

Modelo de escoamento superficial em bacia experimental da Reserva Florestal Adolpho Ducke

Arí de Oliveira MARQUES FILHO¹, Sávio José Filgueiras FERREIRA², Sebastião Átila Fonseca MIRANDA³

RESUMO

Neste estudo, a experimentação e a modelagem hidrológica de eventos de precipitação transformada em escoamento superficial em sistemas naturais de floresta são investigadas, contemplando os seguintes tratamentos: construção de algoritmo computacional iterativo de otimização para a identificação do hidrograma unitário médio (função de transferência chuva-descarga) da bacia e para o cálculo das precipitações efetivas adequadas à cada evento chuva-escoamento; aplicação da metodologia à bacia hidrográfica do Igarapé Bolívia, situada no interior da Reserva Florestal Adolpho Ducke; análise e interpretação do algoritmo criado, enfocando a sua convergência e o significado dos resultados desse processo de otimização; e comparação com outros estudos em pequenas bacias da Amazônia Central. O período de medidas de chuva e de vazões estende-se de julho de 2004 a setembro de 2006, incluindo a fase de preparação da curva-chave do Igarapé Bolívia e a formação de um conjunto amplo e diversificado de eventos de chuva e de escoamento no curso d'água.

PALAVRAS-CHAVES: precipitação, escoamento superficial, simulação hidrológica, Amazônia.

Surface runoff model in the Reserva Florestal Adolpho Ducke experimental watershed

ABSTRACT

In this study, experimentation and hydrologic modeling of rainfall events transformed into runoff in natural forest systems, are investigated, including the following treatments: construction of an iterative optimization computational algorithm to identify the average unity hydrograph (rain-discharge transfer function) of the watershed, and to compute the effective rainfalls adequate to each discharge-rainfall event; applying the methodology to the Igarapé Bolívia watershed, which is located inside the Adolpho Ducke Forest Reserve; analysis and interpretation of the established algorithm, focusing on its convergence and on the significance of the results of this optimization process; and comparison with other studies in small watersheds of Central Amazonia. Rainfall and runoff measurements were made from July 2004 to September 2006, including the preparation phase of the level-discharge curve of the Igarapé Bolívia and the making of a large and diversified set of rainfall and runoff events.

KEYWORDS: rainfall, runoff, hydrologic simulation, Amazonia.

¹ Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia. E-mail: ari@inpa.gov.br

² Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia. E-mail: savio@inpa.gov.br

³ Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia. E-mail: atila@inpa.gov.br

INTRODUÇÃO

A transformação da precipitação em escoamento numa bacia hidrográfica tem sido um tema tratado e discutido para a construção de uma teoria adequada, tanto em seus aspectos conceituais como em seus aspectos práticos. O desenvolvimento de uma teoria geral para explicar essas transformações considera a bacia hidrográfica, com suas características físicas próprias e a sua cobertura vegetal, como sendo um sistema hidrológico linear ou não-linear, que produz uma resposta em forma do escoamento no curso d'água, provocada por eventos de precipitação simples ou compostos, distribuídos na bacia. Os aspectos gerais desses processos físicos e dos modelos hidrológicos que os representam, a conceituação do hidrograma unitário como sendo o operador da transformação chuva-escoamento no sistema, a identificação dos efeitos combinados de armazenamento em distintos compartimentos do sistema e de translação pelos canais (cursos d'água) sobre a precipitação para gerar o escoamento no curso d'água, foram desenvolvidos em vários estudos (Dooge, 1959; Nash, 1959; Dooge, 1973), formando em seu conjunto a teoria geral do hidrograma unitário para sistemas hidrológicos. No contexto de pequenas bacias hidrográficas em áreas de floresta, Hewlett & Hibbert (1967) descreveram o conceito de área variável de contribuição para a formação do escoamento superficial e sub-superficial nesses sistemas naturais, permitindo o refinamento e a flexibilização interpretativa da simulação hidrológica nesses ambientes.

