

## Aplicação de Hidrograma Unitário Geomorfológico na Previsão de Respostas Hidrológicas

Mirléia Aparecida de Carvalho

PUSP - SP - mirleia@usp.br

Fazal Hussain Chaudrhy

EESC - USP - fazal@sc.usp.br

Recebido: 24/02/99 - revisão: 26/10/00 - aceito: 20/06/01

---

### RESUMO

*Esforços têm sido realizados para desenvolver metodologias de previsão de respostas hidrológicas embasadas na geomorfologia da bacia hidrográfica, com a finalidade de produzir o chamado Hidrograma Unitário Instantâneo Geomorfológico, inicialmente proposto por Rodriguez-Iturbe e Valdés (1979). O presente trabalho explora estes conceitos utilizando para tal fim duas bacias do Estado de São Paulo. Foram analisados mapas topográficos das bacias para obter-se os parâmetros geomorfológicos dos modelos, e os resultados discutidos à luz dos conhecimentos existentes. Compararam-se as respostas hidrológicas geradas pelas formulações com dados observados de vazão. Foram propostas duas metodologias alternativas para determinação da velocidade, único parâmetro de ajuste do modelo, quando não dispõe-se de dados históricos. Verificou-se que o modelo produz bons resultados.*

**Palavras-chave:** HUI; geomorfológico; previsão.

---

### INTRODUÇÃO

Dentre as alternativas atualmente disponíveis para transformação de chuva em vazão, um dos métodos mais tradicionais e de fácil utilização é o método do Hidrograma Unitário, inicialmente proposto por Sherman (1932).

O conceito do hidrograma unitário tornou-se largamente aceito como uma das mais notáveis ferramentas para a hidrologia. Sua versatilidade encontra-se nas suposições simplificadoras de que a bacia hidrográfica comporta-se como um sistema linear e invariante no tempo, permitindo assim, a avaliação de uma resposta. A função de resposta matematicamente mais acessível é aquela resultante de chuva em forma de impulso unitário e chamada de Hidrograma Unitário Instantâneo - HUI.

Vários modelos conceituais têm sido propostos para representar o HUI, sendo que sua grande falha reside na imposição da estrutura interna da bacia (reservatórios e/ou canais lineares em série ou em paralelo), sem nenhuma consideração da verdadeira estrutura geomorfológica.

Rodriguez-Iturbe e Valdés (1979) deram o maior passo no sentido de relacionar a resposta hidrológica da bacia às suas características geomor-

fológicas, desenvolvendo uma nova concepção para o HUI.

Valdés et al. (1979) testaram o modelo proposto por Rodriguez-Iturbe e Valdés (1979), em bacias venezuelanas e porto riquenhas, considerando a aproximação bastante satisfatória.

Gupta et al. (1980) realizaram algumas modificações no modelo proposto por Rodriguez-Iturbe e Valdés (1979), seguindo a mesma linha de raciocínio.

Bettine (1984) e Carvalho (1995) desenvolveram trabalhos implementando o modelo proposto por Gupta et al. (1980), sugerindo que o modelo oferece um meio eficaz para gerar repostas de bacias. Comentam no entanto, a necessidade de um estudo aprimorado a respeito da natureza da velocidade e da intensidade precipitada sobre estes hidrogramas, respectivamente.

A metodologia geomorfológica possui potencial para ser utilizada em bacias sem registros de dados, especialmente no Brasil, cuja extensão territorial inviabiliza os programas convencionais de observação hidrológica. No presente trabalho procurou-se explorar os conceitos e testar as conclusões a respeito do parâmetro de ajuste apresen-

tados por Gupta et al. (1980), utilizando-se duas bacias do Estado de São Paulo.

## METODOLOGIA

No modelo proposto por Gupta et al. (1980), a transformação de precipitação efetiva em escoamento superficial em uma bacia pode ser visualizada como sendo o retardo que várias parcelas de água sofrem ao transcorrer o sistema natural de drenagem.

A dedução do Hidrograma Unitário Instantâneo Geomorfológico de Gupta et al. (1980) - HUIG baseia-se na equivalência da função resposta da bacia e a função densidade probabilidade do tempo que uma gota d'água, escolhida aleatoriamente, leva para alcançar a saída da bacia. O HUIG é representado pela equação:

$$h(t) = \sum_{s \in S} f_{x_1} * \dots * f_{x_k}(t) \cdot p(s) \quad (1)$$

onde  $f_{x_i}$  é a função de probabilidade do tempo de permanência da água no canal de ordem  $x_i$ ; o asterisco significa a operação de convolução;  $p(s)$  a probabilidade da gota seguir o caminho  $s$ , sendo dada por:

$$p(s) = \theta_{x_1} \cdot p_{x_1, x_2} \dots p_{x_{k-1}, x_k} \quad (2)$$

onde  $p_{x_i, x_j}$  representa a proporção de canais de ordem  $x_i$  que se fundem em canais de ordem  $x_j$  ( $x_i < x_j < \Omega$ ), onde  $\Omega$  corresponde a ordem da bacia, e  $\theta_{x_i}(0)$  a probabilidade da gota começar seu deslocamento no canal de ordem  $x_i$ .

Em vista da dificuldade de determinação de  $f_{x_i}$ , há necessidade de suposição a respeito da forma dessas funções. Na formulação original de Rodrigues-Iturbe e Valdés (1979),  $f_{x_i}$ , são supostas exponenciais, com parâmetros  $\lambda_{x_i}$ , que denotam o tempo de percurso da gota num canal de ordem  $x_i$ . Admitindo-se essa suposição, é possível expressar a convolução de ordem  $k$  da seguinte forma:

$$f_{x_1} * \dots * f_{x_k}(t) = \sum_{j=1}^k C_{j,k} e^{-\lambda_{x_j} t} \quad (3)$$

onde  $C_{j,k}$  são dados por Feller (1978):

$$C_{j,k} = \lambda_{x_1} \dots \lambda_{x_{k-1}} (\lambda_{x_1} - \lambda_{x_j}) \dots (\lambda_{x_{j-1}} - \lambda_{x_j}) \left( \lambda_{x_{j+1}} \lambda_{x_j} \right) \dots \left( \lambda_{x_k} \lambda_{x_j} \right)^{-1} \quad (4)$$

possibilitando-se escrever:

$$h(t) = \sum_{s \in S} \sum_{j=1}^k C_{j,k} e^{-\lambda_{x_j} t} p(s) \quad (5)$$

que é a equação geral do modelo do HUIG.

A suposição de uma distribuição exponencial para representar a resposta da bacia é equivalente a hipótese de que cada canal é representado por um reservatório linear. Quando ocorre uma excitação da bacia por um impulso unitário, a resposta de cada canal terá uma representação do tipo exponencial. Como a água percorre vários caminhos até atingir a exutória da bacia, a passagem de um estado para outro, dentro de um mesmo caminho, resultará numa soma destas respostas individuais (exponencial), sendo o resultado uma distribuição gama, que terá valor nulo na origem.

Para o último caminho, ou seja, quando a água percorre somente o canal de ordem superior antes de atingir a exutória da bacia, a resposta será do tipo exponencial, com ordenada não nula na origem. Consequentemente, o hidrograma da bacia também terá valor não nulo na origem. Para solucionar tal problema, como sugerido por Rodriguez-Iturbe e Valdés (1979), o canal de maior ordem é representado artificialmente por dois reservatórios lineares em série, resultando na equação:

$$h^*(t) = \int_0^t h(\tau) \lambda_4^* e^{-\lambda_4^*(t-\tau)} d\tau \quad (6)$$

onde  $h(\tau)$  é representado pela Equação (5) e  $\lambda_4^* = 2\lambda_4$ .

Desprezando-se o tempo de permanência da água na superfície do terreno e os efeitos não-lineares da transformação chuva-vazão, Rodrigues-Iturbe e Valdés (1979), chegaram à seguinte expressão para o tempo de permanência médio da partícula num canal de  $x_i$ -ésima ordem:

$$\lambda_{x_i}^{-1} = \bar{L}_{x_i} / u_{x_i} \quad (7)$$

onde  $u_{x_i}$  corresponde à velocidade num canal de ordem qualquer, sendo o único parâmetro de ajuste do modelo.

