

Recebido em 15 de Maio de 1984

## Modelos de exaurimento.

### 3 - Aplicação à caracterização hidrológica de pequenas bacias florestais

por

**LUIS SANTOS PEREIRA**

Professor Catedrático do Instituto Superior de Agronomia  
Investigador do Centro de Estudos de Engenharia Rural da UTL

#### *RESUMO*

A primeira parte deste artigo descreve uma metodologia para obtenção de curvas tipo de exaurimento (CTE) em pequenas bacias, sendo igualmente referida a obtenção das curvas envolventes de exaurimento. Aplicando este método a onze pequenas bacias florestais e, posteriormente, descrevendo as correspondentes CTE através de um modelo exponencial de três termos (MEC3), obtêm-se os parâmetros de exaurimento característicos dos diversos componentes do escoamento, bem como os respectivos volumes de escoamento.

No sentido de explicar a variação de tais parâmetros característicos utilizou-se a análise de regressão múltipla, tomando-se como variáveis explicativas alguns parâmetros que caracterizam a geomorfologia e a cobertura vegetal das bacias em estudo. Os resultados obtidos mostraram que o modelo exponencial de três termos descreve adequadamente o exaurimento, sendo cada um dos seus termos característico de um componente do escoamento — escoamento directo, escoamento subsuperficial e escoamento de base — o que permite concluir do seu interesse na modelação do escoamento em pequenas bacias.

#### *RÉSUMÉ*

On décrit d'abord une méthode pour obtenir les courbes types de tarissement (CTE) des petits bassins, suivi de la référence à l'obtention des courbes enveloppes de tarissement, aussi caractéristiques des petits bassins versants. La méthode

était appliquée à onze petite bassins de montagne et les CTE obtenues ont été étudiées par un modèle exponentiel à trois termes (MEC 3) ce qui a permis le calcul des paramètres du tarissement qui caractérisent les composants de l'écoulement et les volumes qui leur correspondent.

Par la suite, on a utilisé l'analyse de regression multiple pour expliquer la variation de tels paramètres caractéristiques en prenant comme variables explicatives des paramètres qui caractérisent la géomorphologie et la couverture végétale des bassins étudiés. Les résultats obtenus montrent que le modèle exponentiel à trois termes décrit bien le tarissement, chaque terme se rapportant à chacun des composants de l'écoulement: écoulement direct, écoulement sous-superficiel et écoulement de base. On a pu ainsi conclure que ce modèle MEC 3 peut être utilisé avec avantage pour la modelation de l'écoulement des petits bassins versants.

#### SYNOPSIS

It is first described a method proposed to fit the characteristic recession curves (CTE) of small catchments, also being done a reference to the envelop recession curves. That method is applied to eleven small basins and the obtained curves are described by an exponential model with three terms (MEC 3). So the characteristic recession parameters are obtained, as well as the correspondent flow volumes.

The variation of such recession parameters have been studied using multiple regression analysis. The explanatory variables concern some geomorphologic and vegetation cover characteristics. Results show that the exponential model with three terms well explain the recession process, each term describing one flow component: direct flow, subsurface flow and base flow. Therefore it is possible to conclude about the interest of model MEC 3 for streamflow modelling in small basins.

## 1. INTRODUÇÃO

A caracterização hidrológica das pequenas bacias de apanhamento, nomeadamente florestais, tem sido feita por vários métodos, entre os quais pelo recurso ao estudo do regime de exaurimento. Para tanto torna-se necessário, pela análise dos hidrogramas de escoamento, obter as curvas que tipificam a resposta das bacias e, pela aplicação de modelos, caracterizar os componentes do escoamento. Assim, conhecidas já as potencialidades dos diversos modelos de exaurimento e encontrada a forma de optimização dos seus parâmetros, apresenta-se de seguida a definição das curvas tipo de exaurimento e a análise estatística da variação dos parâmetros do exaurimento com características geomorfológicas e de cobertura vegetal de diversas bacias estudadas.

## 2. CARACTERIZAÇÃO DO REGIME DE EXAURIMENTO DUMA BACIA. OBTENÇÃO DAS CURVAS TIPO DE EXAURIMENTO

### 2.1. Aspectos gerais

Uma curva de exaurimento que se segue a um dado acontecimento pluvioso é, em geral, diferente de outra curva relativa a uma chuvada distinta. Tais diferenças na resposta da bacia, em termos de escoamento subsuperficial e de base, devem-se às distintas condições de recarga entre um e outro acontecimento, às diferentes condições de armazenamento na bacia e, ainda, à natureza das perdas por evapotranspiração e infiltração profunda.

As diferenças nas respostas variam, porém, com as condições hidrogeológicas prevalecentes, com as características fisiográficas da bacia e com o coberto vegetal. Tratando-se de respostas de aquíferos, serão mais rápidas e induzem maior variação as que correspondem a aquíferos superficiais e em contacto hidráulico com o curso de água; serão mais lentas e de menor variabilidade as relativas a aquíferos profundos, nomeadamente confinados. Quando as observações dizem respeito a águas superficiais, a variação será forçosamente maior em pequenas bacias, muito influenciadas pelas precipitações antecedentes, enquanto em grandes bacias a variação é sobretudo devida às flutuações de longo prazo das precipitações.

Estas considerações concordam com a análise que apresentámos (Pereira, 1984a) acerca da influência da recarga, positiva (precipitação infiltrada) ou negativa (perdas por evapotranspiração e por infiltração profunda), sobre as curvas de exaurimento (alterando a sua forma mas sem incidir sobre a definição do coeficiente de exaurimento do modelo MES). Nestas condições, a caracterização do regime de exaurimento de uma dada bacia implica a construção da *curva tipo de exaurimento* (CTE) a partir de um conjunto de curvas de exaurimento observadas.

A CTE define-se assim como sendo a curva que, representando as condições típicas de exaurimento durante um dado período de observações, caracteriza o exaurimento para dadas condições do regime de recarga da bacia. Esta definição implica que a cada estação climo-hidrológica deverá corresponder uma CTE específica, já que os regimes de precipitação e de evapotranspiração variam de uma estação para outra modificando as influências da recarga.

Alguns autores preferem caracterizar o exaurimento através das *curvas envolventes do exaurimento* já que não se torna necessário definir condições típicas. Porém, uma vez que as curvas envolventes caracterizam o esgotamento mais lento possível a partir de condições máximas de armazenamento na bacia (Pereira, 1978b), tais curvas apenas traduzem efeitos da recarga positiva e desprezam os efeitos das perdas; não podem assim tomar-se para a caracterização do exaurimento, sendo embora de utilidade quando conjugadas com as CTE (Fig. 1).

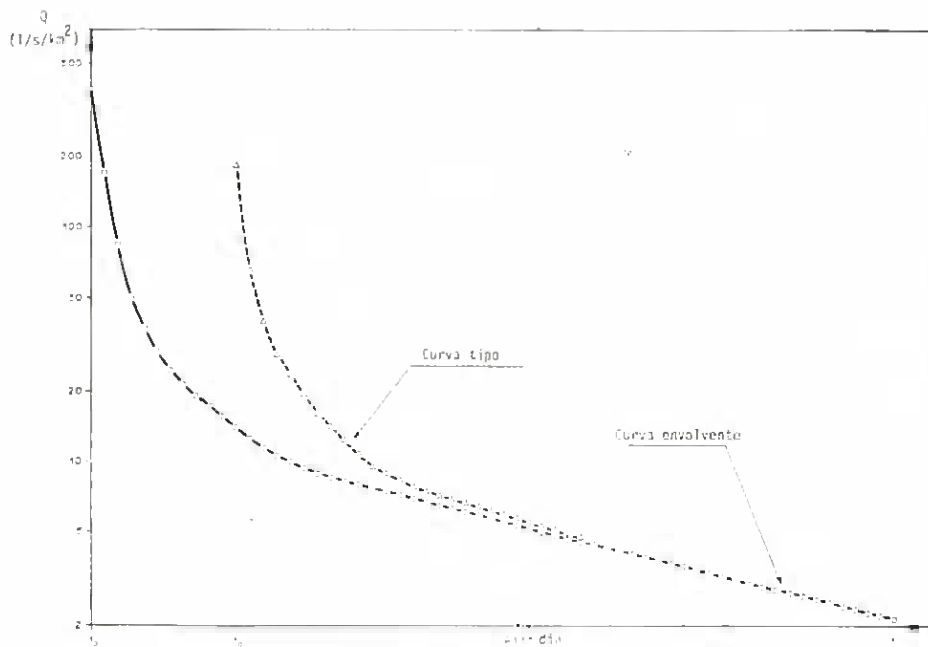


Fig. 1 — As curvas tipo e envolvente de exaurimento da bacia Vogelbach relativas à estação outonal.

## 2.2. Construção das curvas tipo de exaurimento

Numerosos métodos têm sido utilizados para obtenção das CTE: o método da correlação, o método da tabulação e o método da banda

de papel, os quais poderemos considerar como métodos clássicos, descritos por Toebes e Ouryvaev (1970); o método da representação gráfica com origem arbitrária para as curvas (Trainer e Watkins, 1974); o método do ajustamento simultâneo de várias curvas de esgotamento, em particular através do modelo MED (Snyder, 1962); o método dos coeficientes de exaurimento médios (Farvolden, 1971); o método da ordenação de caudais (Federer, 1973).

Estes métodos, porém, ou são de aplicação demorada e de difícil adaptação ao cálculo automático, ou realmente seguem vias demasiado simplificadas e modelos menos adequados; em geral, são de precisão difícil de avaliar.