A identificação do hidrograma unitário adequado para uma dada bacia hidrográfica foi sendo aperfeiçoada com a evolução das técnicas numéricas computacionais e dos processadores que as executam. A expressão matricial das transformações da chuva em escoamento foi inicialmente utilizada por Newton & Vinyard (1967) para produzir o hidrograma unitário médio do sistema. Esses procedimentos de manipulação matricial para estimar o operador do sistema foram retomados por Diskin & Boneh (1975), num contexto já consolidado e reconhecido, tendo como critério de otimização a minimização da soma dos desvios quadrados entre as ordenadas dos hidrogramas observado e modelado. Observações simultâneas de chuva e de escoamento constituem o material observacional necessário; a priori, precisa ser conhecida para o local em estudo uma função que separe a precipitação total em duas parcelas: precipitação efetiva – que gera o escoamento superficial (rápido), e infiltração – que alimenta o escoamento subterrâneo (lento); um método de separação do escoamento subterrâneo é também necessário para obter por diferença, as ordenadas do escoamento superficial. As operações de otimização referidas acima começam a ser aplicadas sobre o conjunto assim formado de precipitações efetivas e de escoamento superficial.

A extensão natural dos procedimentos descritos anteriormente consiste em juntar num único tratamento,

as determinações das precipitações efetivas e do hidrograma unitário da bacia, partindo-se de um conjunto amplo de observações de precipitação total média sobre a bacia e do escoamento correspondente, observado na seção de controle no curso d'água. As taxas de infiltração no solo da bacia ficam determinadas, ao longo do tempo em cada evento chuva-escoamento, pela simples diferença entre a chuva total e chuva efetiva. O método iterativo proposto por Duband *et al.* (1993), para a identificação do hidrograma unitário e da precipitação efetiva, pertence a essa classe de estudos. Uma análise detalhada sobre diferentes aspectos desse estudo foi apresentada por Nalbantis *et al.* (1995). A aplicação desse método na bacia representativa de Juatuba, Minas Gerais, foi apresentada por Maia *et al.* (2006), contendo já modificações na forma de calcular o hidrograma unitário e aproveitando os conceitos de modelos auto-regressivos.

Nesse contexto de modelagem hidrológica em bacias hidrográficas, os objetivos do presente estudo são compostos pelos seguintes tratamentos e aplicações: construção de algoritmo iterativo computacional para a identificação do hidrograma unitário médio e para o cálculo das precipitações efetivas adequadas à cada evento chuva-escoamento, tendo como base um conjunto de medidas de precipitação total e de escoamento para a bacia em estudo; aplicação da metodologia à bacia hidrográfica do igarapé Bolívia, situada no interior da Reserva Florestal Ducke; análise e interpretação de diferentes aspectos do algoritmo criado, enfocando a sua convergência para diferentes distribuições iniciais de precipitação e o significado dos resultados desse processo de otimização; e comparação dos resultados com estudos similares em pequenas bacias da Amazônia Central.

MATERIAL E MÉTODOS

ÁREA DE ESTUDO E SISTEMA DE MEDIDAS HIDROLÓGICAS

O sistema de medidas hidrológicas foi instalado em julho de 2004 na bacia hidrográfica do igarapé Bolívia, localizado na zona sul da Reserva Florestal Adolpho Ducke – macro-fragmento de floresta com uma área de 100 km² (10x10 km) em Manaus, 02° 53' S e 59° 58' W (Figura 1).

As observações de precipitação e de escoamento na bacia hidrográfica do igarapé Bolívia foram iniciadas em julho de 2004. Os níveis d'água são medidos por um linígrafo de pressão conectado a um sistema de aquisição de dados da Campbell – CR510. O conjunto da experimentação hidrológica está inserido em projetos de pesquisa financiado pelo Fundo Setorial de Recursos Hídricos e pelo CNPq.