## RESULTADOS

### Bacias hidrográficas

Na escolha das bacias hidrográficas, tomou-se como critério básico o fato de que, em geral, as pesquisas hidrológicas são realizadas em pequenas bacias. Escolheram-se, então, duas das quinze bacias analisadas por Genovez (1991) e detalhadas por Carvalho (1995).

As bacias escolhidas, a do Ribeirão Palmital e do Ribeirão Pirapitingui, com áreas de drenagens de 38 km<sup>2</sup> e 67 km<sup>2</sup>, respectivamente, localizam-se no Estado de São Paulo, na Província Geomorfológica do Planalto Atlântico, na Zona do Médio Vale do Paraíba. Porém, a primeira e a maior parte da segunda bacia localizam-se na Subzona dos Morros Cristalinos e o restante da segunda na Subzona das Colinas Sedimentares. Ambas as bacias pertencem à rede hidrográfica do Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo (DAEE-SP), localizando-se na 6ª Zona. As bacias são de ordem 4 dentro da metodologia de ordenação Strahler (1952), que consiste em: 1) canais originados de fontes são definidos como canais de primeira ordem; 2) quando dois canais de ordem  $x_i$  se unem é criado um canal de ordem  $(x_i+1)$ ; 3) quando dois canais de ordem diferente se unem, o segmento de canal imediatamente a jusante tem a ordem do canal de maior ordem. A ordem da rede de canais ou bacia de drenagem corresponde à ordem mais alta do canal que a constitui.

As bacias estão apresentadas nas Figuras 1 e 2 juntamente com as localizações dos postos hidrométricos.

### Eventos

Inicialmente foram relacionadas várias das maiores enchentes em cada bacia, sendo que alguns destes eventos tiveram que ser abandonados por falta ou precariedade dos dados simultâneos.

Na escolha dos eventos procurou-se atender as hipóteses intrínsecas ao método do hidrograma unitário, qual seja: 1) chuvas efetivas uniformemente distribuídas pela bacia; 2) chuvas efetivas com intensidade constante ao longo de certo período; 3) princípio da linearidade; e 4) princípio de invariância no tempo. Este objetivo nem sempre foi atingido pelo fato das bacias possuírem um único pluviógrafo. Após a seleção final dos

eventos, resultaram cinco hidrogramas de enchentes observados, com suas precipitações observadas. Todos os eventos observados representam a resposta da bacia a uma chuva individual sobre as mesmas.

Obteve-se o volume do escoamento superficial observado através da separação dos escoamentos utilizando um método bastante comum na prática da engenharia, que consiste em: 1) plota-se o hidrograma em papel mono-log; 2) traça-se uma reta vertical passando pelo ponto referente ao ponto de inflexão da recessão do hidrograma total; 3) observa-se a forma linear do final da recessão, prolonga-se a semi-reta para trás até encontrar a reta vertical traçada anteriormente; e 4) completa-se a separação levando-se o segmento de reta do ponto de encontro entre a vertical e a semi-reta já traçada, até ao ponto correspondente ao ponto de início da ascensão. As coordenadas entre esses segmentos de reta traçados e o hidrograma, representam o escoamento superficial, uma vez que o escoamento base foi retirado. A área acima do escoamento base e abaixo do hidrograma, corresponde ao volume do escoamento superficial, obtendo-se a partir daí a precipitação efetiva (apresentada na Tabela 1) e as coordenadas dos hidrogramas unitários. As Figuras 3 e 4 apresentam as comparações entre os hidrogramas unitários dos eventos em análise, para ambas as bacias. Pelas figuras observa-se que os hidrogramas unitários são bem diversos. Foram então analisados diversos fatores para que se pudesse verificar o efeito que eles exercem sobre o comportamento dos hidrogramas.

Os eventos escolhidos, as condições das bacias no momento da tempestade e as principais características dos hidrogramas estão apresentados na Tabela 1. Dentre os vários fatores que afetaram o comportamento dos hidrogramas, pôde-se observar que os principais foram:

- relevo (densidade de drenagem e forma): pelas Figuras 1 e 2 verifica-se que a bacia do Ribeirão Pirapitingui apresenta uma densidade de drenagem maior que a bacia do Ribeirão Palmital, resultando assim para esta bacia, hidrogramas mais íngremes com pouco escoamento base. A bacia do Ribeirão Pirapitingui, por apresentar forma do tipo radial, concentra o escoamento, antecipando o pico em relação à outra bacia;
- cobertura da bacia (tipo de vegetação): como as duas bacias são rurais, a cobertura