No sentido de ultrapassar estas dificuldades, elaborou-se um método, embora trabalhoso, adaptado ao cálculo por computador e utilizando métodos estatísticos necessários ao controlo do seu rigor de aplicação. Trata-se do método dos segmentos de exaurimento (Pereira, 1977) para o qual se dispõe de programas de cálculo (Pereira, 1978a).

Naturalmente, inspira-se nos métodos citados atrás. Baseia-se no facto de que uma curva completa de exaurimento traduz a resposta da bacia quanto aos diferentes componentes e origens de escoamento e descreve, portanto, uma situação de exaurimento composto. Assim sendo, é sempre possível definir essa curva através de uma sequência de segmentos ajustáveis por um modelo de exaurimento simples, isto é, através dos correspondentes parâmetros  $Q_0$  e  $\alpha$  (solução aliás adoptada por Burnash *et al.* (1973) para a obtenção dos parâmetros do seu modelo de escoamento). Consequentemente, da combinação adequada de tais segmentos pode obter-se uma curva resultante descrita por uma sequência de segmentos de exaurimento simples, solução também adoptada por outros autores (Singh e Stall, 1971; Federer, 1973).

A associação das curvas completas de exaurimento deve, no entanto, fazer-se para as estações climo-hidrológicas em que sejam similares as condições de alimentação, de armazenamento e de perdas (em particular por evapotranspiração). Assim, antecedendo a aplicação do método, é forçosa a definição de tais estações de forma a assegurar condições similares do regime de exaurimento. A importância de estacionalidade nos fenómenos de exaurimento foi aliás claramente demonstrada estatisticamente (Jones e McGilchrist, 1978).

### 3. O MÉTODO DOS SEGMENTOS DE EXAURIMENTO

#### 3.1. Descrição sumária do método

a) Usando uma representação semilogarítmica para o hidrograma dos caudais médios diários (Pereira 1975a) realiza-se a escolha das curvas de exaurimento a utilizar para a CTE, excluindo todos os períodos influenciados por precipitação (Fig. 2).

b) Com base no mesmo hidrograma (Fig. 2), escolha dos segmentos de exaurimento que podem ser caracterizados por um modelo de exaurimento simples, em geral o modelo MES, como anteriormente se justificou (Pereira, 1984a).

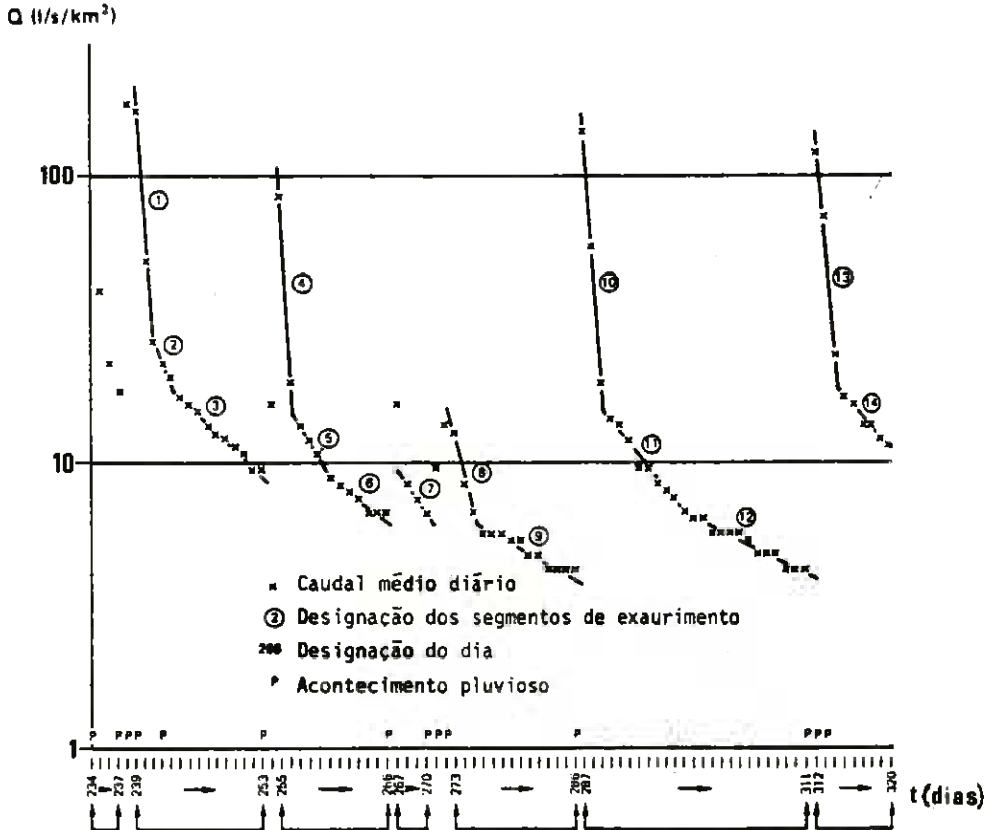


Fig. 2 — Escolha de segmentos de exaurimento a partir de um hidrograma do escoamento diário.

c) Obtenção dos parâmetros  $Q_0$  e  $\alpha$  por ajustamento do modelo MES

$$Q = Q_0 \exp(-\alpha t) \tag{1}$$

a cada um dos segmentos; nestes ajustamentos devem igualmente ser calculados os estimadores estatísticos relativos aos resíduos do ajustamento e à variação dos parâmetros, como é o caso do coeficiente de variação  $Cv$  (Pereira, 1975b).

d) Estudo das relações  $\alpha = f(Q_0)$  para o conjunto dos segmentos ajustados através da representação semi-logarítmica ( $\alpha, Q_0$ ) (Fig. 3), eliminando os resultados aberrantes.

e) Definição dos grupos de segmentos <sup>(1)</sup> através da forma como

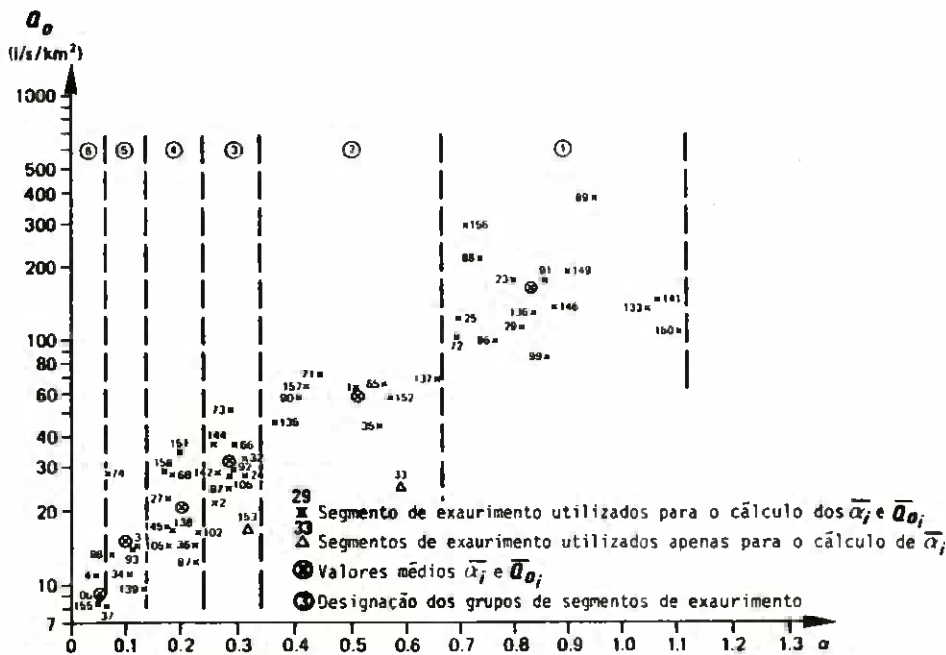


Fig. 3 — Relação entre os parâmetros  $\alpha$  e  $Q_0$  dos segmentos de exaurimento; definição dos grupos de segmentos utilizados para a definição da CTE.

(1) Por hipótese, a cada grupo de segmentos de exaurimento deverá corresponder escoamento com as mesmas origens e, portanto, os segmentos a agrupar em cada classe deverão ter características semelhantes.

se agrupam os pontos  $(\alpha, Q_0)$ , como exemplificado na Fig. 3, ou através do cálculo dos intervalos de classe

$$\Delta\alpha = (\alpha_{\max} - \alpha_{\min}) / \sum_{k=0}^m 2^{2k} \quad (k = 0, 1, 2, \dots, m) \quad (2)$$

em que  $\alpha_{\max}$  e  $\alpha_{\min}$  são os valores extremos observados para  $\alpha$ , e  $m$  é o número de classes (5 a 7). Nestas condições podemos escolher os limites das classes ou grupos

$$\alpha'_k = (2k + 1) \Delta\alpha \quad (3)$$

com  $k$  crescente com  $\alpha$ .

f) Cada grupo  $i$ , de dimensão  $n_i$ , é então caracterizado pelos valores médios

$$\bar{\alpha}_i = \frac{\sum_{j=1}^{n_i} w_{i,j} \alpha_{i,j}}{\sum_{j=1}^{n_i} w_{i,j}} \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (4)$$

$(j = 1, 2, \dots, n_i)$

$$\bar{Q}_{o_i} = \frac{\sum_{j=1}^{n_i} Q_{o_{i,j}}}{n_i} \quad (5)$$

em que os pesos

$$w_{i,j} = Cv_{i,j} / N_{i,j} \quad (6)$$

são definidos através dos coeficientes de variação  $Cv$  relativos a cada segmento de exaurimento, como referido em c), e pela dimensão  $N$  de tais segmentos.

g) Para assegurar que os parâmetros  $\bar{\alpha}_i$  e  $\bar{Q}_{o_i}$  definem segmentos de exaurimento estatisticamente diferentes daqueles dos grupos vizinhos, devem realizar-se testes estatísticos adequados, nomeadamente o teste do  $t$  de Student, o qual além disso proporciona o conhecimento dos intervalos de confiança dos  $\alpha_i$  e  $Q_{o_i}$ .