O clima da área foi definido a partir de uma série de dados climatológicos, observados na Estação Climatológica da Reserva Ducke no período de 1965 a 1994. As normais extraídas desse conjunto de dados apontam a existência de duas

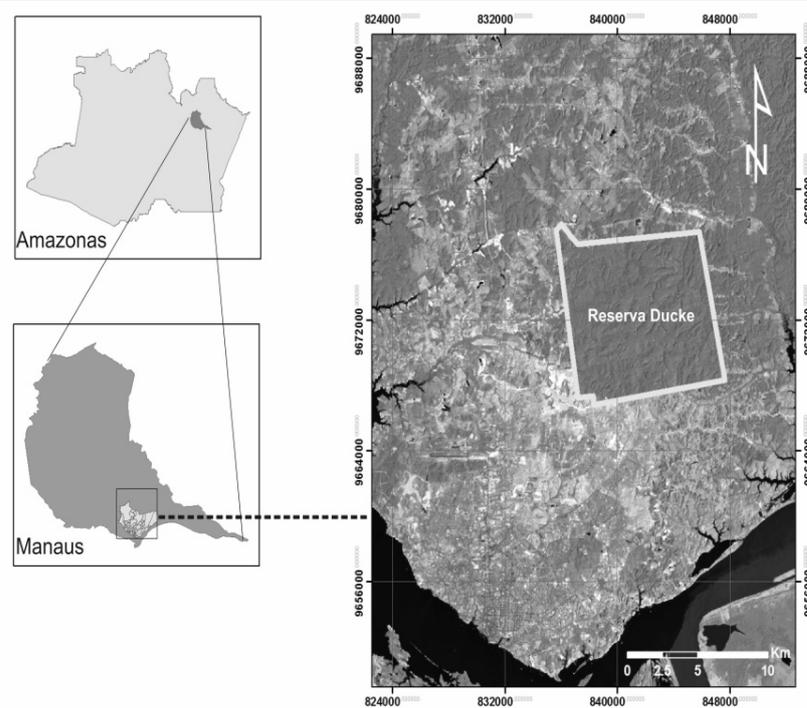


Figura 1 – Mapa de localização do experimento na Reserva Florestal Adolpho Ducke. Fonte: <http://siglab.inpa.gov.br>

estações anuais: uma seca, no período de junho a novembro, com uma normal de precipitação mínima mensal de 93 mm, em julho; e uma estação chuvosa, no período de dezembro a maio, com normal de precipitação máxima mensal de 299 mm, em fevereiro. As temperaturas apresentam média diária anual de 26,7 °C com uma amplitude média de 9,6 °C; a maior amplitude térmica ocorre em setembro (11,1 °C) e a menor amplitude ocorre em abril (8,2 °C); os meses de setembro e outubro são os mais quentes, com temperaturas máximas de 33 °C e o mês mais frio em julho com temperatura mínima média de 21,3 °C; a umidade relativa do ar apresenta médias mensais acima de 80,5; o mês de setembro apresenta a menor média (84 %) e o mês de maio a maior (91%) (Marques Filho & Dallarosa, 2000).

MÉTODO DE IDENTIFICAÇÃO DO HIDROGRAMA UNITÁRIO E DE PRECIPITAÇÕES EFETIVAS

As transformações de precipitações em escoamento nos cursos d'água em uma bacia hidrográfica podem ser descritas pela integral de convolução expressa na equação 1, desde que o meio físico aproxime-se do comportamento de um sistema hidrológico linear.

$$y(t) = \int_0^{t \leq t_0} x(\tau) h_0(t - \tau) d\tau \quad (1)$$

sendo,

$y(t)$ - vazão na seção de controle do curso d'água na saída da bacia;

$x(\tau)$ - precipitação efetiva ocorrida sobre a bacia:
 $0 \leq x(\tau) < x_{\text{total}}(\tau)$.

$h_0(t - \tau)$ - hidrograma unitário : $\int_0^{\infty} h_0(\tau) d\tau = 1$

t_0 - duração da precipitação efetiva.