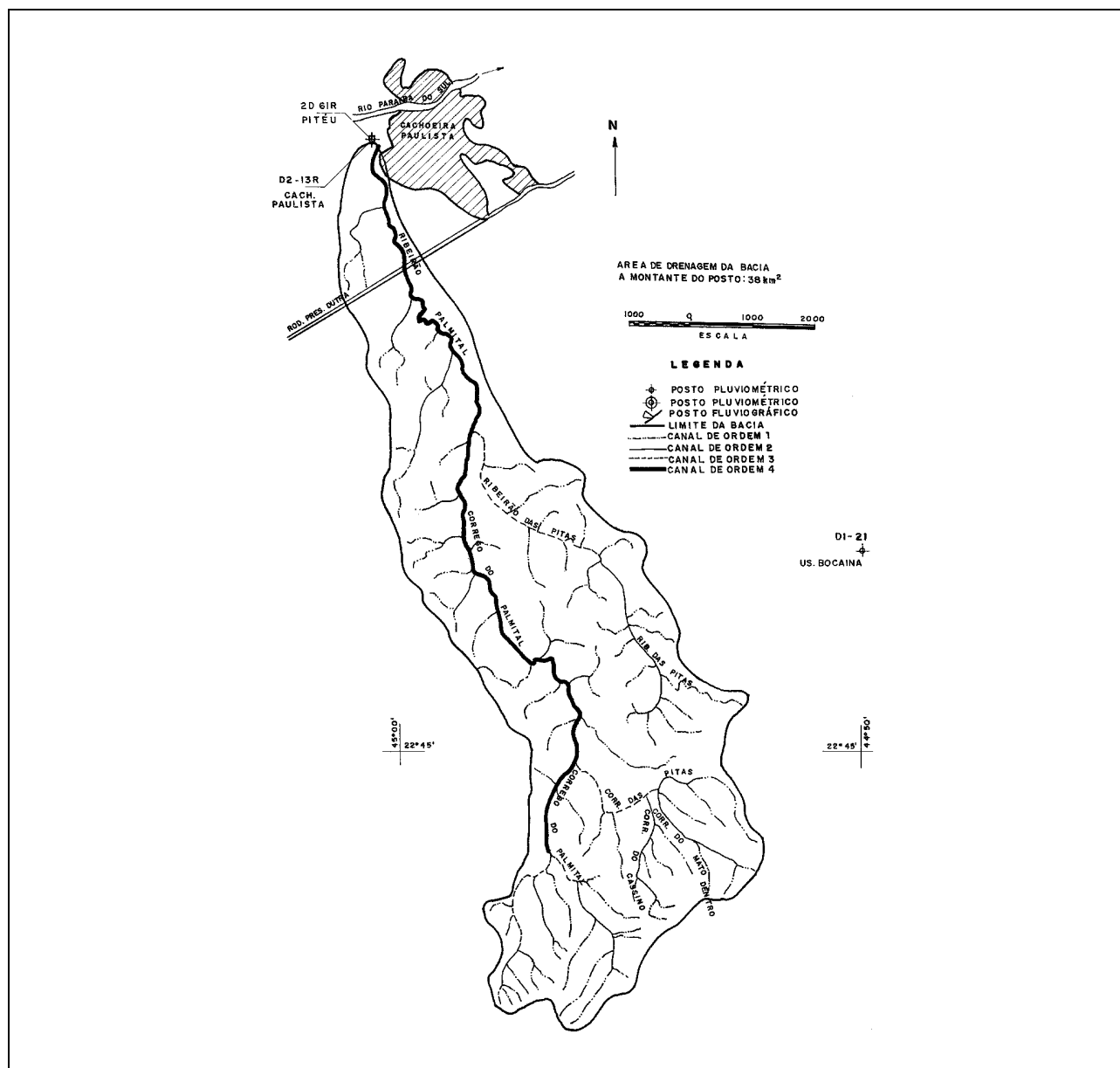


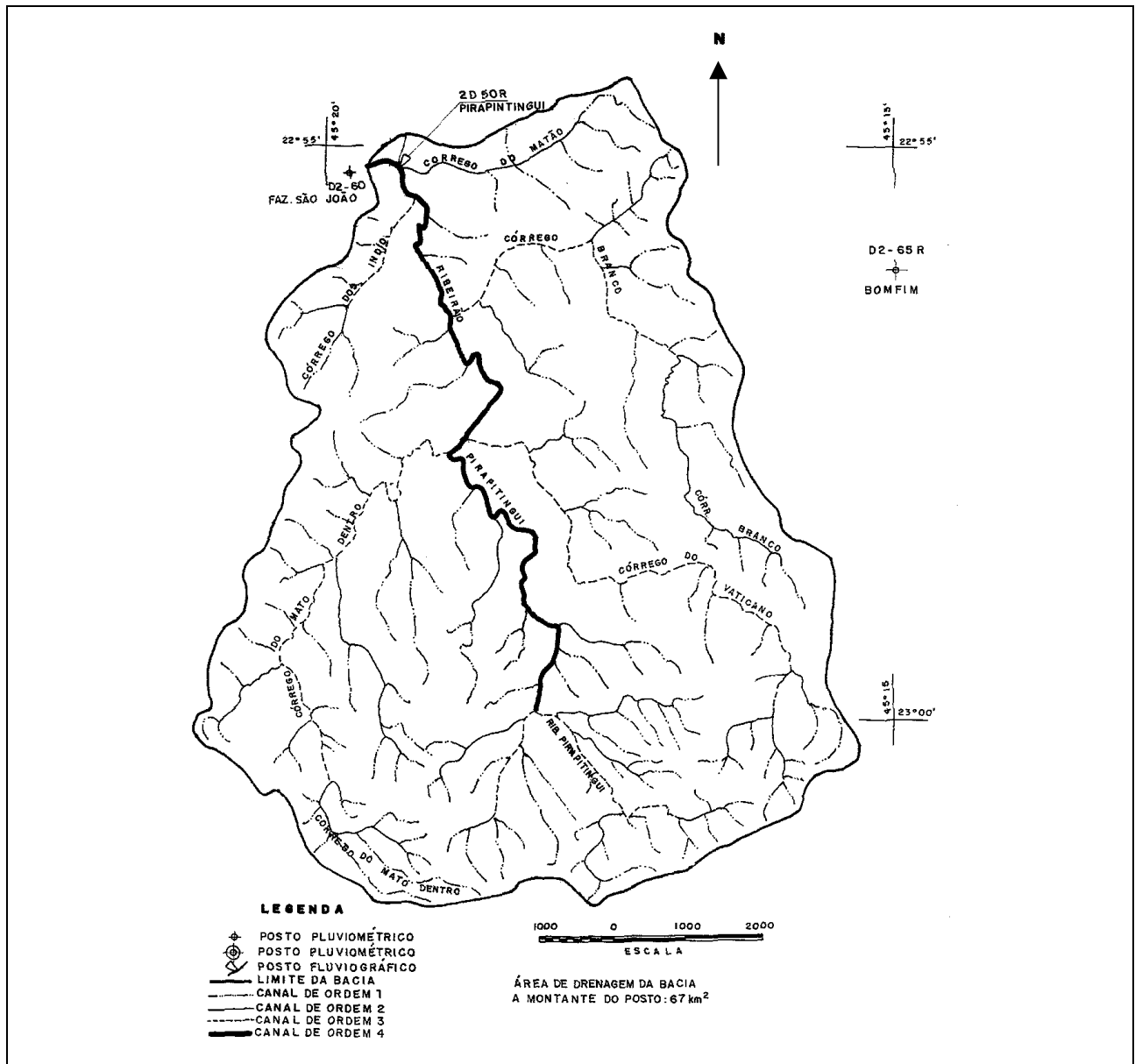
Figura 1. Área de drenagem da bacia do Ribeirão Palmital a montante do posto Pitêu na 6ª zona hidrográfica.

vegetal tende a retardar o escoamento e aumentar as perdas por evapotranspiração, reduzindo o pico;

- distribuição, duração e intensidade da precipitação: observa-se que alguns picos apresentam-se anteriores a outros, indicando uma variação na distribuição espacial e temporal desses eventos (ver Carvalho, 1995). Um dos fatores que condiciona o pico é a intensidade máxima precipitada; se ela se concentra nos primeiros instantes da chuva, o pico é antecipado. É o que se observa no evento de 06/01/81 na bacia do

Ribeirão Pirapitingui. Esse evento possui o menor  $t_p$  e, apesar de ser semelhante ao de 30/04/80, continua apresentando um  $t_p$  bem menor. O tempo de duração da precipitação efetiva e a intensidade da tempestade afetam de maneira inversa o pico e o tempo de recorrência. Quanto maior o tempo de duração menor o pico e quanto maior a intensidade maior o pico;

- solo (tipo, condições antes da tempestade): as condições iniciais de umidade do solo são fatores que influenciam significativamente o escoamento resultante de precipi-



**Figura 2. Área de drenagem da bacia do Ribeirão Pirapitingui a montante do posto Pirapitingui na 6ª zona hidrográfica.**

tação de pequeno volume, alta e média intensidade. Quando o estado de umidade da cobertura vegetal, das depressões, da camada superior do solo e do aquífero são baixos (PP<sub>30</sub> e PP<sub>5</sub> da Tabela 1) parcela ponderável da precipitação é retida e o hidrograma é reduzido.

Deve-se notar que, na prática, os fatores que afetam o comportamento dos hidrogramas ocorrem simultaneamente não existindo uma forma de analisá-los separadamente. Além disso, os prin-

cípios do hidrograma unitário são simplificações da realidade.

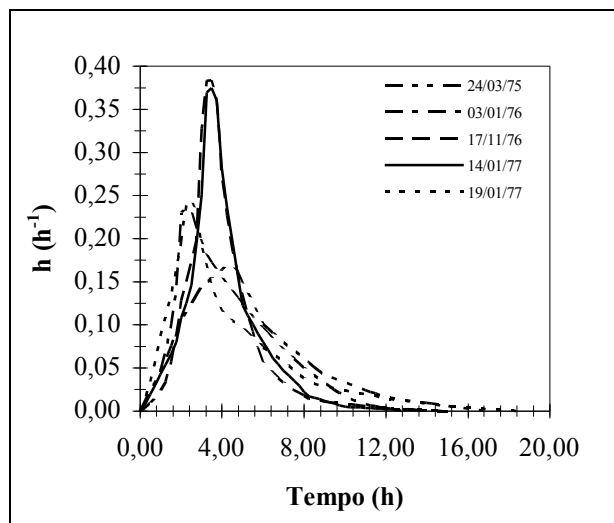
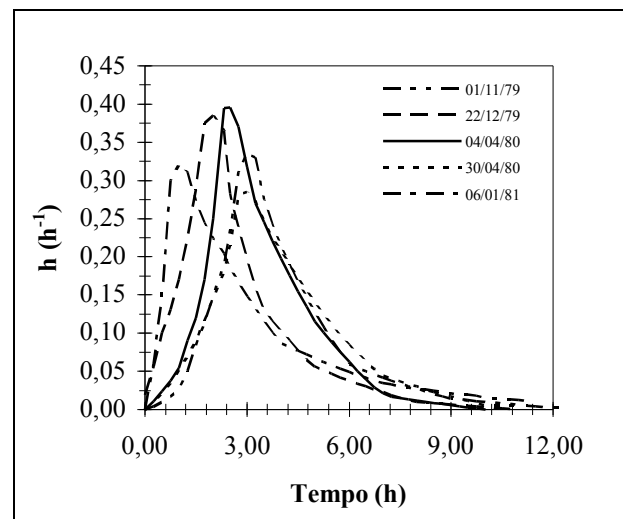
## Parâmetros do modelo

A obtenção dos parâmetros físicos baseou-se na ordenação das bacias segundo o método de Strahler (1952); para cada ordem os valores são dados pelo número de canais  $N_{x_i}$ , seu comprimento médio  $\bar{L}_{x_i}$  e sua área média  $\bar{A}_{x_i}$ . Estes valores podem ser encontrados em Carvalho (1995).