*h)* A cada grupo de segmentos, através do par  $(\bar{\alpha}_i, \bar{Q}_{o_i})$ , corresponde um segmento da CTE pretendida

$$Q_t = \bar{Q}_{o_i} \exp(-\bar{\alpha}_i t) \quad (\bar{Q}_{o_i} \geq Q_t \geq \bar{Q}_{o_{i+1}}) \quad (7)$$

De preferência, a CTE será expressa através de

$$Q_t = \bar{Q}_{o_i} \exp \{ -\bar{\alpha}_i (t - t_{i-1}) \} \quad (t_i \geq t > t_{i-1}) \quad (8)$$

em que os intervalos de tempo são definidos por

$$t = t_{i-1} + \Delta t_i \quad (9)$$

com

$$\Delta t_i = (\ln \bar{Q}_{o_i} - \ln \bar{Q}_{o_{i+1}}) / \bar{\alpha}_i \quad (10)$$

A expressão (8) constitui assim um modelo exponencial para representação da CTE, que tem como valores extremos  $Q_{o_i}$  e  $Q_{m i n}$ , sendo este definido pela média dos valores mínimos de  $Q$  dos segmentos incluídos no grupo  $m$ .

### 3.2. Breve análise dos resultados da aplicação do método proposto

O método dos segmentos de exaurimento, atrás enunciado, foi aplicado para a obtenção das CTE das onze bacias dos Pré-Alpes suíços adiante descritas. Considerando os regimes hidrológicos e das precipitações prevaletentes nas regiões em estudo, consideraram-se três estações: a de Primavera-Verão (iniciada após a fusão das neves e terminando em Agosto), a de Outono (de Agosto-Setembro até à acumulação de neve) e a de crescimento vegetativo, incluindo portanto ambas as anteriores <sup>(2)</sup> e relativa a todo o período não influenciado pela neve.

Como exemplo de resultados, apresentam-se, no Quadro 3 e na Fig. 4, as CTE relativas à bacia do Sperbelgraben, mostrando com evidência os efeitos de estacionalidade atrás apontados.

(2) Para obtenção desta CTE pode seguir-se método diferente, conjugando os resultados de ambas as CTE's referentes aos períodos que se associaram (Pereira, 1978a).

QUADRO 1

Parâmetros das CTE da bacia do Sperbelgraben e seus intervalos de confiança a 80 %.

Período de Primavera-Verão		Período de Outono	
$\bar{Q}_0$	$\alpha$	$\bar{Q}_0$	$\alpha$
123.65 ± 47.82	0.7176 ± 0.1713	59.18 ± 10.99	0.4155 ± 0.0827
56.39 ± 11.02	0.3928 ± 0.0209	25.95 ± 7.69	0.2109 ± 0.0056
34.92 ± 6.45	0.2764 ± 0.0094	13.62 ± 3.08	0.1186 ± 0.0066
18.97 ± 3.91	0.1713 ± 0.0122	8.11 ± 0.69	0.0548 ± 0.0069
14.74 ± 0.63	0.1011 ± 0.0025	4.69 ± 1.11	0.0275 ± 0.0055
9.34 ± 0.37	0.0777 ± 0.0091		

Da aplicação do método pôde concluir-se (Pereira, 1971):

a) que as médias  $\bar{Q}_0$  e  $\bar{\alpha}$  constituem estimadores estatísticos adequados para a caracterização de cada grupo de segmentos de exaurimento, segundo confirmação através de testes estatísticos de normalidade das correspondentes amostras;

b) que os valores médios  $\bar{\alpha}$  de cada grupo eram sempre significativamente diferentes dos relativos aos grupos vizinhos (Quadro 2);

c) que os valores médios  $\bar{Q}_0$  de cada grupo eram, em geral, também significativamente diferentes dos relativos aos grupos vizinhos (Quadro 2);

d) que, dada a predominância dos valores de  $\alpha$  na definição da forma das curvas, a metodologia proposta se apresenta como adequada e precisa.

Noutro artigo (Pereira, 1984a), fez-se a comparação dos modelos de exaurimento simples, o modelo exponencial (MES) e o modelo hiperbólico (MHS), concluindo-se que a sua escolha deverá ser feita de acordo com as características hidrodinâmicas dos aquíferos e que, em particular, o modelo MES é o mais adequado ao estudo do exaurimento de cursos de água. Tais conclusões foram igualmente comprovadas (Pereira, 1977) quanto à escolha do modelo MES para a obtenção das curvas tipo de exaurimento e para a sua descrição (equação 8). Porém, quando se trate de obter curvas tipo de exaurimento de mananciais provenientes de lençóis livres sem profundidade o modelo a utilizar deverá ser o MHS, que substituirá o MES nas equações (1), (7) e (8).

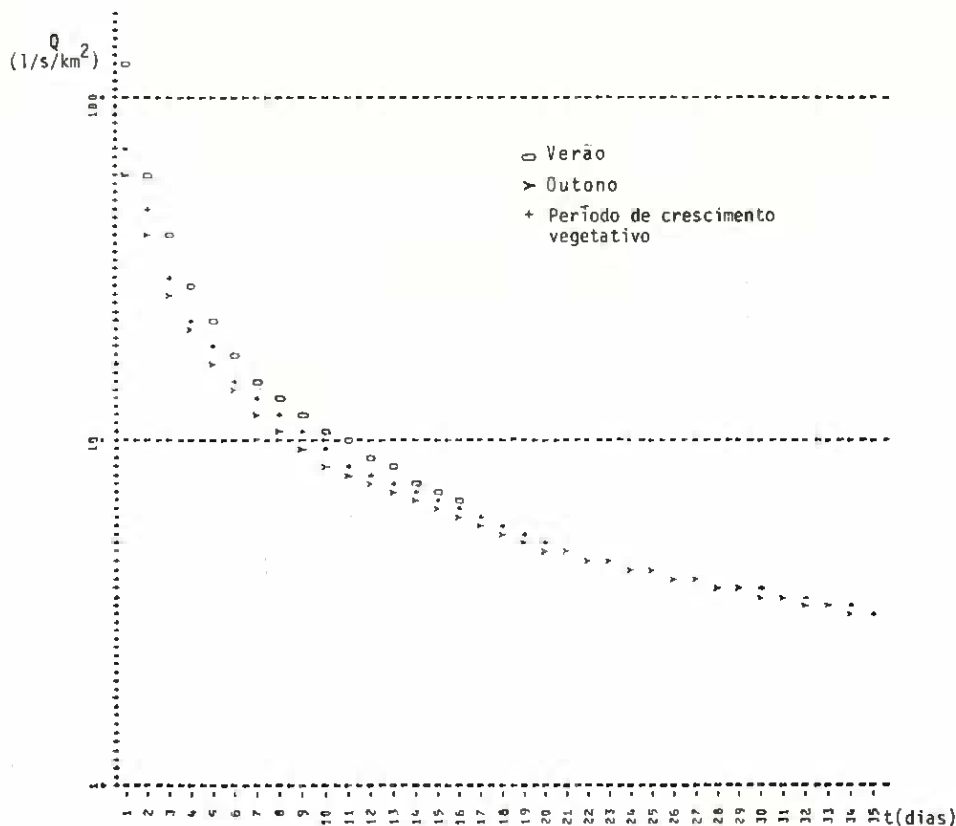


Fig. 4 — As CTE da bacia Sperbelgraben.

QUADRO 2

Resultados dos testes de diferença entre valores médios de  $\alpha$  e  $Q_0$  de grupos subsequentes, expressos em termos de percentagem de casos por classe de probabilidade.

Parâmetro	Classes de probabilidade P				
	$P \leq 0,1$	$0,1 < P \leq 1,0$	$1,0 < P \leq 5,0$	$5,0 < P \leq 15,0$	$15,0 < P$
$\alpha$ - Outono	91.1	6.7	2.2	—	—
$\alpha$ - Prim.-Verão	86.0	7.0	7.0	—	—
$\alpha$ - Crescim. veget.	93.6	2.1	4.3	—	—
$Q_0$ - Outono	28.9	22.2	24.5	13.3	11.1
$Q_0$ - Prim.-Verão	18.6	39.4	14.0	14.0	14.0
$Q_0$ - Crescim veget.	44.7	36.2	10.6	—	8.5

### 3.3. Aplicação do método dos segmentos de exaurimento para a obtenção das curvas envolventes

A obtenção das curvas envolventes de exaurimento pode realizar-se de forma semelhante às CTE (Pereira, 1978b). De facto trata-se de encontrar a sequência de segmentos de exaurimento que, para dada estação, traduzem condições máximas de armazenamento e descarga mais lenta, o que corresponde ao facto de todos os reservatórios da bacia, superficiais ou subterrâneos, se esgotarem segundo os seus próprios regimes após a máxima recarga.