A expressão adequada ao tratamento de precipitações efetivas e de descargas, quando observadas como valores médios para um dado intervalo de tempo, é a forma discreta da operação de convolução, conforme representada na equação 2,

$$y_i = \sum_{j=f_{1i}(N_x)}^{f_{2i}(N_x)} (x_j h_{i-j+1}) = \sum_{k=f_{1i}(N_h)}^{f_{2i}(N_h)} (h_k x_{i-k+1}) \quad (2)$$

$$f_{1i}(n) = \max(1, i - n + 1)$$

$$f_{2i}(n) = \min(i, n)$$

na qual, a função $h_{(\dots)}$ representa o hidrograma unitário em forma de histograma e os limites dos somatórios são funções dependentes do total de ordenadas das precipitações efetivas, N_x , e do total de ordenadas do hidrograma unitário, N_h . O total de ordenadas do hidrograma observado, N_y , está associado aos totais anteriores, ou $N_y = N_x + N_h - 1$.

A estrutura básica da equação 2 constitui o ponto de partida dos métodos de identificação de hidrograma unitário e das precipitações efetivas para uma bacia hidrográfica, em conformidade aos estudos de Newton & Vinyard (1967), Diskin & Boneh (1975), Duband *et al.* (1993), entre outros. Os procedimentos de otimização adotados no manuseio das observações hidrológicas para gerar as funções indicadas acima representam as diferenças notáveis entre esses estudos. As duas versões matriciais da equação 2 são expandidas segundo as seguintes expressões,

$$Y = X_m \cdot H$$

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_i \\ \dots \\ y_{N_y-1} \\ y_{N_y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & 0 \\ x_2 & x_1 & \dots & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & x_2 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \dots & x_j & \dots & \dots & x_1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & x_j & \dots & x_2 & \dots & 0 \\ \dots & x_{N_x-1} & \dots & \dots & \dots & x_1 & 0 \\ x_{N_x} & x_{N_x-1} & \dots & x_j & \dots & x_2 & x_1 \\ \dots & 0 & x_{N_x} & \dots & \dots & \dots & x_2 \\ \dots & 0 & 0 & \dots & x_{N_x-1} & \dots & x_j \\ \dots & 0 & 0 & \dots & x_{N_x} & \dots & x_j \\ \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & x_{N_x-1} \\ y_{N_y-1} & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & x_{N_x} \quad x_{N_x-1} \\ y_{N_y} & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \quad x_{N_x} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ \dots \\ h_{i-j+1} \\ \dots \\ h_{N_h-1} \\ h_{N_h} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$Y = H_m \cdot X$$

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_i \\ \dots \\ y_{N_y-1} \\ y_{N_y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & 0 \\ h_2 & h_1 & \dots & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & h_2 & \dots & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & h_k & \dots & h_1 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & h_k & \dots & h_2 & \dots & 0 \\ \dots & h_{N_h-1} & \dots & \dots & \dots & h_1 & 0 \\ h_{N_h} & h_{N_h-1} & \dots & h_k & \dots & h_2 & h_1 \\ \dots & 0 & h_{N_h} & \dots & \dots & \dots & h_2 \\ \dots & 0 & 0 & \dots & h_{N_h-1} & \dots & h_k \\ \dots & 0 & 0 & \dots & h_{N_h} & \dots & h_k \\ \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & h_{N_h-1} \\ y_{N_y-1} & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & h_{N_h} \quad h_{N_h-1} \\ y_{N_y} & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \quad h_{N_h} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_{i-k+1} \\ \dots \\ x_{N_x-1} \\ x_{N_x} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Os vetores e as matrizes das equações 3 e 4 têm os totais de linhas e colunas seguintes:

$$Y \Rightarrow (N_y, 1); \quad H_m \Rightarrow (N_h + N_x - 1, N_x); \quad X \Rightarrow (N_x, 1);$$

$$X_m \Rightarrow (N_x + N_h - 1, N_h); \quad H \Rightarrow (N_h, 1)$$

A experiência acumulada sobre os procedimentos iterativos por meio do cálculo matricial revelou uma lenta convergência para a solução final, fato explicado pelas correlações existentes entre as colunas das matrizes. Nos trabalhos de Duband *et al.* (1993), Nalbantis *et al.* (1995) e Maia *et al.* (2006), uma