**Tabela 1. Principais características das precipitações e dos hidrogramas dos eventos selecionados das bacias do Ribeirão Palmital e Ribeirão Pirapitingui.**

Eventos	PP <sub>30</sub> (mm)	PP <sub>5</sub> (mm)	PP <sub>t</sub> (m)	t <sub>t</sub> (h)	u <sub>p</sub> (ms <sup>-1</sup> )	V <sub>ef</sub> (m <sup>3</sup> )	PP <sub>ef</sub> (m)	t <sub>ef</sub> (h)	i <sub>r</sub> (mmh <sup>-1</sup> )	q <sub>p</sub> (h)	t <sub>p</sub> (h)
Bacia do Ribeirão Palmital											
24/03/75	23,70	16,29	13,23	3,42	0,80	22231,64	0,59	0,08	7,20	0,17	4,50
03/01/76	49,56	7,11	9,86	4,08	1,15	257304,40	6,77	0,67	10,16	0,24	2,25
17/11/76	58,41	13,50	10,47	2,72	1,50	239462,07	6,30	0,83	7,56	0,39	3,50
14/01/77	20,28	0,00	6,95	2,08	1,30	101718,40	2,68	0,75	3,61	0,38	3,50
19/01/77	40,56	20,58	17,31	6,25	1,70	504981,30	10,00	4,33	2,40	0,25	2,50
Bacia do Ribeirão Pirapitingui											
01/11/79	20,16	8,55	19,86	3,25	1,00	470788,76	7,02	0,58	12,03	0,34	3,00
22/12/79	24,78	16,83	10,38	3,50	1,60	231757,98	3,45	0,17	20,70	0,39	2,25
04/04/80	64,26	13,89	10,59	5,17	2,09	173042,44	2,58	1,42	1,82	0,41	2,50
30/04/80	25,68	0,00	6,48	1,00	1,14	180168,07	2,68	0,33	8,04	0,29	3,00
06/01/81	20,88	0,00	5,67	1,75	1,20	199757,52	2,98	0,50	5,96	0,33	1,00

PP<sub>30</sub> = total precipitado 30 dias antes do evento em análise; PP<sub>5</sub> = total precipitado 5 dias antes do evento em análise; PP<sub>t</sub> = total precipitado que originou a enchente; t<sub>t</sub> = tempo da precipitação em que originou a enchente; u<sub>p</sub> = velocidade de pico na exutória da bacia; V<sub>ef</sub> = volume do escoamento superficial direto; PP<sub>ef</sub> = precipitação efetiva; t<sub>ef</sub> = tempo de duração da precipitação efetiva; i<sub>r</sub> = intensidade da precipitação efetiva (PP<sub>ef</sub>/t<sub>ef</sub>); q<sub>p</sub> = vazão de pico no hidrograma unitário; t<sub>p</sub> = tempo da vazão de pico no hidrograma unitário.

**Figura 3. Comparação entre os hidrogramas unitários dos eventos em análise para a bacia do Ribeirão Palmital.****Figura 4. Comparação entre os hidrogramas unitários dos eventos em análise para a bacia do Ribeirão Pirapitingui.**

$\theta_{x_i}(0)$  e  $p_{x_i, x_j}$  podem ser obtidos diretamente dos mapas, mas como uma maneira de simplificar e fazer com que o modelo se torne geral para bacia de determinada ordem, Rodrigues-Iturbe e Valdés (1979) expressaram em função das razões geomorfológicas de Horton (1945) e de Schumm (1956), quais sejam,  $R_L$ ,  $R_B$  e  $R_A$ .

Ao efetuar-se os cálculos para obtenção  $\theta_4(0)$ , como determinado por Carvalho (1995), a partir de  $R_B$  e  $R_A$ , observou-se que este valor era negativo, o que não tem sentido físico pela própria definição dos termos. Neste caso, procurou-se eliminar tal problema fazendo-se  $\theta_4(0)=0$  e redistribuindo-se proporcionalmente em  $\theta_3(0)$ ,  $\theta_2(0)$  e

**Tabela 2. Probabilidades iniciais obtidas através das formulações, diretamente e redistribuídas proporcionalmente para as bacias do Ribeirão Palmital e Ribeirão Pirapitingui.**

		Ordem $x_i$							
		1	2	3	4	1	2	3	4
		Bacia do Ribeirão Palmital				Bacia do Ribeirão Pirapitingui			
$\theta_{x_i}(0)$	Diretamente	0,5371	0,171	0,089	0,203	0,542	0,198	0,181	0,079
	Formulação	0,573	0,268	0,219	-0,059	0,503	0,283	0,254	-0,040
	Redistribuídas	0,533	0,255	0,212	0,000	0,480	0,274	0,246	0,000

**Tabela 3. Probabilidades de transição obtidas através das formulações e diretamente para as bacias do Ribeirão Palmital e Ribeirão Pirapitingui.**

	$x_j$							
$x_i$	2	3	4	5	2	3	4	5
Bacia do Ribeirão Palmital				Bacia do Ribeirão Pirapitingui				
Diretamente								
1	0,720	0,146	0,134	-	0,779	0,172	0,048	-
2	-	0,556	0,444	-	-	0,848	0,151	-
3	-	-	1,000	-	-	-	1,000	-
4	-	-	-	1,000	-	-	-	-
Formulação								
1	0,737	0,150	0,113	-	0,695	0,168	0,136	-
2	-	0,764	0,236	-	-	0,722	0,278	-
3	-	-	1,000	-	-	-	1,000	-
4	-	-	-	1,000	-	-	-	-

$\theta_1(0)$  o valor antes negativo de  $\theta_4(0)$ . Desta maneira conseguiu-se que as vazões negativas desaparecessem sem comprometer a forma do hidrograma gerado.

A Tabela 2 apresenta os valores de  $\theta_{x_i}(0)$  obtidos diretamente, por formulações e redistribuídos proporcionalmente. A Tabela 3 apresenta os valores de  $p_{x_i, x_j}$  obtidos diretamente e por formulações para as bacias do Ribeirão Palmital e do Ribeirão Pirapitingui.

Observa-se pelas Tabelas 2 e 3, que as probabilidades iniciais e de transição apresentam-se diferentes para as duas bacias. A diferença maior encontra-se em  $\theta_3(0)$ ,  $\theta_4(0)$ ,  $p_{1,4}$ ,  $p_{2,3}$  e  $p_{2,4}$  obtidos diretamente dos mapas topográficos. Isto deve-se à diferença entre os valores dos parâmetros físicos das bacias, conforme observado por Carvalho (1995). No caso dos dados obtidos pela generalização, a diferença se deve ao fato da relação  $R_B/R_A$  ser menor na bacia do Ribeirão Pirapitingui do que na bacia do Ribeirão Palmital. Comparando os parâmetros  $\theta_{x_i}(0)$  (Tabela 2), observa-se certa dispa-

ridade entre a maioria deles. Tanto os valores obtidos pela formulação de Rodriguez-Iturbe e Valdés (1979), quanto os redistribuídos, representam uma percentagem da área à drenagem superficial dos canais de ordem 2 e 3 muito superior à calculada diretamente, e do canal de ordem 4 muito inferior. Analisando a Tabela 3, observa-se que na bacia do Ribeirão Palmital, na realidade, existem mais canais de ordem 1 que drenam para os canais de ordem 3 e 4 do que esta formulação pôde estimar, deixando os valores aquém do real. Já para a bacia do Ribeirão Pirapitingui, observa-se que existem mais canais de ordem 1 que drenam para os canais de ordem 2 e 3, existindo também menos canais de ordem 1 e 2 que drenam para 4.

