cdot I$	-47,088	0,0048**
$\theta_{\text{perfil}} \cdot P$	-1,5048	0,0029**	$\theta_{\text{perfil}} \cdot ti$	2,087	0,0032**
$I \cdot I_{10}$	-0,00791	0,028*	$\text{Ln}(\theta_{\text{perfil}})$	-647,15	0,0066**
$I \cdot P$	0,02832	0,0174*	$\text{Ln}(I)$	91,809	0,0083**
Dc	-0,2029	0,0079**	$\text{Ln}(\theta_{\text{perfil}}) \cdot \text{Ln}(I)$	295,4789	0,0063**
P	1,4375	0,0084**	$\theta_{\text{perfil}} \cdot Dc$	-0,4973	0,0123*
$\theta_{\text{perfil}} \cdot ti$	-0,2799	0,0111*	$\theta_{\text{perfil}} \cdot Ai$	-8,947	0,2943 ^{ns}
$I \cdot ti$	0,03224	0,0014**	$Ai \cdot P$	-0,3378	0,0027**
$ti \cdot Dc$	0,000439	0,122 ^{ns}	$Ai \cdot I_{10}$	0,1189	0,0193*
$ti \cdot I_{10}$	-0,00674	0,0064**	θ_{perfil}	549,50	0,0029**
ti	0,1554	0,1477 ^{ns}	ti	-1,3233	0,0062**
I	-0,9803	0,0102*	I	28,948	0,0077**
$Dc \cdot I_{10}$	0,001763	0,0020**	P	2,3033	0,0659†
$Dc \cdot P$	-0,00355	0,0169*	Ai	13,7084	0,0296*
EM (%)	69,95			12,86	
R^2	0,9035			0,9327	

EM = erro médio; R^2 = coeficiente de determinação; Sig. Est. = significância estatística; 1 = Estimativas dos parâmetros.

O gráfico da Figura 10a mostra o deflúvio medido e estimado com base nos modelos desenvolvidos, aplicando-os ao método CN-SCS. A Figura 10b

representa a dispersão dos valores estimados em torno da reta 1:1. A primeira situação permite avaliar o grau de aderência e sensibilidade que a modelagem proporciona. Nota-se, além de boa precisão, com os valores preditos próximos dos medidos, um acompanhamento das oscilações: onde há a formação de “picos” e “vales”. O modelo também acompanha estas tendências, havendo algumas sub e superestimativas. A distância entre os pontos e a reta 1:1 mostra o comportamento dos erros, detectando-se pequenas distâncias entre os pontos e a reta, significando boa precisão da modelagem proposta. Além disto, o erro médio produzido pela modelagem para estimativa do deflúvio foi de 21,2%. Nota-se que os erros são muitas vezes menores que aqueles produzidos pelo método CN-SCS sem nenhum tipo de ajuste (Tabela 1).

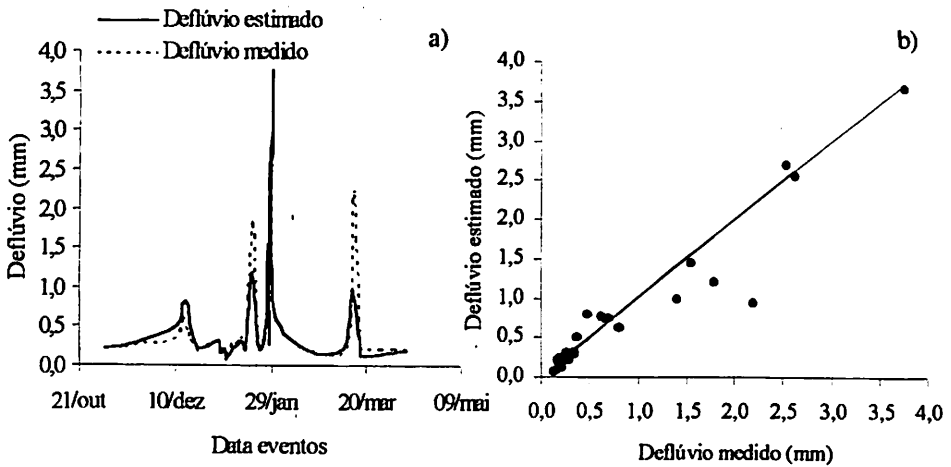


FIGURA 10. Comportamento do deflúvio estimado em relação ao medido na microbacia hidrográfica ao longo do tempo (a) e dispersão dos valores em torno da reta 1:1 (b), produzidos pela modelagem semi-conceitual.

3.3.2 Vazão de pico

Na Tabela 6 apresentam-se os modelos gerados, respectivamente, para as variáveis tr/ta e ta (relação tempo de recessão e tempo de ascensão e tempo de ascensão da hidrográfica, respectivamente). Ambas as variáveis não apresentaram significância estatística com a umidade antecedente, mas combinando-se esta variável hidrológica com características da precipitação, foi possível ajustar modelos matemáticos, com boas características estatísticas, com elevados coeficientes de determinação, baixos erros de predição e elevada significância estatística das variáveis e dos parâmetros estimados. Pode-se observar que o modelo para ta é o que possui maior número de variáveis, o que possivelmente se deve ao fato deste parâmetro não apresentar correlação significativa com as variáveis de forma isolada (Tabela 2), dificultando o ajuste de um modelo menos extenso. No entanto, este modelo não apresenta dificuldade de uso, principalmente em se tratando de aplicação a modelos de simulação hidrológica, uma vez que o resultado é explícito, não havendo necessidade de algoritmos mais complexos, com cálculos iterativos que demandam maior tempo de computação.