Assim, os segmentos de exaurimento a escolher serão caracterizados por pares de valores  $Q_0$  e  $\alpha$  tais que sendo  $Q_{0,1} > Q_{0,1+1}$ , se tem também  $\alpha_1 > \alpha_{1+1}$ , como se indica na Fig. 5: o valor de  $Q_{0,1}$  será o máximo  $Q_0$  observado (que traduz o armazenamento máximo) e  $\alpha_1$  o que lhe está associado;  $Q_{0,2}$  corresponderá ao segmento com  $Q_0$  imediatamente inferior a  $Q_{0,1}$ , mas tal que  $\alpha_2 < \alpha_1$ ; os restantes segmentos serão escolhidos de forma idêntica, de modo a se obterem

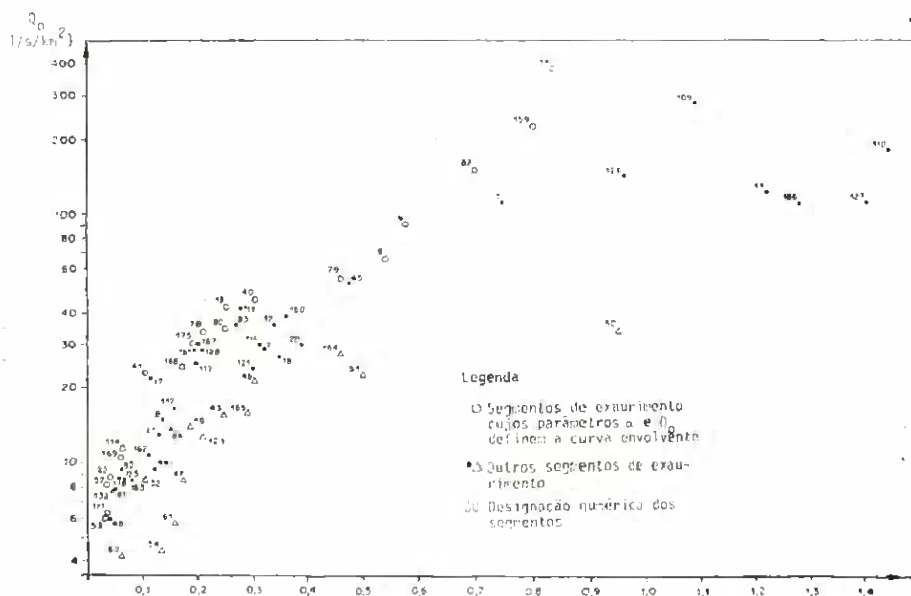


Fig. 5 — Relação entre os parâmetros  $\alpha$  e  $Q_0$  dos segmentos de exaurimento: escolha dos segmentos que definem a curva envolvente de exaurimento.

pares de valores de  $Q_0$  e  $\alpha$  que constituem, ambos, séries decrescentes.

A curva envolvente é então descrita pela equação (8), nas condições atrás expressas para as CTE. A Fig. 1 mostra, comparativamente, ambas as curvas.

#### 4. APLICAÇÃO DO MODELO MEC 3 PARA A CARACTERIZAÇÃO HIDROLÓGICA DE PEQUENAS BACIAS

##### 4.1. *Características das bacias em estudo*

###### 4.1.1. *Caracterização sumária*

A caracterização hidrológica, incidindo sobre o regime de exaurimento e os componentes do escoamento, visou onze pequenas bacias experimentais ou representativas dos pré-Alpes suíços. Tais bacias têm vindo a ser estudadas com o objectivo de conhecer as influências da cobertura vegetal, em particular o coberto florestal, sobre o balanço hidrológico.

Tem-se, assim:

- as bacias do Emmental (cantão de Berna) — Sperbelgraben e Rappengraben — em observação desde 1900 e sobre as quais foram publicadas diversos estudos, nomeadamente os de Engler (1918), de Burger (1954) e de Casparis (1959);
- a bacia do Melera (cantão do Ticino) — em estudo desde 1934 (Burger, 1955);
- as bacias do Schwarzsee (cantão de Friburgo) — Rotenbach e Schwändlibach — instaladas em 1952 e com diversos estudos publicados, em particular por Keller (1965; 1972);
- as bacias do Alptal (cantão de Schwyz), em estudo desde 1965, e objecto de estudos continuados e de publicações mais recentes, nomeadamente no âmbito da qualidade da água (Keller, 1970a; 1970b; 1976; 1979) e do balanço hídrico (Keller e Strobel, 1977; 1982; Strobel 1979);
- as bacias do Eubach (cantão de Schwyz) e de Riale de Roggiasca (cantão dos Grisões), sobre as quais existe reduzida informação (Pereira, 1977).

As características sumárias destas bacias encontram-se reunidas no Quadro 3.

QUADRO 3

Características sumárias das bacias experimentais e representativas

Bacias	Número das bacias	Geologia	Área (ha)	Altitude média (m)	Altitude relativa (m)	Exposição
Vogelbach	3	Flysch	155	1365	485	ESE
Lumpenen	4		93	1317	437	ESE
Frifang	5		108	1340	456	E
Gamschbach	7		52	1360	439	WNW
Etterentobel	8		94	1360	410	WNW
Rotenbach	21	Flysch	166	1454	354	E
Sperbelgraben	31	Conglomerados	56	1060	292	SW
Rappengraben	32		56	1135	260	SW
Eubach	41	Flysch + camadas helvéticas	895	1216	742	W
Melera	51	Gneisses	105	1430	811	S
R. Rogglasca	52	Gneisses + Granitos	702	1711	1344	NNW

4.1.2 *Parâmetros característicos de exaurimento e índices geomorfológicos e de cobertura vegetal*

Para as 11 bacias em questão foram calculados as CTE que caracterizam as estações de Primavera — Verão (período chuvoso, com exaurimento influenciado pela recarga positiva — precipitação — e negativa — evapotranspiração), de Outono (cujo regime é menos influenciado pela recarga) e, associando ambas as estações, para o período vegetativo, sem influência da neve.

As correspondentes CTE foram estudadas através do modelo MEC 3, conforme se descreve noutro artigo (Pereira, 1984b), tendo os resultados sido reunidos no Quadro 4.

No sentido de interpretar a variabilidade dos parâmetros de bacia para bacia e, ainda, de estação para estação, recorreu-se a uma análise de regressão múltipla tomando como variáveis independentes alguns índices que caracterizam as condições de recarga e de armazenamento na bacia (geologia e precipitação) e que influenciam os processos hidrológicos (características geomorfológicas e de cobertura vegetal). As variáveis independentes são assim definidas pelos índices seguintes:

- G1 — Índice hidrológico relativo à permeabilidade da bacia; exprimindo a condutividade hidráulica através da potência  $10^{-n}$  ( $\text{cm s}^{-1}$ ), o índice é  $G1 = 10/n$
- G2 — Índice hidrológico (alternativo de G1), sendo  $G2 = G1^2$
- R — Precipitação média anual (cm)
- F — Percentagem de área da bacia com cobertura florestal
- P — Percentagem de área da bacia com pastagem de montanha
- SW — Percentagem de área da bacia com vegetação de zonas húmidas de montanha
- PS — Percentagem de área da bacia com pastagem e vegetação arbustiva de montanha
- SWB — Percentagem de área da bacia com vegetação de zonas húmidas e/ou com fraco coberto vegetal
- ST — Declive da torrente principal (%)
- S — Declive médio da bacia (%)
- FO — Índice de forma: comprimento/largura média da bacia
- D — Densidade de drenagem ( $\text{km}^{-1}$ )

O objectivo principal da análise estatística era o de estudar os impactos da cobertura vegetal sobre os parâmetros que caracterizam, no modelo MEC 3, os componentes do escoamento. Verificou-se que os correspondentes índices (F, P e SW) eram insuficientes para explicar a variação de tais parâmetros pelo que se tornou necessário: a) introduzir os índices hidrogeológicos de permeabilidade do substracto, G1 e G2, de definição empírica; b) associar numa só variável

## QUADRO 4

Os parâmetros do modelo MEC 3 aplicados às curvas tipo de exaurimento de onze pequenas bacias.

Bacia	Primavera-Verão		Outono		Crescimento vegetativo	
	$Q_{o_1}$	$\alpha_1$	$Q_{o_1}$	$\alpha_1$	$Q_{o_1}$	$\alpha_1$
3	110.021	1.2650	121.994	1.8448	114.519	1.5059
	39.029	0.4187	50.333	0.3292	45.350	0.3451
	15.492	0.0520	11.026	0.0326	11.390	0.0343
4	9.947	1.8214	152.859	1.0378	64.833	1.3098
	120.586	0.7430	28.476	0.2367	90.302	0.5867
	14.540	0.0751	8.117	0.0292	11.491	0.0496
5	42.305	0.7401	115.127	1.0732	70.099	0.9058
	43.435	0.6635	16.726	0.2758	34.818	0.5311
	30.632	0.0751	13.530	0.0248	25.126	0.0633
7	54.951	0.9684	14.946	3.6673	38.110	1.2280
	30.670	0.3521	47.522	0.4946	45.316	0.3560
	26.592	0.0882	21.514	0.0513	16.905	0.0386
8	97.357	1.3802	146.540	1.2443	150.501	1.1658
	65.372	0.7638	9.455	0.4466	10.069	0.5239
	11.617	0.1002	9.619	0.0485	9.025	0.0485
21	117.925	1.5217	115.919	1.2618	161.089	1.1880
	75.135	0.7378	26.997	0.1463	23.457	0.1268
	23.817	0.0578	7.297	0.0127	7.644	0.0145
31	28.004	3.8757	35.541	0.6922	49.994	0.6822
	74.446	0.6177	17.000	0.1855	17.493	0.1371
	21.187	0.0781	6.723	0.0224	4.892	0.0140
32	80.121	0.9376	69.683	0.6864	123.189	0.6462
	87.422	0.5847	24.721	0.1694	24.374	0.1660
	22.313	0.0778	7.001	0.0196	6.910	0.0192
41	117.572	0.9945	56.888	0.9618	89.336	0.9872
	40.936	0.2436	44.986	0.4670	44.187	0.3751
	5.188	0.0170	10.325	0.0379	9.604	0.0342
51	94.735	1.0224	116.996	1.2387	103.668	1.1831
	40.344	0.3582	32.499	0.2521	44.243	0.1768
	55.113	0.0153	23.314	0.0107	34.079	0.0118
52	392.163	1.0223	350.614	1.4556	366.616	1.1548
	43.046	0.1891	52.927	0.1803	50.855	0.1645
	24.788	0.0318	16.265	0.0146	15.788	0.0136

PS as áreas a que correspondem baixa intercepção e taxas de infiltração relativamente elevadas; c) associar também numa só variável SWB as áreas de baixa intercepção e de fraca infiltração; d) considerar índices geomorfológicos que permitam uma interpretação dos gradientes hidráulicos (ST e S) e das condições de escoamento e de descarga (FO e D).