### Ajuste do modelo

Para ter-se uma visão da adequação do modelo geomorfológico, o hidrograma unitário instantâneo gerado é comparado com o hidrograma unitário instantâneo obtido a partir dos dados observados.

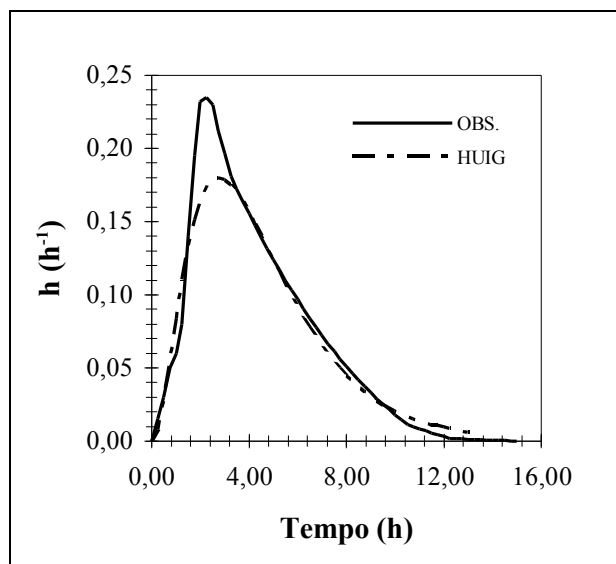


Figura 5. Comparação entre os hidrogramas observado e gerado, ajuste via minimização - SDQ (03/01/76), para a bacia do Ribeirão Palmital.

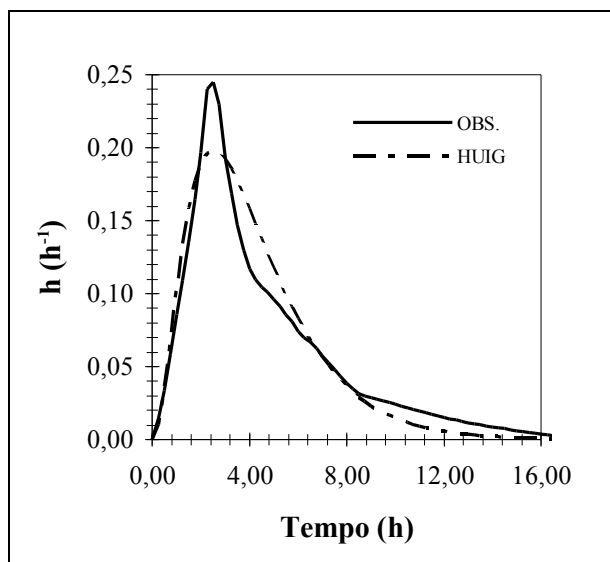


Figura 7. Comparação entre os hidrogramas observado e gerado, ajuste via minimização - SDQ (19/01/77), para a bacia do Ribeirão Palmital.

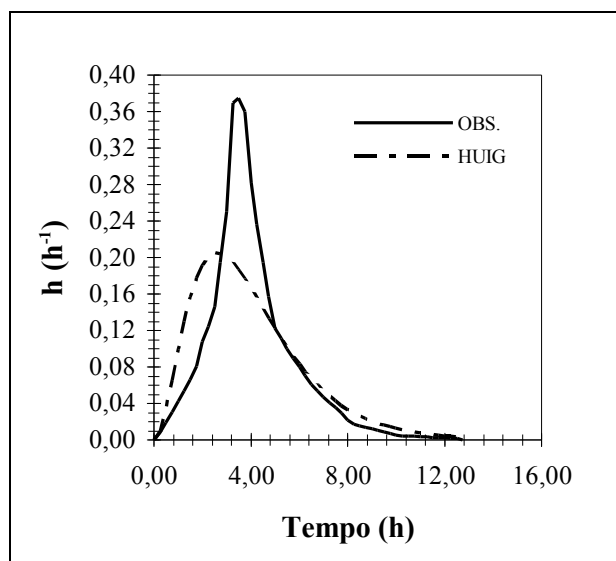


Figura 6. Comparação entre os hidrogramas observado e gerado, ajuste via minimização - SDQ (14/01/77), para a bacia do Ribeirão Palmital.

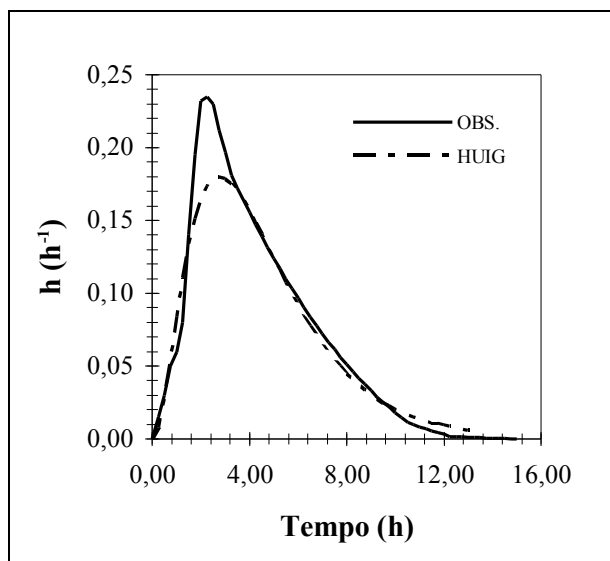


Figura 8. Comparação entre os hidrogramas observado e gerado, ajuste via minimização - SDQ (22/12/79), para a bacia do Ribeirão Pirapitingui.

Na comparação dos diversos hidrogramas foram utilizadas as probabilidades obtidas diretamente dos mapas (Tabelas 2 e 3), e a fórmula geral do modelo com amortecimento (Equação 5).

Utilizaram-se dois métodos de análise na comprovação de hidrogramas. Numa primeira análise, os hidrogramas gerados correspondem aos que proporcionaram menor Soma dos Desvios Quadrados - SDQ, e são apresentados, juntamente com os

observados nas Figuras 5 a 10, para ambas as bacias. Neste caso o modelo possui como parâmetro de ajuste a velocidade média do escoamento,  $u$ . Na tentativa de iniciar o processo de ajuste, como proposto por Rodrigues-Iturbe e Valdés (1979), e baseado nos estudos de Pilgrim (1976 e 1977), inicialmente tomou-se um valor de referência que é o da velocidade média do escoamento no momento da vazão de pico do hidrograma observado. Tais velocidades constam na Tabela 1 como  $u_p$ .



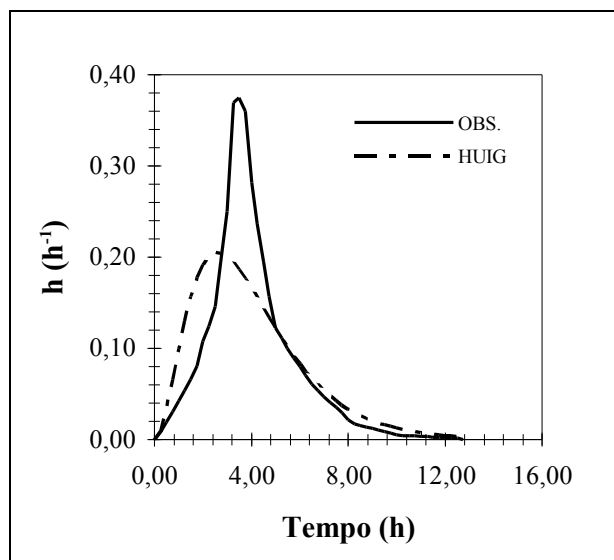


Figura 9. Comparação entre os hidrogramas observado e gerado, ajuste via minimização - SDQ (30/04/80), para a bacia do Ribeirão Pirapitingui.