TABELA 6. Modelos ajustados para as variáveis ta e tr/ta para uma microbacia hidrográfica da região de Lavras, MG.

tr/ta			ta		
Variável	Parâmetro ¹	Sig. Est.	Variável	Parâmetro ¹	Sig. Est.
Intercepto	-6,2189	0,0245*	Intercepto	1148,64	0,0101*
$\theta_{\text{perfil}} \cdot I$	-0,6754	0,0158*	I	-23,126	0,10†
$\theta_{\text{perfil}} \cdot I_{10}$	0,1187	0,0567†	I · P	0,661	0,0217*
$\theta_{\text{perfil}} \cdot P$	-0,5815	0,0005**	$\theta_{\text{perfil}}^2 \cdot ti^2$	-0,0815	0,0242*
I^2	0,0154	0,0936†	$\theta_{\text{perfil}}^2 \cdot I^2$	0,2246	0,0037**
I · ti	0,01339	0,0037**	I_{10}^2	-0,1758	0,0045**
I · P	-0,01104	0,1304 ^{ns}	θ_{perfil}^3	-4150,11	0,0051**
ti · I_{10}	-0,00267	0,0179*	ti^2	-0,01287	0,0167*
ti · P	-0,00202	0,0230*	θ_{perfil}^2	10217,33	0,0049**
I	-0,39327	0,1275 ^{ns}	$\theta_{\text{perfil}}^2 \cdot I$	-223,73	0,0047**
θ_{perfil}	10,957	0,0025**	$\theta_{\text{perfil}}^2 \cdot ti$	-24,40	0,0029**
P	0,8147	0,0001**	$\theta_{\text{perfil}}^2 \cdot P$	21,15	0,0046**
			$I^2 \cdot ti$	0,051	0,0044**
			$I^2 \cdot I_{10}$	-0,00917	0,0044**
			I_{10}	23,45	0,0024**
			θ_{perfil}	-6928,49	0,0057**
			P	-23,319	0,0061**
			$\theta_{\text{perfil}} \cdot I$	235,04	0,0056**
			$\theta_{\text{perfil}} \cdot ti$	27,98	0,0027**

Continua ..	$\theta_{\text{perfil}} \cdot I_{10}$	-31,47	0,0021**
	I^2	-1,95	0,0057**
	$I \cdot t_i$	-1,30	0,0035**
	$I \cdot I_{10}$	0,488	0,0099**
	$t_i \cdot P$	0,110	0,0045**
EM (%)	33,8	16,0	
R^2	0,8969	0,9290	

EM = erro médio; R^2 = coeficiente de determinação; Sig. Est. = significância estatística; I = estimativa dos parâmetros.

Como os resultados apresentados na estimativa do tempo de concentração pelo método Airport foram os mais coerentes em relação ao comportamento da hidrógrafa e duração da chuva efetiva, propõe-se também o uso do próprio método CN-SCS considerando o tempo de concentração pelo método Airport, trabalhando-se com os valores de 1,167 e 0,60 para a relação t_p/t_c . O primeiro valor por ser o valor médio obtido na microbacia e o segundo, sugerido pelo Método CN-SCS. A metodologia que considera t_c incorpora as características físicas da microbacia, podendo facilitar sua extrapolação para outras microbacias na região.

A Figura 11 representa o comportamento da vazão de pico estimada pelas metodologias propostas.