Os valores dos índices atrás definidos encontram-se reunidos no Quadro 5.

QUADRO 5

Índices característicos das bacias (variáveis independentes)

Bacia	G1	G2	R	F	P	SW	PS	SWB	ET	S	FO	D
3	1.43	2.04	210	62	12	25	12	25	22	37	2.18	6.14
4	1.43	2.04	210	19	57	24	57	24	19	25	4.47	6.43
5	1.43	2.04	210	38	42	20	42	20	29	43	1.87	5.60
7	1.43	2.04	210	93	3	4	3	4	46	58	1.56	5.73
8	1.43	2.04	210	60	0	40	0	40	23	32	2.56	5.85
21	1.43	2.04	186	14	23	63	23	63	19	29	1.87	3.77
31	2.00	4.00	163	99	1	0	1	0	20	45	2.12	4.29
32	2.00	4.00	170	49	46	0	51	0	18	40	1.20	4.75
41	2.00	4.00	192	47	32	21	32	21	14	40	1.88	5.78
51	3.33	11.11	205	79	18	0	19	2	52	68	2.14	6.76
52	3.33	11.11	210	41	7	0	27	32	30	64	1.89	5.18

4.2. *Análise estatística da variação dos parâmetros do exaurimento. Aspectos gerais.*

Como atrás referimos, optou-se pela análise de regressão múltipla para interpretar a variação dos parâmetros de exaurimento (variáveis dependentes, discriminadas no Quadro 4) a partir de diversos índices característicos das bacias em estudo (variáveis independentes, indicadas no Quadro 5). Escolheu-se este método porque torna possível que se observem as influências de um dado factor quando em presença de outros, o que permite uma melhor interpretação das interdependências estatísticas.

Utilizou-se um «package» do Instituto Federal Suíço de Investigação Florestal para o cálculo da regressão múltipla pelo método «stepwise». Dada a reduzida dimensão da amostra (onze bacias), a

significação dos parâmetros da regressão tem que ser cuidadosamente tratada; por isso apresentamos, conjuntamente com os coeficientes de regressão  $b_1$  e de correlação múltipla  $R$ , alguns estimadores que o leitor pode interpretar estatisticamente: a variância da amostra das variáveis independentes ( $S_x$ ), a variância dos resíduos da regressão ( $S_y, x_1$ ), os resultados do teste de  $t$  para coeficientes de regressão e do teste  $F$  (a  $n, m$  graus de liberdade) para a regressão.

Escolhendo esta forma de apresentação dos resultados é-nos possível apresentar algumas equações de regressão cujo significado é apenas o de exprimir tendências, o que tem interesse em termos de interpretação, apesar dos níveis de significação serem objectivamente baixos. Nestas condições, a interpretação dos resultados deve ser tomada com referência às situações em análise, requerendo cuidadoso tratamento quando encarada para apoiar interpretações de outros conjuntos de dados.

#### 4.3. *Variação do parâmetro $Q_0$*

Após ensaio, tomou-se o modelo

$$\ln_{\beta} Q_{0k} = a + b_1 X_1 + b_2 X_2 + \dots \quad (11)$$

tendo-se introduzido o índice  $\beta$  para significar a estação: Primavera-Verão —  $\beta = 1$ ; Outono —  $\beta = 2$ ; período de crescimento vegetativo —  $\beta = 3$ . Por seu lado, o índice  $k$  indica a componente de escoamento: escoamento directo —  $k = 1$ ; escoamento subsuperficial —  $k = 2$ ; escoamento de base —  $k = 3$ .

Os resultados, contidos no Quadro 6 permitem algumas interpretações:

a) Relativamente a  $Q_{01}$  (que caracteriza o escoamento directo) verifica-se que apresenta equações diferentes segundo a estação considerada. Assim:

(i) o índice de forma é a variável de maior significância ( $t = -4,19$ ) na estação de Verão, mas não é considerada para os outros dois períodos. Considerando que àquela estação correspondem valores de  $Q_{01}$  mais elevados e que o coeficiente de regressão é negativo, aquele facto pode interpretar-se pela influência de formas menos alongadas (FO menor) no aumento das pontas de cheia ( $Q_{01}$  maior), como referido por Gregory e Walling (1973), o que no caso presente apenas

QUADRO 6

Equações de regressão múltipla referentes ao parâmetro  $Q_o$  e respectivos estimadores estatísticos.

Equação de regressão (equação 11) (Valores de t para os coeficientes de regressão)	$S_y$	$S_{y,x_1}$	R	F (n,m)
$\ln {}_1Q_{o_1} = 4.653 + 0.142 \text{ G2} + 0.027 \text{ SWB} - 0.714 \text{ FO}$ (3.46) (3.63) (-4.19)	0.94	0.44	0.88	12.00 (1,7)
$\ln {}_2Q_{o_1} = 5.177 + 0.121 \text{ G2} - 0.022 \text{ F}$ (2.38) (-3.36)	0.84	0.56	0.75	5.69 (1,8)
$\ln {}_3Q_{o_1} = 3.003 + 0.573 \text{ G1} + 0.024 \text{ SWE}$ (3.60) (3.93)	0.62	0.36	0.78	12.95 (1,8)
$\ln {}_1Q_{o_2} = 4.835 + 0.392 \text{ G1} - 0.036 \text{ S}$ (1.96) (-3.46)	0.42	0.29	0.73	3.86 (1,8)
$\ln {}_2Q_{o_2} =$ —	0.55	—	—	—
$\ln {}_3Q_{o_2} = 1.522 + 0.014 \text{ PS} + 0.301 \text{ D}$ (1.83) (1.77)	0.60	0.49	0.58	3.13 (1,8)
$\ln {}_1Q_{o_3} = 3.252 + 0.010 \text{ PS} + 0.053 \text{ ST} - 0.351 \text{ D}$ (1.84) (4.76) (-2.49)	0.60	0.35	0.82	2.70 (1,7)
$\ln {}_2Q_{o_3} = -0.726 + 0.011 \text{ R} + 0.011 \text{ ST} + 0.015 \text{ S}$ (5.06) (2.22) (3.84)	0.44	0.10	0.97	4.92 (1,7)
$\ln {}_3Q_{o_3} = -1.325 + 0.013 \text{ R} + 0.010 \text{ PS} + 0.034 \text{ ST}$ (2.99) (2.60) (4.88)	0.57	0.22	0.92	6.76 (1,7)

seria observável durante a estação mais chuvosa e poderia indicar que o escoamento superficial teria menor importância durante o Outono;

(ii) a influência da cobertura vegetal exprime-se de forma concordante nos três casos:  $Q_{o_1}$  diminui quando a área florestal aumenta (por lhe corresponder elevada intercepção e maior capacidade de infiltração) e cresce com SWB (áreas de baixa intercepção e fraca infiltração, responsáveis pela formação de escoamento superficial);

(iii) visto  $Q_{o_1}$  crescer com G1 ou G2, portanto com a permeabilidade da bacia, tal facto explicará a contribuição do escoamento hipodérmico, ou escoamento subsuperficial rápido, para o escoamento directo.

b) A variação de  $Q_{o_2}$  (relativa ao escoamento subsuperficial) é mal explicada. No entanto, parece admissível concluir-se que  $Q_{o_2}$  é influenciado:

(i) positivamente, pelos factores que facilitam o movimento subsuperficial, ou seja a permeabilidade da bacia (através de G1) e a densidade de drenagem;

(ii) também positivamente, pela vegetação de pastagem e arbustiva que favorece a infiltração e a recarga;

(iii) negativamente, pelo declive da bacia, o que se interpretará pelo facto de este favorecer o escoamento directo, portanto em oposição ao escoamento subsuperficial.

c) Quanto a  $Q_{o_3}$  (relativo ao escoamento de base) já é possível uma interpretação mais segura:

(i) cresce com o gradiente hidráulico, representado pelo declive ST ou S;

(ii) cresce com as condições favoráveis à recarga, representados pela precipitação R e pela vegetação arbustiva e de pastagem de montanha, PS;

(iii) decresce, porém, com a densidade de drenagem, a qual tende a favorecer  $Q_{o_2}$ , isto é, o escoamento subsuperficial mais rápido.