As velocidades para melhor ajuste entre os hidrogramas observados e calculados assumem valores variados, como mostra a Tabela 1. Tal dispersão deve-se às diferentes características físicas das bacias, às condições no momento em que ocorre a tempestade e à impossibilidade de escolha de eventos que cobrissem as bacias de maneira uniforme.

Apesar da indefinição quanto à uniformidade das precipitações sobre as bacias por dispormos de um único pluviógrafo, pôde-se fazer algumas observações gerais sobre a forma dos hidrogramas analisada via valores de  $q_p$  e  $t_p$ , conforme Tabela 4.

O modelo do HUIG ajustado reproduz hidrograma na maioria das vezes achatados. Os tempos de pico,  $t_p$ , obtidos desses modelos são, em geral, mais subestimados na Bacia do Ribeirão Palmital do que na Bacia do Ribeirão Pirapitingui.

Uma análise da velocidade obtida através de ajustes mostra uma disparidade entre estes valores em relação à velocidade média da água no rio correspondente à vazão máxima. As velocidades ajustadas são, em geral, inferiores àquela observada na vazão máxima.

Numa comparação alternativa, em vez de forçar um ajuste entre os hidrogramas observados e modelados, atribuiu-se o valor de velocidade correspondente à vazão máxima. As Figuras 11 a 16 apresentam as respostas obtidas e a Tabela 5 resume as características de  $q_p$  e  $t_p$  para os hidrogramas.

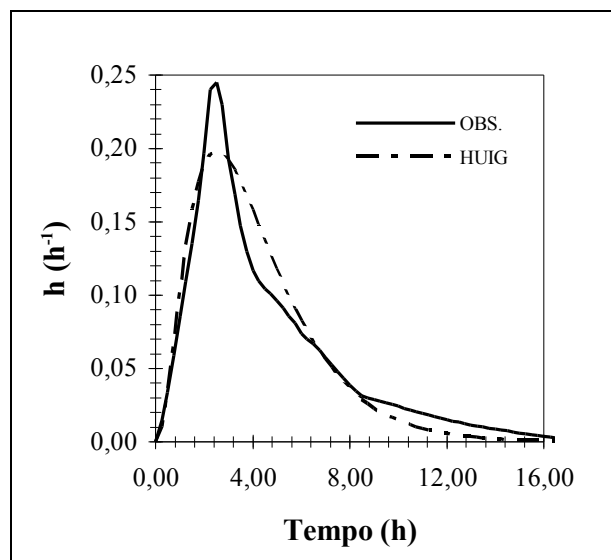


Figura 10. Comparação entre os hidrogramas observado e gerado, ajuste via minimização - SDQ (06/01/81), para a bacia do Ribeirão Pirapitingui.

Tabela 4. Comparações entre  $q_p$ ,  $t_p$  e  $u_p$  dos hidrogramas observados e gerados para as bacias do Ribeirão Palmital e Pirapitingui.

Eventos	$q_p$ ( $h^{-1}$ )		$t_p$ (h)		$u_p$ ( $m\ h^{-1}$ )	
	OBS.	HUIG	OBS.	HUIG	OBS.	HUIG
Bacia do Ribeirão Palmital						
24/03/75	0,17	0,14	4,50	3,20	0,80	0,78
03/01/76	0,24	0,18	2,25	2,75	1,15	0,96
17/11/76	0,39	0,18	3,50	2,67	1,50	0,99
14/01/77	0,38	0,18	3,50	2,75	1,30	0,96
19/01/77	0,25	0,19	2,50	2,50	1,70	1,04
Bacia do Ribeirão Pirapitingui						
01/11/79	0,34	0,20	3,00	2,67	1,00	0,99
22/12/79	0,39	0,27	2,25	1,92	1,60	1,37
04/04/80	0,41	0,22	2,50	2,42	2,09	1,09
30/04/80	0,29	0,19	3,00	2,83	1,14	0,96
06/01/81	0,33	0,31	1,00	1,75	1,20	1,55

$q_p$  = vazão de pico no HUI;  $t_p$  = tempo de vazão no pico;  $u_p$  = velocidade média do escoamento no momento da vazão de pico.

Como o modelo do HUI supõe linearidade da bacia e uniformidade de distribuição espacial e temporal dos eventos, características nem sempre observadas em bacias reais, verifica-se que esse método de comparação se mostrou mais adequado em termos de comparação do valor de pico dos hidrogramas. O modelo reproduz melhor o valor de pico da resposta da bacia do Ribeirão Pirapitingui.

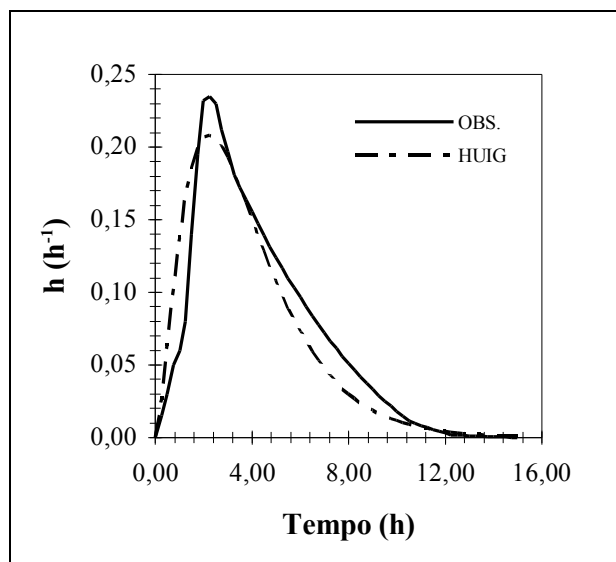


Figura 11. Comparação entre os hidrogramas observado e gerado (03/01/76), para a bacia do Ribeirão Palmital, u correspondente a vazão máxima de 1,15 ms<sup>-1</sup>.

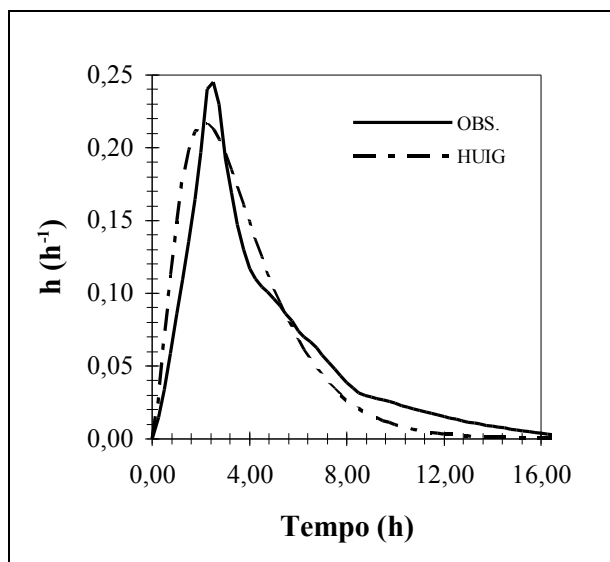


Figura 13. Comparação entre os hidrogramas observado e gerado (19/01/77), para a bacia do Ribeirão Palmital, u correspondente a vazão máxima de 1,20 ms<sup>-1</sup>.

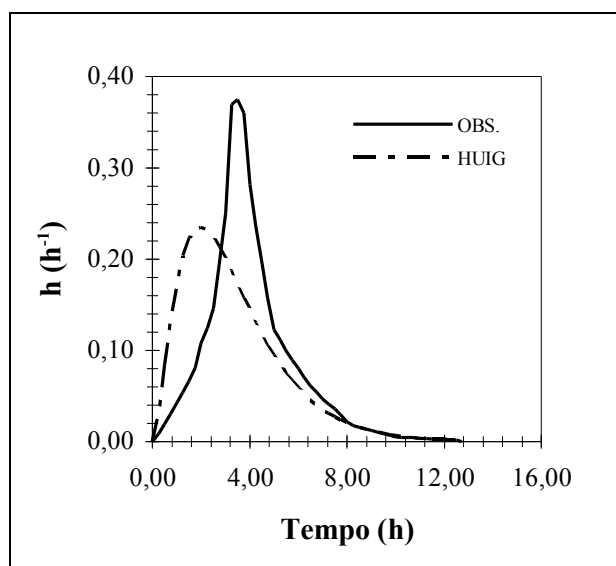


Figura 12. Comparação entre os hidrogramas observado e gerado (14/01/77), para a bacia do Ribeirão Palmital, u correspondente a vazão máxima de 1,30 ms<sup>-1</sup>.