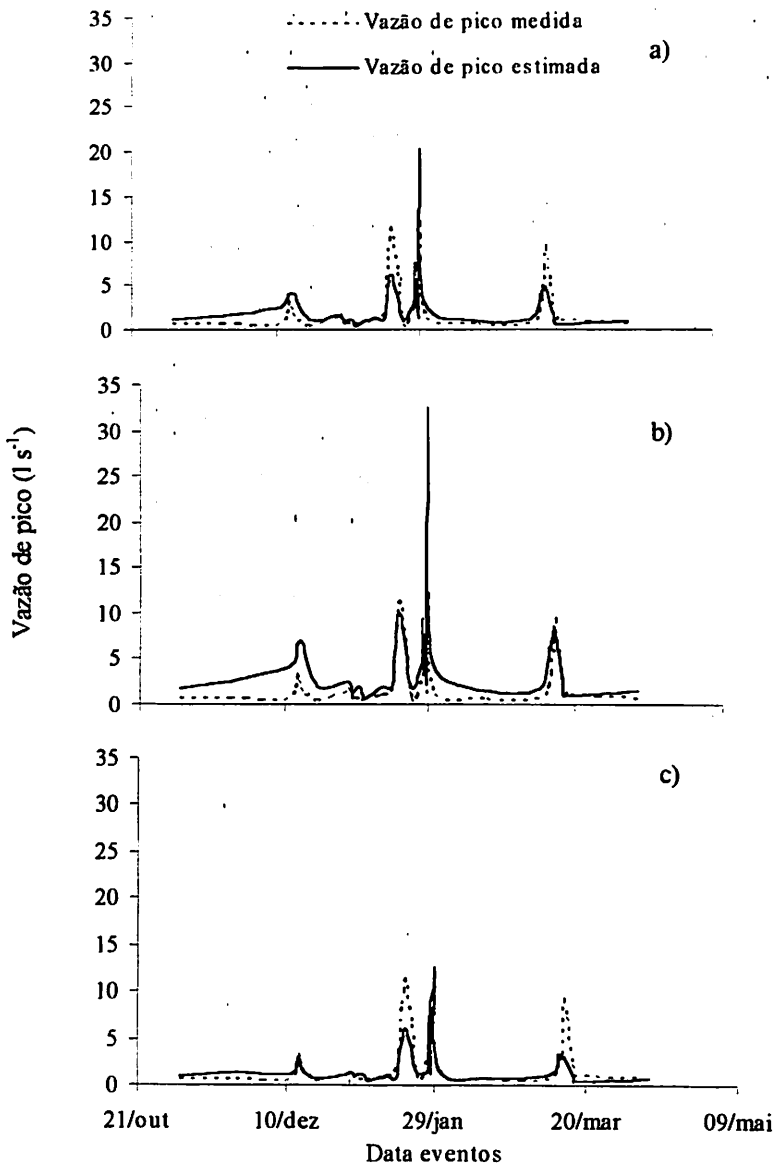


FIGURA 11. Vazão estimada pelos modelos (a - SCS, considerando t_c por Airport e $t_p = 1,167t_c$; b - SCS, considerando t_c por Airport e $t_p = 0,60t_c$; c - modelagem proposta) em comparação com os valores medidos na microbacia monitorada na região de Lavras, MG.

É interessante destacar a boa aderência dos valores preditos em relação aos medidos especialmente para a modelagem desenvolvida, embora tenha produzido algumas subestimativas, especialmente para dois eventos próximos ao dia 29/01 e 20/03. Isto também ocorreu para o método CN-SCS – Airport e constante 1,167. Para este mesmo método, porém constante 0,60, isto não ocorreu, mas notam-se superestimativas consideráveis em outras datas, como em 10/12 e 29/01. Em termos de precisão, a modelagem proposta produziu os menores erros, o que pode ser constatado pela proximidade entre as curvas em relação aos outros métodos testados. Em seguida, aparece o método CN-SCS Airport ($tp/tc = 1,167$) o qual difere em pequeno grau da metodologia proposta, demonstrando que a constante 0,60 pode produzir precisão consideravelmente inferior em várias ocasiões. É possível verificar, pelos gráficos da Figura 11, que o método CN-SCS Airport ($tp/tc = 0,60$) é o único dos métodos que produziu superestimativa da vazão de pico em praticamente todos os eventos, o que não ocorreu com os demais métodos.

Na Figura 12 explicita-se o comportamento dos erros produzidos por cada método, para cada evento. Notam-se valores muito superiores para o método CN-SCS Airport ($tp/tc = 0,60$), com erro médio de 117,2% e máximo próximo a 400%, seguido por este método porém $tp/tc = 1,167$, com erro médio de 51% e máximo de 200%. Os erros de menor magnitude foram produzidos pelo modelo proposto, gerando erro médio de 30,2% e máximo em torno de 60%.

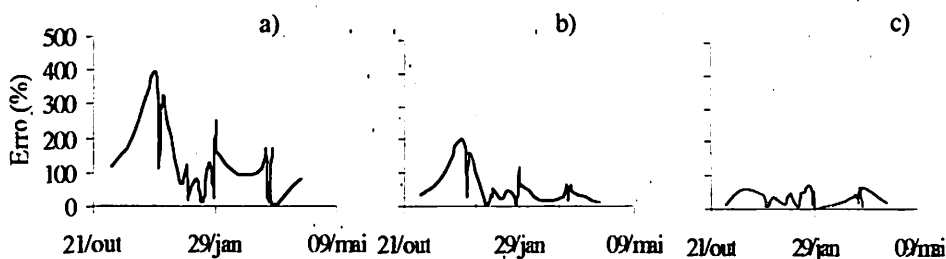


FIGURA 12. Comportamento dos erros produzidos pelos modelos para cada evento ao longo do tempo em microbacia hidrográfica da região de Lavras, MG (a – método SCS – Airport $t_p/t_c = 0,60$; b – método SCS – Airport $t_p/t_c = 1,167$; c – modelo desenvolvido).

É interessante destacar alguns aspectos conclusivos a respeito da modelagem aqui proposta, tanto para o deflúvio quanto para a vazão de pico. O objetivo principal é mostrar que, para aplicação do método CN-SCS a um modelo para simulação hidrológica, em especial para microbacias hidrográficas caracterizadas como de escoamento efêmero, é necessário que haja a introdução de algumas variáveis hidrológicas ao método, tomando possível a sua aplicação a eventos isolados e, conseqüentemente, a previsão do comportamento hidrológico na microbacia. Ficou demonstrado que as variáveis aqui propostas para caracterizar o deflúvio e a vazão de pico interagem fisicamente com as respostas hidrológicas da microbacia, daí o fato de o modelo ser considerado determinístico e apenas o ajuste matemático ser empírico, baseado em modelagem estatística, aproveitando-se os recursos computacionais disponíveis (Clarke, 2002; Tucci, 1998; Fendrich, 1984). Contudo, deve-se destacar que é importante que haja uma atualização constante dos parâmetros dos modelos para não se comprometer sua precisão, caracterizando um processo de previsão em tempo real, com os parâmetros sendo atualizados, se possível, a cada evento,

sendo esta uma das grandes vantagens deste tipo de modelagem, conforme já comentado.