#### 4.4 Variação do coeficiente de exaurimento

Após diversos ensaios, optou-se pelo modelo

$$\ln (10^{\beta} \alpha_k) = a + b_1 X_1 + b_2 X_2 + \dots \quad (12)$$

tendo  $\beta$  e  $k$  o mesmo significado que na equação (11). Como para  $Q_{o_1}$ , os resultados obtidos (Quadro 7) permitem interpretar a variação de  $\alpha$ :

a) O coeficiente de exaurimento  $\alpha_1$  (característico do escoamento directo) parece submetido a uma variação comparável a  $Q_{o_1}$ . Assim:

(i) na estação Primavera-Verão, aumenta com FO, o que, como referimos atrás, estará relacionado com o escoamento superficial contribuindo para o escoamento directo, mais importante nesta estação;

(ii) entendendo, como o fizemos atrás, que a precipitação anual R exprime a recarga subsuperficial e subterrânea, o facto de  $\alpha_1$  diminuir

QUADRO 7

Equações de regressão múltipla, referentes ao coeficiente de exaurimento e respectivos estimadores estatísticos.

Equação de regressão (12) (Valores de t para os coeficientes de regressão)	S <sub>y</sub>	S <sub>y,x<sub>i</sub></sub>	R	F (n,m)
$\ln (10^3 \alpha_1) = 10.700 - 0.022 R - 0.014 P + 0.482 FO$ (-8.96) (-6.50) (8.98)	0.45	0.12	0.96	42.19 (1,7)
$\ln (10^3 \alpha_1) = 3.927 + 0.017 R - 0.010 PS$ (3.00) (-1.94)	0.46	0.32	0.72	3.77 (1,8)
$\ln (10^3 \alpha_1) = 4.593 + 0.012 R + 0.004 SW$ (4.31) (1.62)	0.26	0.15	0.83	2.61 (1,8)
$\ln (10^3 \alpha_2) = 9.732 - 0.013 R + 0.042 ST - 0.051 S$ (-2.32) (3.23) (-5.01)	0.48	0.25	0.85	5.37 (1,7)
$\ln (10^3 \alpha_2) = 4.148 - 0.052 G2 - 0.009 PS + 0.343 D$ (-2.05) (-2.09) (3.47)	0.43	0.28	0.77	4.21 (1,7)
$\ln (10^3 \alpha_2) = 3.969 - 0.502 G1 + 0.476 D$ (-4.12) (4.80)	0.59	0.28	0.88	16.97 (1,8)
$\ln (10^3 \alpha_3) = 5.173 - 0.634 G1$ (-3.03)	0.66	0.49	0.67	9.18 (1,9)
$\ln (10^3 \alpha_3) = 2.379 - 0.119 G2 - 0.010 P + 0.281 D$ (-3.92) (-1.80) (2.43)	0.51	0.32	0.78	3.23 (1,7)
$\ln (10^3 \alpha_3) = 2.415 - 0.634 G1 + 0.380 D$ (-4.62) (3.40)	0.61	0.32	0.85	11.56 (1,8)

com R na Primavera-Verão e aumentar com R no Outono e, menos, no total do período vegetativo, poderá interpretar-se pela maior importância do escoamento superficial durante a primeira destas estações e por uma maior importância da contribuição do escoamento hipodérmico para o escoamento directo durante o Outono;

(iii) a influência da vegetação é compreensível:  $\alpha_1$  aumenta com a área de vegetação característica de baixa infiltração e de maior contribuição para o escoamento superficial (SW) e decresce com a área de pastagem e de arbustos de montanha, que favorecem a contribuição do escoamento hipodérmico para o escoamento directo;

b) As variações do coeficiente  $\alpha_2$  (relativo ao escoamento subsuperficial) são susceptíveis de interpretação se exceptuarmos a equação relativa à estação de Primavera-Verão. Assim:

(i)  $\alpha_2$  diminui quando G1 ou G2 aumentam, o que corresponderá a uma descarga mais lenta nas bacias mais permeáveis e, por isso, com maior armazenamento subsuperficial;

(ii)  $\alpha_2$  cresce com a densidade de drenagem D, o que se explica por uma descarga mais rápida quando a rede de drenagem é mais densa;

(iii) o factor vegetação intervém na equação relativa ao Outono indicando que  $\alpha_2$  é menor (descarga mais lenta) quando a vegetação favorece a infiltração.

c) Quanto ao coeficiente  $\alpha_3$  (característico do escoamento de base) a sua variação é também susceptível de ser explicada:

(i)  $\alpha_3$  decresce quando os índices de permeabilidade aumentam, isto é, o exaurimento é tanto mais lento quanto a permeabilidade da bacia (e o armazenamento) é maior;

(ii) por outro lado cresce com D, o que significa que o esgotamento é mais rápido quando a densidade de drenagem é maior;

(iii)  $\alpha_3$  diminui quando aumenta a área de pastagem de montanha, isto é, o exaurimento é mais lento quando as condições de infiltração e recarga melhoram.

#### 4.5. *Variação dos volumes dos componentes de escoamento*

Os volumes dos componentes do escoamento podem calcular-se a partir dos correspondentes parâmetros do exaurimento

$$V_k = Q_{o_k} / \alpha_k \quad (13)$$

Tais volumes podem ser submetidos a análise semelhante, tomando o modelo

$$\ln_{\beta} V_k = a + b_1 X_1 + b_2 X_2 + \dots \quad (14)$$

em que os índices  $\beta$  e  $k$  têm o significado referido na equação (11).

Os resultados da aplicação deste modelo estatístico, contidos no Quadro 8, permitem uma interpretação satisfatória da variação dos volumes dos componentes de escoamento. Assim:

$\alpha$ ) Relativamente ao volume de escoamento directo (ou escoamento rápido) a sua variação é explicável:

(i)  $V_1$  decresce quando a cobertura florestal aumenta, como aconteceu com  $Q_o$ , visto diminuir a precipitação efectiva devido à intercepção, ao mesmo tempo que cresce a precipitação infiltrada, resultando portanto uma diminuição da precipitação excedentária que dá origem ao escoamento superficial;

(ii) relativamente ao período vegetativo, a variável  $F$  vem substituída pela variável  $SWB$  tendo porém a mesma significação: o volume de escoamento rápido cresce quando aumentam as áreas de reduzida intercepção e de baixa infiltração;

(iii)  $V_1$  diminui quando  $FO$  aumenta, o que, como atrás se referiu relativamente a  $Q_o$ , se explica pela influência das formas menos alongadas das bacias nos hidrogramas de escoamento superficial, o qual terá influência marcante durante a estação de Verão;

(iv) ao contrário,  $V_1$  decresce com o aumento do declive  $S$  durante o período outonal já que o regime de precipitações se torna mais propício à formação do escoamento subsuperficial, nomeadamente contribuindo para o escoamento directo;

(v) estas interpretações podem ser confirmadas pelo facto de a precipitação  $R$  apenas surgir como explicativa durante a estação estival, aliás com  $V_1$  crescendo com  $R$ ;

(vi) estas hipóteses são ainda corroboradas pelo facto de  $V_1$  crescer com a permeabilidade das bacias ( $G1$ ), o que mostra a importância da contribuição do escoamento subsuperficial rápido. Este facto coincide aliás com numerosas interpretações do escoamento que têm demonstrado a significativa importância do escoamento hipodérmico

## QUADRO 8

Equações da regressão múltipla referentes aos volumes dos componentes de escoamento e respectivos estimadores estatísticos.

Equação de regressão (14) (Valores de t para os coeficientes de regressão)	$S_f$	$S_{f, \hat{f}_i}$	R	F (n,m)
$\ln V_1 = 3.950 + 0.573 G1 + 0.036 R - 0.016 F - 1.248 FO$ (2.50) (3.57) (- 2.59) (- 5.67)	1.21	0.52	0.90	6.27 (1,6)
$\ln V_1 = 9.352 + 1.609 G1 - 0.011 F - 0.070 S$ (3.50) (- 2.24) (- 2.49)	1.05	0.59	0.82	6.18 (1,7)
$\ln V_1 = 8.708 + 0.674 G1 - 0.014 SWB - 0.028 ST - 0.256 FO$ (3.89) (2.18) (- 2.54) (- 1.85)	0.63	0.36	0.82	3.41 (1,6)
$\ln V_2 = 8.925 + 0.422 G1 - 0.019 ST$ (3.71) (- 2.80)	0.36	0.24	0.76	7.83 (1,8)
$\ln V_2 =$ —	0.68	—	—	—
$\ln V_2 = 8.151 + 0.582 G1$ (2.16)	0.74	0.63	0.52	4.65 (1,9)
$\ln V_3 = 8.998 + 0.160 G2 + 0.027 ST$ (3.28) (1.90)	0.89	0.48	0.84	3.62 (1,8)
$\ln V_3 = 9.660 + 0.114 G2 - 0.008 F + 0.034 ST$ (3.85) (- 2.22) (3.43)	0.69	0.28	0.91	4.93 (1,7)
$\ln V_3 = 9.289 + 0.146 G2 + 0.025 ST$ (4.23) (2.45)	0.77	0.34	0.90	6.02 (1,8)

no escoamento directo ou rápido e, ao mesmo tempo, têm mostrado a menor relevância do escoamento superficial nas bacias de montanha (Nutter, 1973; Weyman, 1973; Hewlett e Troendle, 1975; Pilgrim *et al.*, 1978; Dunne, 1978).

b) Quanto ao volume do escoamento subsuperficial  $V_2$ , a explicação da sua variação é menos evidente:

(i) depende essencialmente das condições de armazenamento na bacia representadas pelo índice de permeabilidade  $G_1$ , crescendo com este;

(ii) por outro lado, visível durante o período estival,  $V_2$  decresce quando o declive  $ST$  aumenta, já que se trata de um armazenamento em aquíferos temporários suspensos.

c) A variação dos volumes  $V_3$  do escoamento de base é relativamente bem explicada:

(i) depende das condições hidrogeológicas da bacia, com  $V_3$  a crescer com a permeabilidade, já que esta é condição determinante quer do armazenamento, quer da recarga;

(ii) depende igualmente dos gradientes hidráulicos ao crescer com o declive  $ST$ , o que estará ligado às condições de descarga dos aquíferos subterrâneos;

(iii)  $V_3$  decresce quando a área florestal aumenta, o que, embora visível apenas no período outonal, corresponde ao acréscimo de perdas por evapotranspiração nos cobertos florestais, aliás de acordo com as conclusões de outros autores, como Federer (1973).