versão modificada foi inicialmente apresentada, os aspectos de convergência em diferentes configurações foram investigados e, finalmente, uma aplicação ampliada da metodologia foi definida. Nesses estudos, o problema inicial de convergência lenta foi resolvido por uma simples combinação das equações iniciais, trocando-as por vetores e matriz de diferenças, dH e dH_m (vetor e matriz compostos por diferenças das ordenadas da função de transferência ou hidrograma unitário) e dY (vetor composto por diferenças das ordenadas das vazões observadas). As correlações existentes no sistema matricial original são eliminadas dessa forma e a convergência para uma solução final do processo iterativo é alcançada após a execução de um número relativamente pequeno de iterações.

As matrizes X_m e dH_m (dH_m é usada na versão modificada do sistema matricial) são em geral matrizes retangulares e a determinação dos vetores desconhecidos para cada uma das equações, dH e X, respectivamente, depende de um passo intermediário de multiplicação dessas equações (ambos os lados) pelas matrizes transpostas respectivas, dH_m^T e X_m^T. Além do vetor dY alterado, as matrizes resultantes em cada caso são matrizes quadradas e portanto passíveis de inversão, viabilizando a identificação dos vetores otimizados, hidrograma unitário (expresso em diferenças de suas ordenadas), dH, no primeiro caso, e precipitações efetivas, X, no segundo caso. Em forma matricial simplificada, as equações 5 e 6 compõem o processo iterativo: os resultados obtidos para o hidrograma unitário (equação 5) constituem o primeiro passo de cada iteração e alimentam a formação das matrizes, do segunda passo da iteração, viabilizando o cálculo do vetor de precipitações efetivas e fechando os procedimentos da iteração em questão.

Dessa forma, a solução matricial correspondente é dada pelas equações seguintes.

$$dH = [X_m^T X_m]^{-1} X_m^T dY \quad (5)$$

$$X = [dH_m^T dH_m]^{-1} dH_m^T dY \quad (6)$$

As iterações se sucedem até que um grau de convergência, definido previamente, seja alcançado, com a conseqüente determinação das precipitações efetivas e do hidrograma unitário otimizados.

Na preparação do algoritmo que representa o processo iterativo descrito acima, controles sobre os valores resultantes de precipitação efetivas e da função de transferência precisam ser inseridos para que a realidade física dos processos seja respeitada, conforme limites indicados na equação 1. Assim, os valores de precipitação efetiva precisam ser positivos e inferiores aos valores de precipitação total e a área sob a curva do hidrograma unitário deve ser unitária.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

MEDIDAS DE DESCARGA E CURVA-CHAVE DO IGARAPÉ BOLÍVIA

As medidas de vazão do pequeno igarapé Bolívia foram realizadas desde outubro de 2004 com o objetivo de estabelecer a curva-chave desse curso d'água. No posto de medida, a bacia hidrográfica abrange uma área estimada de 11 Km². As profundidades na seção de medição não ultrapassaram 1,5 m, permitindo assim que as medições de vazão seguissem os procedimentos clássicos de medição a vau.

A distribuição dos pontos de medidas, que definem a curva-chave para o igarapé Bolívia, é apresentada na figura abaixo. A curva de melhor ajuste dos pontos experimentais é dada pela equação:

$$y = 581,47 \cdot x^{2,64}$$

em que y representa a descarga em litros/segundo e x o nível d'água no igarapé em metros.

Curva-chave Ig. da Bolívia

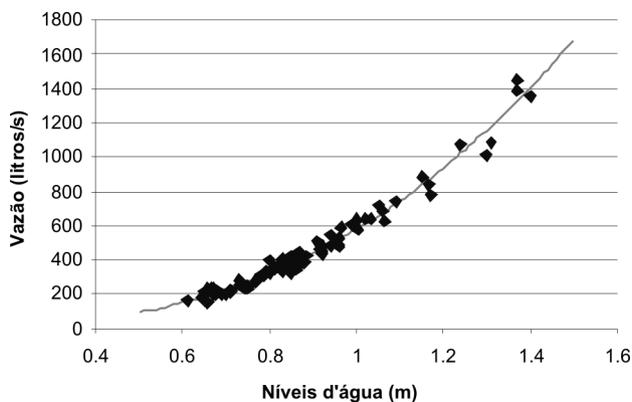


Figura 2 – Relação entre Níveis d'água e descarga líquida do igarapé Bolívia.