4 CONCLUSÕES

- a) O método CN-SCS não pode ser aplicado a eventos isolados na forma como apresentado originalmente.
- b) A variável de entrada número da curva do método CN-SCS mostrou-se com alta variabilidade e sensibilidade ao longo do tempo, sendo diretamente influenciado pelas condições de umidade antecedente e características da precipitação, não sendo possível adotar um valor fixo de tabela para representar eventos isolados.
- c) As constantes sugeridas pelo método CN-SCS, associando t_p/t_c , t_r/t_a e A_i/S devem ser revistas, tanto para eventos isolados como para microbacias hidrográficas de escoamento efêmero.
- d) O cálculo do tempo de concentração, para a microbacia estudada, mostrou-se uma fonte de erros consideráveis quando se aplicam modelos que levam em consideração apenas características fisiográficas da microbacia, recomendando-se o método Airport para este fim, por este produzir valores mais coerentes.
- e) A modelagem baseada nas condições de umidade antecedente e características da precipitação pode ser aplicada para ajustar o método CN-SCS para previsão de deflúvio e vazão de pico, sendo de suma importância quando se busca a simulação hidrológica em microbacias.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARBOSA, P. S. F. Modelos de programação linear em recursos hídricos. In: PORTO, R. L. L. (Org.) **Técnicas quantitativas para o gerenciamento de recursos hídricos**. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1997. p. 97-164.

BERTONI, J. C.; TUCCI, C. E. M. Precipitação. In: TUCCI, C. E. M. (Org.) **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2. ed. Porto Alegre: ABRH/Editora UFRGS, 2001. p. 177-242.

BONTA, J. V. Determination of watershed curve number using derived distributions. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 123, n. 1, p. 28-36, Jan./Feb. 1997.

BRUN, G. W.; TUCCI, C. E. M. Previsão em tempo real do volume afluente ao reservatório de Ernestina. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 6, n. 2, p. 73-82, 2002.

CLARKE, R. T. Stochastic hydrology revisited. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 7, n. 4, p. 97-104, 2002.

CROKER, K. M.; YOUNG, A. R.; ZAIDMAN, M. D.; REES, H. G. Flow duration curve estimation in ephemeral catchments in Portugal. **Hydrological Science Journal**, Wallingford, v. 48, n. 3, p. 427-440, June 2003.

ESPÍRITO SANTO, C. M.; BRAGA, B.; LOBO, G. A.; FORTI, M. C.; MELFI, A. J. Simulação hidrológica de pequena bacia na Amazônia Tropical. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 6, n. 2, p. 107-118, abr./jun. 2001.

FENDRICH, R. **Modelação de hidrogramas multi-modais**. 1984. 174 p. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento).

FISCHER, E. G. **Proposição e aplicação de metodologia de gerenciamento integrado dos rios Corumbataí e Passa Cinco da bacia do Piracicaba por meio de banco de dados georreferenciado e modelagem matemática**. 2003. 110 p. Tese (Doutorado em Ciências, Energia Nuclear na Agricultura) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, USP, Piracicaba, SP.

GROVE, M.; HARBOR, J.; ENGEL, B. Composite Vs. distributed curve number: effects on estimates of storms runoff depths. **Journal of the American Water Resources Association**, Middleburg, v. 34, n. 5, p. 1015-1023, Oct. 1998.

HUGGINS, L. F.; BURNEY, J. R. Surface runoff, storage and routing. In: HAAN, C. T.; JOHNSON, H. P.; BRAKENSIEK, D. L. **Hydrologic modeling os small watersheds**. St. Joseph: American Society of Agricultural Engineering, 1982. p. 169-228.

KIRPICH, P. Z. Time of concentration of small agricultural watersheds. **Civil Engineering**, Easton, v. 10, n. 6, June 1940.

LEWIS, D.; SINGER, M. J.; TATE, K. W. Applicability of SCS Curve Number Method for a California Oak Woodlands Watershed. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankery, n. 2, p. 226-230, Autum 2000.

MACHADO, R. E. **Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento**. 2002. 152 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP.

PERRONE, J.; MADRAMOOTOO, C. A.; LAPP, P. Hydrologic characteristics of an agricultural watershed in rural Quebec. **Canadian Agricultural Engineering**, Mansoville, v. 40, n. 2, Apr./June 1998.

QUINTELA, A. C.; PORTELA, M. M. A modelação hidrológica em Portugal nos últimos 25 anos do século XX, nas perspectivas determinística, probabilística e estocástica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 7, n. 4, p. 51-64, 2002.

RIGHETTO, A. M. **Hidrologia e recursos hídricos**. São Carlos: EESC/USP, 1998. 840 p.

ROCHA, J. S. M. **Manual de projetos ambientais**. Santa Maria: Imprensa Universitária, 1997. 423 p.

SHEEDER, S. A.; ROSS, J. D.; CARLSON, T. N. Dual urban and rural hydrograph signals in three small watersheds. **Journal of the American Water Resources Association**, Middleburg, v. 38, n. 4, p. 1027-1040, Aug. 2002.