#### 4.6. *Ensaio de interpretação do comportamento hidrológico da cobertura vegetal*

A análise estatística realizada permitiu, embora com as limitações que se apontaram, interpretar o comportamento hidrológico dos ecossistemas vegetais das bacias em estudo, como se representa na Fig. 6:

— Às áreas florestais corresponde: maior intercepção e, portanto, menor precipitação eficaz; elevada infiltração e, assim, mais reduzida precipitação excedentária; maior evapotranspiração e, consequentemente, menor capacidade de recarga das águas subterrâneas, facto

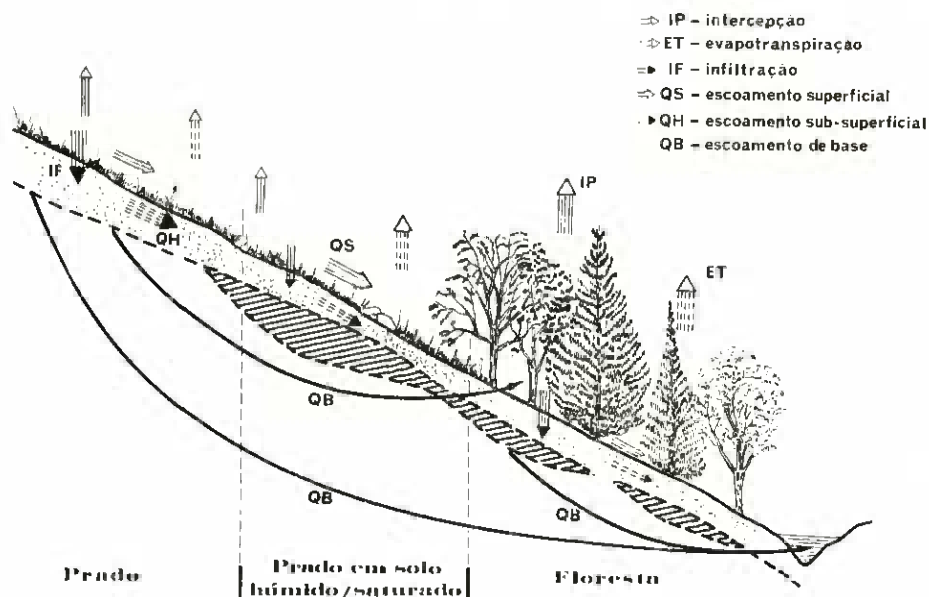


Fig. 6 — Esquema interpretativo da magnitude dos processos hidrológicos nas pequenas bacias florestais dos pré-Alpes considerando as coberturas vegetais predominantes.

associado em muitos casos à existência de formações menos permeáveis no subsolo. Resulta assim que às áreas florestais corresponde menor escoamento directo, em particular com redução do escoamento superficial, e menor escoamento de base. O escoamento subsuperficial tende a ser mais importante, nomeadamente o escoamento subsuperficial rápido.

— Às áreas de prados de montanha, por vezes associados a cobertos arbustivos, corresponde: reduzida interceptação, forte infiltração e evapotranspiração relativamente elevada. Há pois condições para a formação de escoamento superficial, nomeadamente o de saturação, e há boas condições para a recarga de águas subterrâneas, portanto para a formação de escoamento de base e subsuperficial lento.

— Às áreas húmidas de montanha, com vegetação herbácea e aquíferos superficiais suspensos, correspondem as menores interceptação, evapotranspiração e, sobretudo, capacidade de infiltração. Tais áreas

são então as responsáveis pela formação do escoamento superficial e, também, pela criação de escoamentos subsuperficiais com menor tempo de resposta.

É evidente que a interpretação feita é por demais simplificada, já que haverá que atentar nas influências geomorfológicas, como a análise estatística demonstrou, que alteram a resposta das bacias. Para as bacias do Alptal (bacias 3 a 8) esta interpretação é confirmada pelos resultados do balanço hídrico apresentados por Keller e Strobel (1982); do mesmo modo, tal interpretação é igualmente compatível com os resultados referentes às bacias do Emmental (Casparis, 1959). De um modo genérico, os comportamentos hidrológicos assinalados para os ecossistemas dominantes concordam com as conclusões gerais acerca do papel da cobertura vegetal na formação do escoamento (Ponce, 1983).

#### 4.7. Utilização do modelo MEC 3 para a separação dos componentes do escoamento

A análise estatística descrita conduziu a uma interpretação conveniente dos processos hidrológicos que determinam as condições de exaurimento das bacias em estudo. Assim, pôde comprovar-se que, de facto, os parâmetros  $Q_{o_k}$  e  $\alpha_k$  do modelo MEC 3 (equação 15) caracterizam efectivamente os três componentes do escoamento: directo, subsuperficial (lento) e de base.

Esta análise permitiu igualmente uma interpretação que demonstrou a importância dos escoamentos subsuperficiais nas bacias de montanha, nomeadamente enquanto contribuem para o escoamento directo, aliás de acordo com resultados obtidos por experimentação (Hewlett e Troendle, 1975; Dunne, 1978; Pilgrim *et al.*, 1978).

A qualidade dos parâmetros obtidos pelo processo de optimização descrito em Pereira (1984b) e a interpretação do seu significado fornecida pela análise de regressão atrás apresentada, permitem a utilização do modelo MEC 3 para a separação dos componentes do hidrograma.

De facto, é possível conhecer em cada instante  $t$  o caudal correspondente a cada um dos componentes  $k$  do modelo

$$xQ_t = Q_{o_k} \exp(-\alpha_k t) \quad (15)$$

e obter assim, quer a partir do hidrograma dos caudais diários, quer do hidrograma de cheia, os hidrogramas dos componentes. Um exemplo é apresentado na Fig. 7.

A utilização desta aplicação foi já assinalada noutro artigo (Pereira, 1984a) com particular ênfase para a construção e exploração de modelos de escoamento (James *et al.*, 1982).

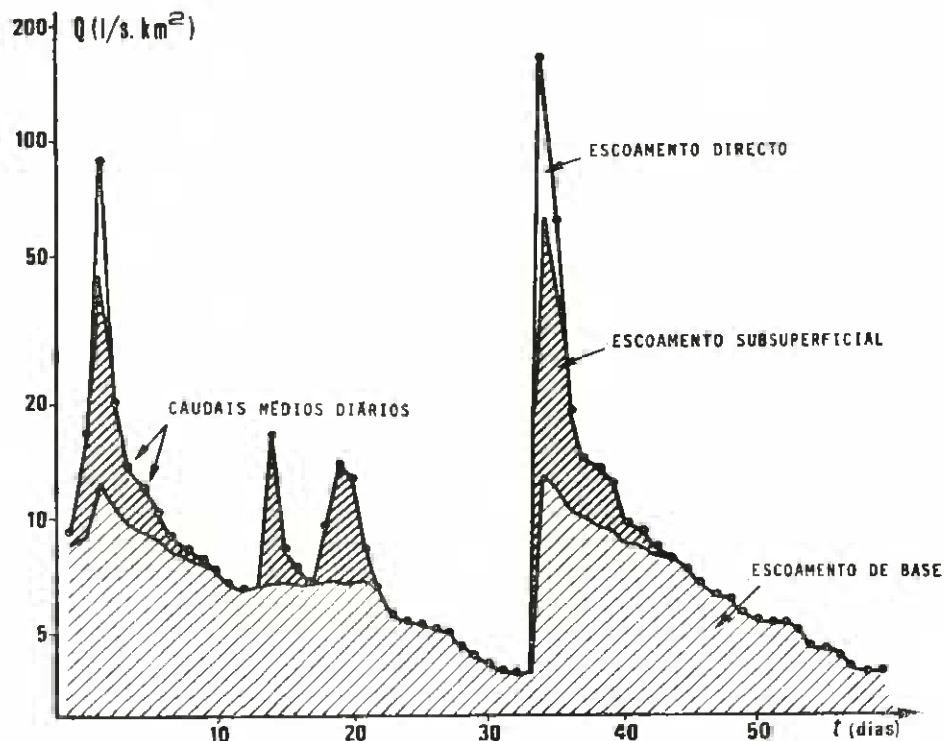


Fig. 7 — Exemplo de separação dos componentes do escoamento através do modelo MEC 3 (Vogelbach, Set.-Out., 1976).