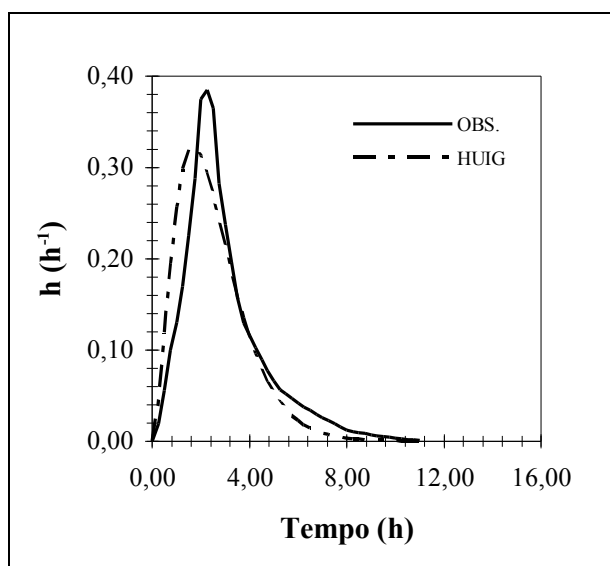


Figura 14. Comparação entre os hidrogramas observado e gerado (22/12/79), para a bacia do Ribeirão Pirapitingui, u correspondente a vazão máxima de 1,60 ms<sup>-1</sup>.

gui, porém em 06/01/81 isso não é observado, talvez devido às próprias características do evento, citadas anteriormente: intensidade máxima precipitada ocorre nos primeiros instantes da chuva, ocasionando um pico anterior ao observado nos outros eventos. Neste caso, a velocidade usada para gerar o modelo ( $u_p$  observado) não foi suficiente para representar o modelo. Trata-se de evento que não cumpre os critérios exigidos pelo HUI. Os valores de  $t_p$  são em geral subestimados para ambas as bacias.

### Alternativas para determinação da velocidade

Uma metodologia alternativa para obter-se a velocidade, não se dispondo de dados históricos, é a determinação da mesma através da equação:

$$u_{\text{máx}} = \frac{L}{t_c} \quad (8)$$

sendo  $u_{\text{máx}}$  a velocidade máxima do fluxo no canal, L o maior comprimento de canal até a exutória (de-

**Tabela 5. Comparações entre  $q_p$  e  $t_p$  dos hidrogramas observados e gerados para as bacias do Ribeirão Palmital e Pirapitingui, utilizando velocidade correspondente à vazão máxima.**

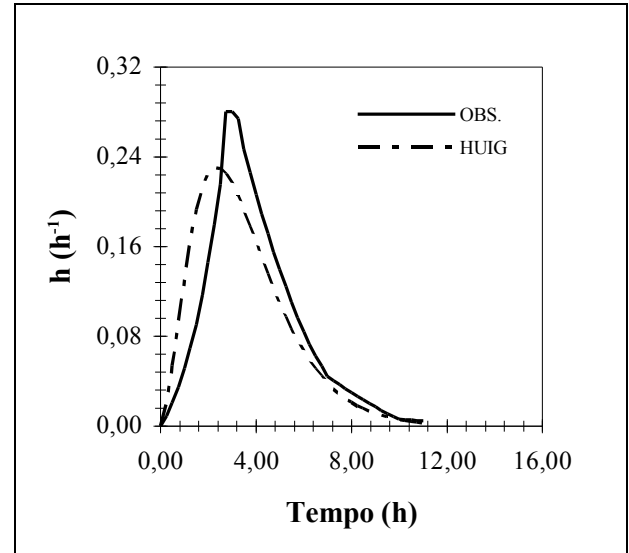
Eventos	$q_p$ ( $h^{-1}$ )		$t_p$ (h)	
	OBS.	HUIG	OBS.	HUIG
<b>Bacia do Ribeirão Palmital</b>				
24/03/75	0,17	0,14	4,50	3,17
03/01/76	0,24	0,21	2,25	2,25
17/11/76	0,39	0,27	3,50	1,67
14/01/77	0,38	0,24	3,50	2,00
19/01/77	0,25	0,22	2,50	2,17
<b>Bacia do Ribeirão Pirapitingui</b>				
01/11/79	0,34	0,20	3,00	2,67
22/12/79	0,39	0,32	2,25	1,67
04/04/80	0,41	0,42	2,50	1,25
30/04/80	0,29	0,23	3,00	2,33
06/01/81	0,33	0,24	1,00	2,25

**Tabela 6. Comparação entre as velocidades determinadas a partir do tempo de concentração, usando as fórmulas de Dooge e Kirpich, para as bacias do Ribeirão Palmital e Pirapitingui.**

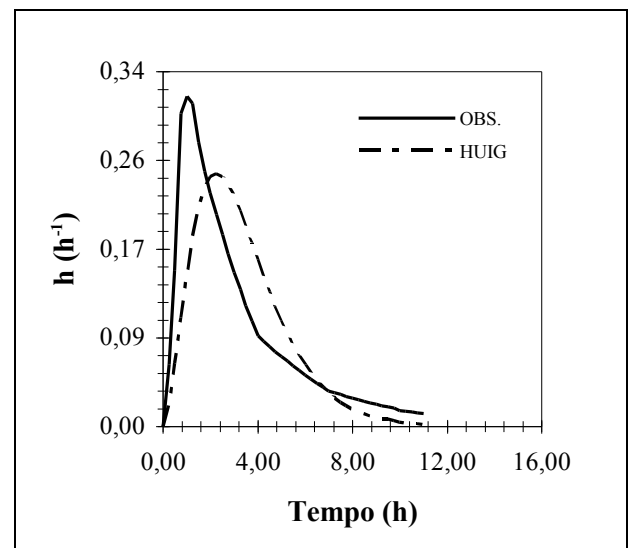
Velocidades ( $ms^{-1}$ )	
<b>Bacia do Ribeirão Palmital</b>	
Dooge	Kirpich
1,6	1,9
<b>Bacia do Ribeirão Pirapitingui</b>	
1,3	2,5

finição do tempo de concentração) e  $t_c$  o tempo de concentração. O  $t_c$  pode ser obtido através de equações, como por exemplo a de Dooge e Kirpich. Os valores das velocidades determinadas através do  $t_c$  encontram-se na Tabela 6. Observa-se na mesma tabela que as velocidades determinadas através da equação anterior não apresentam-se muito distantes das observadas na Tabela 1. Deve-se lembrar que no caso de determinação da velocidade pela Equação (8), a mesma permanece constante na bacia, para todos os eventos analisados, o que não acontece na realidade. Esse critério de adoção de  $u$  apresenta-se eficaz na previsão de vazões máximas, pois a velocidade neste caso, em geral, é superestimada.

Outra metodologia de obtenção da velocidade, é feita através da seleção de várias bacias. Para cada uma delas determina-se a velocidade e alguns parâmetros físicos, tais como: declividade;



**Figura 15. Comparação entre os hidrogramas observado e gerado (30/04/80), para a bacia do Ribeirão Pirapitingui, u correspondente a vazão máxima de  $1,14 ms^{-1}$ .**



**Figura 16. Comparação entre os hidrogramas observado e gerado (06/01/81), para a bacia do Ribeirão Pirapitingui, u correspondente a vazão máxima de  $1,20 ms^{-1}$ .**

comprimento do maior canal; CN; e etc. Posteriormente, faz-se uma relação entre as respectivas velocidades e os parâmetros físicos das bacias, de tal maneira que resulte em uma fórmula que possa ser generalizada para outras bacias de interesse.

Esse procedimento não pôde ser testado neste trabalho, visto que o número de bacias estudadas é insuficiente.