SILVA, A. M.; MELLO, C. R. de; OLIVEIRA, P. M. Gestão e manejo de recursos hídricos em áreas de pastagens – aspectos técnicos e legais. In: EVANGELHISTA, A. R.; REIS, S. T.; GOMIDE, E. M. (Ed.). **Forrageicultura e pastagens – temas em evidência: sustentabilidade**. Lavras: Editora UFLA, 2003. p. 1-47.

SILVEIRA, L.; CHARBONNIER, F.; GENTA, J. L. The antecedent soil moisture condition of the curve number procedure. **Hydrological Science Journal**, Wallingford, v. 45, n. 1, p. 3-12, Feb. 2000.

STATISTICAL ANALYSES SYSTEM. **Language guide for personal computers**. 6. ed. Cary: SAS Instituto, 1985. 429 p.

SUAREZ, G. A. S. **Abstração inicial de uma bacia hidrográfica de floresta natural na região de Viçosa, MG**. 1995. 54 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

TUCCI, C. E. M. Escoamento superficial. In: TUCCI, C. E. M. (Org.) **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2. ed. Porto Alegre: ABRH/Editora UFRGS, 2001. p. 391-441.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 1998. 669 p.

YE, W.; BATES, B. C.; VINEY, N. R.; SIVAPALAN, M. Performance of conceptual rainfall-runoff models in low-yielding ephemeral catchments. **Water Resources Research**, Washington, v. 33, n. 1, p. 153-166, 1997.

YUAN, Y.; MITCHELL, J. K.; HIRSCHI, M. C.; COOKE, R. A. C. Modified SCS Curve Number Method for predicting subsurface drainage flow. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 44, n. 6, p. 1673-1682, Nov./Dec. 2001.

ANEXOS

Tabela		Página
TABELA 1A	Valores das variáveis hidrológicas monitoradas e calculadas no período de nov/02 a abril/03 em microbacia hidrográfica com regime de escoamento efêmero, na região de Lavras, MG...	122
TABELA 2A	Continuação dos valores das variáveis hidrológicas monitoradas e calculadas no período de nov/02 a abril/03 em microbacia hidrográfica com regime de escoamento efêmero, na região de Lavras, MG	124
TABELA 3A	Atributos físico-hídricos para o Cambissolo, nas 3 camadas trabalhadas, em microbacia hidrográfica com regime de escoamento efêmero, na região de Lavras, MG	126
TABELA 4A	Genuchten ajustados, para as 3 camadas trabalhadas do Cambissolo, em microbacia hidrográfica com regime de escoamento efêmero da região de Lavras, MG	128

TABELA 1A Valores das variáveis hidrológicas monitoradas e calculadas no período de nov/02 a abril/03 em microbacia hidrográfica com regime de escoamento efêmero, na região de Lavras, MG.

Data dos Eventos	ES (mm)	P (mm)	Ai (mm)	I ₁₀ (mm/h)	I (mm/h)	Qp (l/s)	ta (min)	NC	tr/ta
10/04/03	0,210	22,34	6,09	35,04	6,38	0,843	40	17,0	1,07
17/03/03	0,224	14,97	3,56	38,10	8,17	1,100	30	30,8	1,26
16/03/03	0,279	10,14	2,03	38,10	6,76	0,843	30	52,7	2,70
13/03/03	2,203	20,04	5,58	45,72	10,02	9,300	20	75,9	2,95
12/03/03	1,415	28,45	7,62	27,42	7,11	3,514	30	47,1	3,47
11/03/03	0,661	36,56	16,00	42,66	10,45	2,333	20	29,1	3,72
08/03/03	0,158	21,57	13,20	30,48	5,88	0,843	30	36,9	1,08
17/02/03	0,228	17,01	4,06	36,60	8,51	0,843	20	26,2	3,50
30/01/03	0,700	9,39	5,33	10,68	3,31	1,848	30	92,9	3,10
29/01/03	3,720	37,81	5,59	97,56	6,67	12,282	20	50,7	4,10
29/01/03	2,540	28,71	2,79	56,40	7,83	6,681	20	51,6	5,30
28/01/03	2,620	27,93	2,79	31,98	9,31	7,342	20	54,0	4,90
28/01/03	0,345	5,59	2,29	16,74	6,71	1,100	30	90,0	2,48
27/01/03	1,560	14,71	4,05	27,42	5,19	7,562	20	80,3	2,40
27/01/03	0,804	17,02	0,00	35,04	9,28	3,514	30	42,5	1,54
23/01/03	0,190	9,90	0,00	39,60	9,90	0,843	20	33,4	2,80
19/01/03	1,790	35,30	0,51	96,00	19,25	11,224	20	28,4	1,70
16/01/03	0,289	17,53	7,11	41,16	21,04	1,602	30	41,0	1,00
13/01/03	0,343	20,30	0,25	47,22	13,53	1,100	40	18,1	1,60
06/01/03	0,160	6,60	0,00	12,18	4,95	0,843	30	48,9	1,30
06/01/03	0,130	7,34	0,76	13,74	3,15	0,579	20	43,8	2,60
05/01/03	0,180	11,43	6,09	28,98	9,80	0,843	20	62,4	2,90
02/01/03	0,177	13,71	8,13	24,36	11,75	0,843	20	60,0	2,50
01/01/03	0,333	18,28	5,33	39,60	21,90	1,602	40	34,1	0,70

TABELA 1A, continua ...