## 5. CONCLUSÕES

a) A metodologia desenvolvida para a optimização dos parâmetros dos modelos de exaurimento composto (Pereira, 1984b), em particular do modelo exponencial de três termos (MEC 3), mostrou-se de grande

rigor quer no que respeita à possibilidade de estimar a aderência dos modelos às amostras em estudo, quer no que se refere à identificação e caracterização dos componentes do escoamento.

b) O método desenvolvido para a obtenção das curvas tipo de exaurimento (CTE) mostrou-se adequado aos objectivos de caracterização do exaurimento em pequenas bacias e com rigor compatível com a pretendida caracterização.

c) A aplicação do modelo MEC 3 para interpretar as CTE de pequenas bacias experimentais e representativas mostrou-se adequada, tendo a análise de regressão múltipla demonstrado o significado dos parâmetros do modelo e tornado possível uma significativa explicação da sua variação, bem como uma adequada interpretação do comportamento hidrológico dos ecossistemas vegetais dominantes.

d) O rigor dos métodos de obtenção das CTE e de optimização dos parâmetros do modelo MEC 3 e, por outro lado, a clara significação de tais parâmetros, permitem a utilização segura do mesmo modelo MEC 3 para a separação dos componentes do escoamento, servindo de base à modelação quantitativa do escoamento através de modelos de simulação e outros.

#### AGRADECIMENTOS

Expressamos o nosso agradecimento ao Dr. Hans M. Keller, que pôs ao nosso dispor os dados relativos às bacias experimentais do Alptal e nos proporcionou todo o apoio e colaboração para a realização deste trabalho. Agradecemos igualmente ao Serviço Federal de Gestão de Água, Berna, pelo fornecimento de dados referentes às restantes bacias, e ao Instituto Federal de Investigação Florestal, Birmensdorf-Zurique, pelo apoio logístico concedido.

#### BIBLIOGRAFIA

- BURGER, H. (1954) — Einfluss des Waldes auf den Stand der Gewässer. Mitteilung 5: Der Wasserhaushalt im Sperbel — und Rappengraben von 1942/43 bis 1951/52. *Mitt. eidg. Anst. f. d. forstl. Vers'wes.*, 31 (1): 9-58.

- BURGER, H. (1955) — Einfluss des Waldes auf den Stand der Gewässer. Mitteilung 6: Der Wasserhaushalt in der Valle di Melera in den Jahren 1944/45 bis 1953/54. *Mitt. eidg. Anst. f. d. forstl. Vers'wes.*, 31 (2): 493-555.
- BURNASH, R. J. C., FERRAL, R. L., MCGUIRE, R. A. (1973) — A generalized stream-flow simulation system, conceptual modeling for digital computers. *Report of National Weather Serv. and State of California Dept. Wat. Resour.*, Sacramento, 204 pp.
- CASPARIS, E. (1959) — 30 Jahre Wassermessstationen im Emmental. *Mit. eidg. Anst. f. d. forstl. Vers'wes.*, 35 (1): 179-224.
- DUNNE, T. (1978) — Field studies of hillslope flow processes. In: *Hillslope Hydrology* (ed. by M. J. Kirkby). J. Wiley and Sons, Chichester, UK: 227-293.
- ENGLER, A. (1919) — Untersuchungen über der Einfluss des Waldes auf den Stand der Gewässer. *Mitt. eidg. Anst. f. d. forstl. Vers'wes.*, 12: 1-626.
- FARVOLDEN, R. N. (1971) — Base-flow recession in Illinois. *Wat. Resour. Center Research Rept. no. 42*, University of Illinois, Urbana, 51 pp.
- FEDERER, C. A. (1973) — Forest transpiration greatly speeds streamflow recession. *Wat. Resour. Res.*, 9(6): 1599-1604.
- GREGORY, K. J., WALLING, D. E. (1973) — *Drainage Basin Form and Process. A geomorphological approach*. Edward Arnold (Publish.), London.
- HEWLETT, J. D., TROENDLE, C. A., (1975) — Non-point and diffused water sources: a variable source problem. In: *Watershed Management*, Proc. of a ASCE Symp., Logan, Utah: 21-45.
- JAMES, L. D., BOWLES, D. S., HAWKINS, R. H. (1982) — A taxonomy for evaluating surface water quantity model reliability. In: *Applied Modelling in Catchment Hydrology* (ed. by V. P. Singh). Water Resour. Publications, Littleton, Colorado: 189-228.
- JONES, P. N., MCGILCHRIST, C. A. (1978) — Analysis of hidrological recession curves. *J. Hydrol.*, 36: 365-374.
- KELLER, H. M. (1965) — Hydrologische Beobachtungen im Flyschgebiet beim Schwarzsee (Kanton Friburg). *Mitt. eidg. Anst. f. d. forstl. Vers'wes.*, 41 (2): 21-60.
- KELLER, H. M. (1970a) — Der Chemismus kleiner Bäche in teilweise bewaldeten Einzugsgebiete in der Flyschzone eines Voralpentales. *Mitt. eidg. Anst. f. d. forstl. Vers'wes.*, 46 (3): 113-155.
- KELLER, H. M. (1970b) — Factors affecting water quality of small mountain catchments. *J. Hydrol. (N. Z.)*, 9 (2): 133-141.

- KELLER, H. M. (1972) — Factors affecting the estimate of areal average summer and winter precipitation in a small catchment of the Swiss Prealps. In: *Distribution of Precipitation in Mountainous Areas* (Geilo Symposium 1972), WMO Publ. Nr. 326, Geneva: 484-496.
- KELLER, H. M. (1976) — Some characteristics of ion discharge from small forested mountainous catchments. *16 th IUFRO-Congress* (Oslo, June, 1976).
- KELLER, H. M. (1979) — The estimate of ionic discharge during high flows in small torrent catchments. In: *Surface and Subsurface Hydrology* (Proc. 3rd Fort Collins Intern. Symp., 1977), Water Res. Publ., Littleton, Colo.: 703-710.
- KELLER, H. M., STROBEL, T. (1977) — Predicting snow accumulation under subalpine forest stands. In: *Proc. Joint Scientific Meeting on Mountain Meteorology and Biometeorology* (Interlaken, CH, June 1976), AMS, SGBB, SSG, Blanc & Wittwer, Geneva: 87-104.
- KELLER, H. M., STROBEL, T. (1982) — Water balance and nutrient budgets in subalpine basins of different forest cover. In: *Hydrological Research Basins and their Use in Water Resources Planning* (Proc. Intern. Symp. Bern, Sept. 1982), Landes Hydrologie, Bern: 683-694.
- OMM (1970) — *Guide des Pratiques Hydrométéorologiques*. Publ. OMM no. 168 Genève.
- PEREIRA, L. S. (1975 a) — Sur la représentation graphique des courbes de tarissement. *Rapport de l'Institut Fédéral de Recherches Forestières*, Birmensdorf, Zurich, 32 pp.
- PEREIRA, L. S. (1975 b) — Le calcul du tarissement simples. *Rapport de l'Inst. Féd. Rech. Forest.*, Birmensdorf, Zurich, 30 pp.
- PEREIRA, L. S. (1977) — Etudes de tarissement sur des petits bassins versants de montagne. *Rapport no. 12/77 de l'Institut d'Hydromech. et d'Aménagement des Eaux de l'Ecole Polytech. Féd. de Zurich*, 265 pp.
- PEREIRA, L. S. (1978 a) L'obtention des courbes caractéristiques de tarissement: méthodes et programmes de calcul. *Rapport de l'Inst. Féd. Rech. Forest.*, Birmensdorf, Zurich, 116 pp.
- PEREIRA, L. S. (1978 b) — Méthode et programme de calcul des courbes enveloppes de tarissement. *Rapport de l'Inst. Féd. Rech. Forest.*, Birmensdorf, Zurich, 31 pp.
- PEREIRA, L. S. (1984 a) — Modelos de exaurimento. I — Bases teóricas e sua avaliação e aplicação. *An. Inst. Sup. Agron.* 41:
- PEREIRA, L. S. (1984 b) — Modelos de exaurimento. II — Optimização dos parâmetros dos modelos de exaurimento composto. *An. Inst. Sup. Agron.* 41:

- PEREIRA, L. S., KELLER, H. M. (1982 a) — Recession characterization of small mountain basins, derivation of master recession curves and optimization of recession parameters. In: *Hydrological Aspects of Alpine and High Mountain Areas* (Proceed. Exeter Symposium, July 1982), IAHS Publ. no. 138: 243-255.
- PEREIRA, L. S., KELLER, H. M. (1982 b) — Factors affecting recession parameters and flow components in eleven small Pre-Alp basins. In: *Hydrological Aspects of Alpine and High Mountain Areas* (Proceed. Exeter Symposium, July 1982), IAHS Publ. no. 138: 233-242.
- PILGRIM, D. H., HUFF, D. D., STEELE, T. D., (1978) — A field evaluation of subsurface and surface runoff. II. Runoff processes. *J. Hydrol.* 38: 319-341.
- PONCE, S. L. (Ed.) (1983) — *The Potential for Water Yield Augmentation through Forest and Range Management*. American Water Resources Association, Bethesda, Maryland.
- SINGH, K. P., STALL, J. B. (1971) — Derivation of base flow recession curves and parameters. *Wat. Resour. Res.*, 7(2): 292-303.
- SNYDER, W. M. (1962) — Some possibilities for multivariate analysis in hydrologic studies. *J. Geophys. Res.*, 62(2): 721-729.
- STROBEL, T. (1979) — Schneeeinterzeption in Fichtenbeständen in den Voralpen des Kantons Schwyz. In: *Mountain Forests and Avalanches* (Proc. Intern. Seminar SLF Davos, Sep. 1978), EDMZ, Bern: 63-79.
- TOEBES, C., OURYVAEV, V. (1970) — *Les Bassins Représentatifs et Expérimentaux. Guide international en matière de recherche*. UNESCO, Paris.
- TRAINER, F. W., WATKINS, F. A. (1974) — Use of base-runoff recession curves to determine areal transmissivities in the upper Potomac River basin. *J. Res. U.S. Geol. Survey*, 2(1): 125-131.