A facilidade de usar-se as metodologias apresentadas reside no fato de necessitar-se apenas de parâmetros físicos, os quais são fáceis de obter.

## CONCLUSÕES

Neste trabalho fez-se uma avaliação dos fatores que afetam a forma dos hidrogramas unitários observados e dos resultados obtidos para os modelos do Hidrograma Unitário Instantâneo Geomorfológico proposto por Gupta et al. (1980) - HUIG. Com o objetivo de cumprir tais propósitos utilizaram-se dados de duas bacias do Estado de São Paulo.

A partir da análise dos hidrogramas unitários observados e dos fatores que os determinam, observou-se que a forma do hidrograma foi afetada pelas características físicas da bacia e pelas condições em que as mesmas se encontram no momento da tempestade, sendo o principal fator de alteração a intensidade precipitada.

A obtenção dos parâmetros físicos baseou-se na ordenação das bacias segundo o método de ordenação de Strahler. Através dos mesmos foram obtidos  $R_A$ ,  $R_B$  e  $R_L$ .

Os parâmetros geomorfológicos foram empregados no modelo para obtenção de respostas hidrológicas de bacias. Essa resposta foi ainda modificada segundo sugestão de Rodrigues-Iturbe e Valdés (1979), pela divisão do último canal em dois, produzindo assim os hidrogramas amortecidos com ordenada não nula na origem.

Quando os valores dos parâmetros geomorfológicos  $\theta_{x_i}(0)$ , que denotam a probabilidade da água iniciar seu percurso em um canal de ordem  $x_i$ , eram obtidos através da generalização em função das razões geomorfológicas de Horton, verificou-se que a relação ( $R_A/R_B \leq 0,8$ ) estabelecida por Rodriguez-Iturbe e Valdés (1979) não é válida para bacias de ordem superior a 3, pois observou-se que  $\theta_4(0)$  assumiu valor negativo mesmo quando essa relação obedecia tal restrição, fazendo com que fosse necessário o uso de artifícios para eliminar tal valor. Observou-se também que  $\theta_{x_i}(0)$  representam uma percentagem da área de drenagem superficial dos canais de ordem 2 e 3 muito superior à observada e no canal de ordem 4 inferior a observada.

A análise de probabilidades de transição  $p_{x_i, x_j}$  demonstra que na realidade existem mais canais de ordem 1 que drenam para os canais de ordem 3 e 4 do que a generalização pôde estimar, deixando os valores aquém do real.

Tendo em vista a semelhança entre as respostas hidrológicas geradas pelos modelos geomorfológicos calculados com probabilidades obtidas diretamente dos elementos medidos nos mapas topográficos, e obtidas pela generalização teórica, recomenda-se o primeiro procedimento eliminando a necessidade de determinar  $R_A$ ,  $R_B$  e de ajustes especiais.

Na comparação entre os diversos hidrogramas, verificou-se que, quando tomou-se como base os hidrogramas gerados que ofereciam menor Soma dos Desvios Quadrados - SDQ, as velocidades para melhor ajuste assumiam valores variados e inferiores àquelas observadas no momento de vazão máxima. Tal dispersão deve-se às diferentes características físicas das bacias, às condições no momento em que ocorre a tempestade e à impossibilidade de escolha de eventos que cobrissem as bacias de maneira uniforme.

O modelo do HUIG ajustado reproduz hidrogramas na maioria das vezes achatados. Os tempos de pico,  $t_p$ , obtidos desses modelos são, em geral, mais subestimados na Bacia do Ribeirão Palmital do que na Bacia do Ribeirão Pirapitingui.

Uma análise da velocidade obtida através de ajustes mostra uma disparidade entre estes valores em relação à velocidade média da água no rio correspondente à vazão máxima. As velocidades ajustadas são, em geral, inferiores àquela observada na vazão máxima.

Quando se atribui o valor de velocidade correspondente à vazão máxima os valores de pico dos hidrogramas gerados aproximam-se dos observados mais que os obtidos através dos ajustes de SDQ. O modelo reproduz melhor o valor de pico da resposta da bacia do Ribeirão Pirapitingui. Por outro lado,  $t_p$  é em geral subestimado.

Se previsão de cheias, particularmente da vazão máxima, for o objetivo do estudo da resposta hidrológica de uma bacia, os estudos efetuados apresentam evidências de que a atribuição do parâmetro  $u$  com base na vazão máxima observada é um critério melhor do que a otimização por SDQ, já que torna o cálculo direto, sem necessidade de ajuste evento por evento. Outro critério alternativo para determinação da velocidade em caso de previsão de vazão máxima, corresponde a determinação de  $u$  através de  $t_c$ .

Apesar do modelo proposto gerar hidrogramas achatados e com certo erro em  $t_p$ , a utilização do mesmo pode ser de grande utilidade para se ter uma visão prévia da situação geral de bacias. Há

necessidade, entretanto, de utilização de bacias com mais pluviômetros para permitir uma aplicação mais eficiente da metodologia geomorfológica.

## REFERÊNCIAS

- BETTINE, S. C. (1984). *Estudo do Modelo Geomorfológico para Resposta da Bacia Hidrográfica*. Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- CARVALHO, M. A. (1995). *Aplicação de hidrogramas unitários geomorfológicos na previsão de respostas hidrológicas*. São Carlos. 203 p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia São Carlos, Universidade de São Paulo.
- FELLER, W. (1978). *An Introduction to Probability Theory and Its Applications*. vol. 2. John Wiley. New York.
- GENOVEZ, A. M. (1991). *Avaliação dos métodos de estimação das vazões de enchente para pequenas bacias do Estado de São Paulo*. 225 p. Tese (Livre Docência). Universidade de Campinas.
- GUPTA, V. K.; WAYMIRE, E. e WANG, C. T. (1980). A representation of an instantaneous unit hydrograph from geomorphology. *Water Resour. Res.* vol. 16, n°5, p. 855-862. Oct.
- HORTON, R. E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. *Bull. Geol. Soc. Am.* vol. 56, p. 275-370.
- PILGRIM, D. H. (1976). Travel times and nonlinearity of flood runoff from tracer measurements on small watershed. *Water Resour. Res.* vol. 12, n°3, p. 487-496. June.
- PILGRIM, D. H. (1977). Isochrones of Travel Time and Distribution of Flood Storage From a tracer Study on a Small Watershed. *Water Resour. Res.* vol. 13, n°3, p. 587-595. June.
- RODRIGUEZ-ITURBE, I. e VALDÉS, J. B. (1979). The geomorphologic structure of hydrologic response. *Water Resour. Res.* vol. 15, n°6, p. 1409-1420. Dec.
- SCHUMM, S. A. (1956). Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perty Amboy, New Jersey. *Bull. Geol. Soc. Am.* vol. 67, p. 597-645.
- SHERMAN, L. K. (1932). Streamflow from rainfall by unit-graph method. *Engineering News-Record* vol. 108, p. 501-505. April 7.
- STRAHLER, A. N. (1952). Equilibrium theory of erosional slopes approached by frequency distribution analysis. *Am. J. Sci.* vol. 63, p. 1117-1142.
- VALDÉS, J. B.; FIALLO, Y. e RODRIGUEZ-ITURBE, I. (1979). A rainfall-runoff analysis of the geomorphic IHU. *Water Resour. Res.* vol. 15, n°6, p. 1421-1434. Dec.

## Use of a Geomorphological Unit Hydrograph to Forecast Hydrologic Responses

### ABSTRACT

Efforts have been made to develop methodologies of hydrologic responses based on the geomorphology of the river basin in order to obtain a geomorphological unit hydrograph, initially proposed by Rodriguez-Iturbe and Valdés (1979). This study explores those concepts using two basins in the State of São Paulo, Brazil. Topographic maps of the basins were analyzed to obtain the geomorphological parameters of the models and their results are discussed considering data available in literature. A comparison between the hydrologic response generated from formulation and the observed data is also presented. The model produced good results but a more detailed study of the rainfall intensity is necessary.

Keywords: UH; geomorphological; forecast.