Data dos Eventos	ES (mm)	P (mm)	Ai (mm)	I ₁₀ (mm/h)	I (mm/h)	Qp (l/s)	ta (min)	NC	tr/ta
21/12/02	0,200	21,58	0,51	70,08	14,39	0,579	20	10,4	4,70
16/12/02	0,468	18,29	2,80	27,42	6,46	1,602	40	33,8	1,43
14/12/02	0,620	34,53	8,38	88,38	29,60	3,046	20	19,1	2,40
11/12/02	0,374	40,63	4,58	57,90	10,16	0,843	10	6,90	13,80
21/11/02	0,261	16,50	5,84	19,80	5,21	0,843	20	37,4	4,20
04/11/02	0,228	20,83	2,54	79,26	25,00	0,843	20	14,9	3,5

TABELA 2A Continuação dos valores das variáveis hidrológicas monitoradas e calculadas no período de nov/02 a abril/03 em microbacia hidrográfica com regime de escoamento efêmero, na região de Lavras, MG.

Data dos Eventos	Fator C	V1 (mm)	V1/ES	De (min)	ti (min)	Dc (min)	θ_{20}	θ_{50}	θ_{80}
10/04/03	0,009	0,1011	0,483	80	130	210	0,278	0,333	0,569
17/03/03	0,015	0,0990	0,442	80	20	110	0,734	0,846	0,786
16/03/03	0,028	0,0758	0,272	100	20	90	0,709	0,789	0,803
13/03/03	0,110	0,3069	0,139	170	30	120	0,684	0,732	0,820
12/03/03	0,050	0,2214	0,160	170	120	240	0,682	0,687	0,672
11/03/03	0,018	0,0770	0,114	100	130	210	0,680	0,642	0,474
08/03/03	0,007	0,0531	0,335	70	150	220	0,314	0,275	0,324
17/02/03	0,013	0,0556	0,244	90	20	120	0,320	0,335	0,578
30/01/03	0,075	0,1331	0,1945	150	120	170	0,839	0,906	0,930
29/01/03	0,100	0,5159	0,1386	350	50	340	0,838	0,922	0,965
29/01/03	0,088	0,2406	0,0949	260	40	220	0,821	0,917	0,963
28/01/03	0,094	0,2643	0,1011	210	40	180	0,821	0,915	0,950
28/01/03	0,062	0,0726	0,2105	110	40	50	0,815	0,915	0,950
27/01/03	0,106	0,2722	0,1745	180	80	170	0,809	0,912	0,895
27/01/03	0,047	0,2319	0,2884	130	10	110	0,803	0,910	0,862
23/01/03	0,019	0,0303	0,1586	70	10	60	0,835	0,916	0,921
19/01/03	0,051	0,7071	0,3954	130	20	110	0,732	0,885	0,818
16/01/03	0,017	0,1298	0,448	90	40	50	0,697	0,776	0,733
13/01/03	0,017	0,1221	0,356	100	20	90	0,697	0,813	0,778
06/01/03	0,024	0,0935	0,535	70	10	80	0,739	0,791	0,837
06/01/03	0,018	0,0295	0,234	70	20	140	0,718	0,763	0,714
05/01/03	0,016	0,0430	0,221	90	60	70	0,696	0,736	0,591
02/01/03	0,013	0,0430	0,243	80	40	70	0,611	0,619	0,569
01/01/03	0,018	0,1778	0,533	80	20	50	0,525	0,501	0,546

TABELA 2A, continua ...

Data dos Eventos	Fator C	Vl (mm)	Vl/ES	De (min)	ti (min)	Dc (min)	θ_{20}	θ_{50}	θ_{80}
21/12/02	0,010	0,0278	0,140	110	20	90	0,670	0,855	0,768
16/12/02	0,026	0,2211	0,473	110	60	170	0,740	0,774	0,698
14/12/02	0,020	0,1462	0,236	120	30	70	0,737	0,765	0,657
11/12/02	0,010	0,0152	0,041	170	30	240	0,258	0,252	0,269
21/11/02	0,016	0,0405	0,155	90	100	190	0,384	0,419	0,346
04/11/02	0,011	0,0657	0,289	90	20	50	0,401	0,366	0,251

TABELA 3A Atributos físico-hídricos para o Cambissolo, nas 3 camadas trabalhadas, em microbacia hidrográfica com regime de escoamento efêmero, na região de Lavras, MG.

Ponto	Camada cm	Ds (kg/dm ³)	Argila	Areia	Silte	C org. %	PT	Macroporosidade	Microporosidade
1	0-20	1,57	27,0	43,0	30,0	1,0	52,1	11,5	40,6
	20-50	1,48	28,0	42,0	30,0	0,6	49,1	15,5	33,6
	50-80	1,50	25,0	22,0	53,0	0,5	49,0	17,5	31,5
2	0-20	1,54	30,0	41,0	29,0	0,7	45,7	11,5	34,2
	20-50	1,32	27,0	40,0	33,0	0,6	51,8	16,3	35,5
	50-80	1,56	28,0	37,0	35,0	0,4	45,6	12,6	33,0
3	0-20	1,47	25,0	43,0	32,0	1,0	48,0	11,1	36,9
	20-50	1,26	29,0	36,0	35,0	0,7	53,6	19,3	34,3
	50-80	1,40	24,0	39,0	37,0	0,5	52,6	17,8	34,8
4	0-20	1,46	24,0	38,0	38,0	0,8	50,8	15,7	35,1
	20-50	1,59	29,0	32,0	39,0	0,6	45,5	12,6	32,9
	50-80	1,52	21,0	34,0	45,0	0,4	51,7	13,3	38,4
5	0-20	1,34	41,0	41,0	18,0	1,1	59,9	15,8	44,1
	20-50	1,52	27,0	48,0	25,0	0,4	47,8	13,3	34,5
	50-80	1,43	23,0	31,0	46,0	0,4	51,7	13,6	38,1
6	0-20	1,42	13,0	62,0	25,0	1,2	53,0	14,3	38,7
	20-50	1,36	18,0	49,0	33,0	0,4	45,6	12,1	33,5
	50-80	1,42	20,0	44,0	36,0	0,3	35,9	8,2	27,7
7	0-20	1,48	23,9	50,3	25,8	1,2	51,6	16,6	35,0
	20-50	1,45	23,7	46,9	29,4	0,8	46,2	12,8	33,4
	50-80	1,55	20,8	42,3	36,9	0,3	47,5	13,6	33,9
8	0-20	1,42	23,9	50,3	25,8	1,6	50,2	12,3	37,9
	20-50	1,49	23,7	46,9	29,4	1,5	52,5	17,0	35,5
	50-80	1,49	20,8	42,3	36,9	1,0	45,0	12,4	32,6

TABELA 3A, continua ...

Ponto	Camada cm	Ds (kg/dm ³)	Argila	Areia	Silte	C org. %	PT	Macroporosidade	Microporosidade
9	0-20	1,63	23,9	50,3	25,8	1,3	41,2	15,8	25,4
	20-50	1,57	23,7	46,9	29,4	0,8	37,3	14,2	23,1
	50-80	1,40	20,8	42,3	36,9	0,8	38,6	14,7	23,9
10	0-20	1,62	13,0	74,0	13,0	1,3	47,2	13,9	33,3
	20-50	1,64	15,0	68,0	17,0	0,2	42,4	6,6	35,8
	50-80	1,42	9,0	72,0	19,0	0,2	37,4	8,9	28,5
11	0-20	1,57	19,0	60,0	21,0	1,3	46,8	16,0	30,8
	20-50	1,62	17,0	60,0	23,0	1,1	44,2	12,2	32,0
	50-80	1,62	17,0	59,0	24,0	0,8	40,5	10,9	29,6
12	0-20	1,55	23,9	50,3	25,8	2,0	52,6	11,4	41,2
	20-50	1,41	23,7	46,9	29,4	1,4	55,6	19,3	36,3
	50-80	1,40	20,8	42,3	36,9	1,1	50,6	17,9	32,7

TABELA 4A Modelos de Genuchten ajustados, para as 3 camadas trabalhadas do Cambissolo, em microbacia hidrográfica com regime de escoamento efêmero da região de Lavras, MG.

Ponto	Camada (cm)	Modelo de Genuchten ajustado
1	0-20	$\theta = 0,215 + (0,307) \cdot \left[\frac{1}{1 + (0,06403 \cdot \psi_m)^{1,32523}} \right]^{0,24542}$
	20-50	$\theta = 0,205 + (0,286) \cdot \left[\frac{1}{1 + (0,15115 \cdot \psi_m)^{1,3431}} \right]^{0,25543}$
	50-80	$\theta = 0,201 + (0,289) \cdot \left[\frac{1}{1 + (0,2274 \cdot \psi_m)^{1,3461}} \right]^{0,25713}$
2	0-20	$\theta = 0,196 + (0,260) \cdot \left[\frac{1}{1 + (0,10688 \cdot \psi_m)^{1,2628}} \right]^{0,2081}$
	20-50	$\theta = 0,205 + (0,312) \cdot \left[\frac{1}{1 + (0,16705 \cdot \psi_m)^{1,3205}} \right]^{0,2427}$
	50-80	$\theta = 0,234 + (0,221) \cdot \left[\frac{1}{1 + (0,1832 \cdot \psi_m)^{1,3361}} \right]^{0,2516}$
3	0-20	$\theta = 0,215 + (0,265) \cdot \left[\frac{1}{1 + (0,07628 \cdot \psi_m)^{1,31381}} \right]^{0,23886}$

TABELA 4A, continua ...

Ponto	Camada (cm)	Modelo de Genuchten ajustado
4	20-50	$\theta = 0,210 + (0,327) \cdot \left[\frac{1}{1 + (0,24879 \cdot \psi_m)^{1,3315}} \right]^{-0,24898}$
	50-80	$\theta = 0,226 + (0,298) \cdot \left[\frac{1}{1 + (0,22475 \cdot \psi_m)^{1,2966}} \right]^{-0,22873}$
5	0-20	$\theta = 0,260 + (0,248) \cdot \left[\frac{1}{1 + (0,20401 \cdot \psi_m)^{1,38401}} \right]^{-0,27746}$
	20-50	$\theta = 0,238 + (0,217) \cdot \left[\frac{1}{1 + (0,18118 \cdot \psi_m)^{1,3254}} \right]^{-0,24551}$
5	50-80	$\theta = 0,231 + (0,286) \cdot \left[\frac{1}{1 + (0,1387 \cdot \psi_m)^{1,2771}} \right]^{-0,21697}$
	0-20	$\theta = 0,254 + (0,344) \cdot \left[\frac{1}{1 + (0,13242 \cdot \psi_m)^{1,26604}} \right]^{-0,21014}$
5	20-50	$\theta = 0,214 + (0,266) \cdot \left[\frac{1}{1 + (0,12884 \cdot \psi_m)^{1,33174}} \right]^{-0,2491}$

TABELA 4A, continua ...

Ponto	Camada (cm)	Modelo de Genuchten ajustado
6	50-80	$\theta = 0,223 + (0,293) \cdot \left[\frac{1}{1 + (0,14098 \cdot \psi_m)^{1,30374}} \right]^{-0,23297}$
	0-20	$\theta = 0,206 + (0,323) \cdot \left[\frac{1}{1 + (0,10545 \cdot \psi_m)^{1,29633}} \right]^{-0,22859}$
	20-50	$\theta = 0,215 + (0,240) \cdot \left[\frac{1}{1 + (0,088245 \cdot \psi_m)^{1,39798}} \right]^{-0,28468}$
7	50-80	$\theta = 0,138 + (0,221) \cdot \left[\frac{1}{1 + (0,06128 \cdot \psi_m)^{1,30335}} \right]^{-0,23275}$
	0-20	$\theta = 0,234 + (0,282) \cdot \left[\frac{1}{1 + (0,23814 \cdot \psi_m)^{1,32108}} \right]^{-0,24305}$
	20-50	$\theta = 0,203 + (0,259) \cdot \left[\frac{1}{1 + (0,10475 \cdot \psi_m)^{1,3291}} \right]^{-0,24761}$
	50-80	$\theta = 0,203 + (0,272) \cdot \left[\frac{1}{1 + (0,10717 \cdot \psi_m)^{1,3386}} \right]^{-0,2530}$

TABELA 4A, continua ...

Ponto	Camada (cm)	Modelo de Genuchten ajustado
8	0-20	$\theta = 0,170 + (0,332) \cdot \left[\frac{1}{1 + (0,03062 \cdot \psi_m)^{1,5866}} \right]^{0,3697}$
	20-50	$\theta = 0,178 + (0,347) \cdot \left[\frac{1}{1 + (0,07822 \cdot \psi_m)^{1,4423}} \right]^{0,30667}$
	50-80	$\theta = 0,165 + (0,285) \cdot \left[\frac{1}{1 + (0,05755 \cdot \psi_m)^{1,45267}} \right]^{0,31161}$
9	0-20	$\theta = 0,137 + (0,275) \cdot \left[\frac{1}{1 + (0,20349 \cdot \psi_m)^{1,3251}} \right]^{0,24534}$
	20-50	$\theta = 0,077 + (0,296) \cdot \left[\frac{1}{1 + (0,0959 \cdot \psi_m)^{1,3533}} \right]^{0,26107}$
	50-80	$\theta = 0,092 + (0,294) \cdot \left[\frac{1}{1 + (0,1251 \cdot \psi_m)^{1,32212}} \right]^{0,24364}$
10	0-20	$\theta = 0,165 + (0,307) \cdot \left[\frac{1}{1 + (0,06355 \cdot \psi_m)^{1,45799}} \right]^{0,31413}$

TABELA 4A, continua ...

Ponto	Camada (cm)	Modelo de Genuchten ajustado
11	20-50	$\theta = 0,159 + (0,265) \cdot \left[\frac{1 + (0,01630 \cdot \psi^m)^{1,62488}}{1} \right]$ -0,38457
	50-80	$\theta = 0,187 + (0,187) \cdot \left[\frac{1 + (0,07782 \cdot \psi^m)^{1,36992}}{1} \right]$ -0,27003
	0-20	$\theta = 0,182 + (0,286) \cdot \left[\frac{1 + (0,15561 \cdot \psi^m)^{1,34037}}{1} \right]$ -0,25394
	20-50	$\theta = 0,191 + (0,251) \cdot \left[\frac{1 + (0,09531 \cdot \psi^m)^{1,3296}}{1} \right]$ -0,24788
	50-80	$\theta = 0,171 + (0,234) \cdot \left[\frac{1 + (0,0912 \cdot \psi^m)^{1,33824}}{1} \right]$ -0,25275
	0-20	$\theta = 0,248 + (0,278) \cdot \left[\frac{1 + (0,05467 \cdot \psi^m)^{1,38509}}{1} \right]$ -0,27802
12	0-20	$\theta = 0,219 + (0,337) \cdot \left[\frac{1 + (0,19202 \cdot \psi^m)^{1,32361}}{1} \right]$ -0,24449
	20-50	

TABELA 4A, continua ...

Ponto	Camada (cm)	Modelo de Genuchten ajustado
	50-80	$\theta = 0,195 + (0,311) \cdot \left[\frac{1}{1 + (0,24969 \cdot \psi_m)^{1,30662}} \right]^{0,23467}$