CONVERGÊNCIA DO MÉTODO ITERATIVO DESCRITO

Numa etapa preliminar de verificação do algoritmo preparado neste estudo, a convergência do processo iterativo descrito foi verificada para um evento sintético de chuva-vazão mostrado na Figura 3 e produzido a partir de um hidrograma unitário pré-estabelecido.

A escolha de um hidrograma com dois picos de escoamento tem o objetivo de situar o problema de otimização no contexto de funções objetivas regulares, contendo um único ponto de valor mínimo. Os casos de otimização dos processos hidrológicos, em sua grande maioria, enquadram-se nesse cenário mais simples de bom comportamento e regularidade da função objetiva.

As determinações de hidrogramas unitários (e das precipitações efetivas) em iterações sucessivas são mostradas

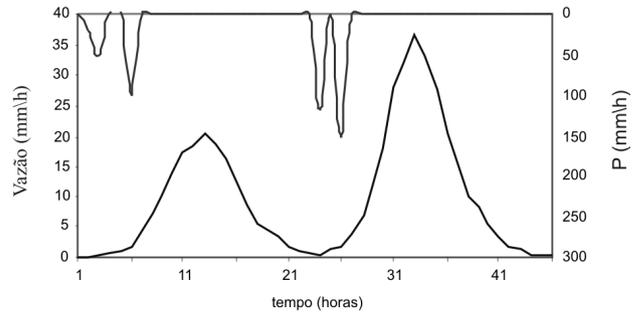


Figura 3 – Evento sintético Precipitação – vazão.

na Figura 4. Os cálculos são efetuados a partir de diferentes distribuições iniciais de precipitação, assumidas na primeira iteração.

O evento sintético considerado tem cinco ordenadas de precipitação. A análise de convergência explora a ausência ou presença de precipitação em cada uma dessas ordenadas temporais, considerando todas as combinações possíveis dessas ordenadas tomadas uma a uma, duas a duas, etc, conforme indicado pelo número de curvas existentes em cada uma das colunas da Figura 4. Assim, os gráficos presentes na primeira coluna dessa figura mostram a convergência de cinco curvas, obtidas a partir de cada uma das diferentes combinações possíveis de ocorrências de chuva em uma das cinco ordenadas temporais referidas acima; em seguida, os gráficos presentes na segunda coluna mostram a convergência de dez curvas, obtidas a partir de cada uma das diferentes combinações possíveis de ocorrências de chuva em duas das cinco ordenadas temporais; as outras três colunas estão associadas aos casos de ocorrência de chuvas com três, quatro e cinco ordenadas temporais, respectivamente. Em todos os gráficos, a curva adicional em negrito e traço contínuo representa o hidrograma unitário, estabelecido previamente.

Os resultados obtidos mostram que todas as distribuições de chuvas com três ou mais ordenadas convergem com um número de iterações inferior a trinta. Dentre as distribuições de chuva restantes, apenas seis casos não convergem após a execução de trinta iterações. O caso extremo associado à distribuição de chuva inicial com uma única ordenada coincidindo com a ocorrência da menor chuva observada converge após setenta iterações.

DETERMINAÇÕES DO HIDROGRAMA UNITÁRIO E DAS PRECIPITAÇÕES EFETIVAS - IGARAPÉ BOLÍVIA.

No período de observação, entre agosto de 2005 e agosto de 2006, foram selecionados os eventos de precipitação – descarga, resultando num conjunto diversificado de quarenta e três hidrogramas observados: eventos com picos isolados de escoamento; eventos com dois picos de escoamento; eventos com três picos e um número de eventos que apresentaram

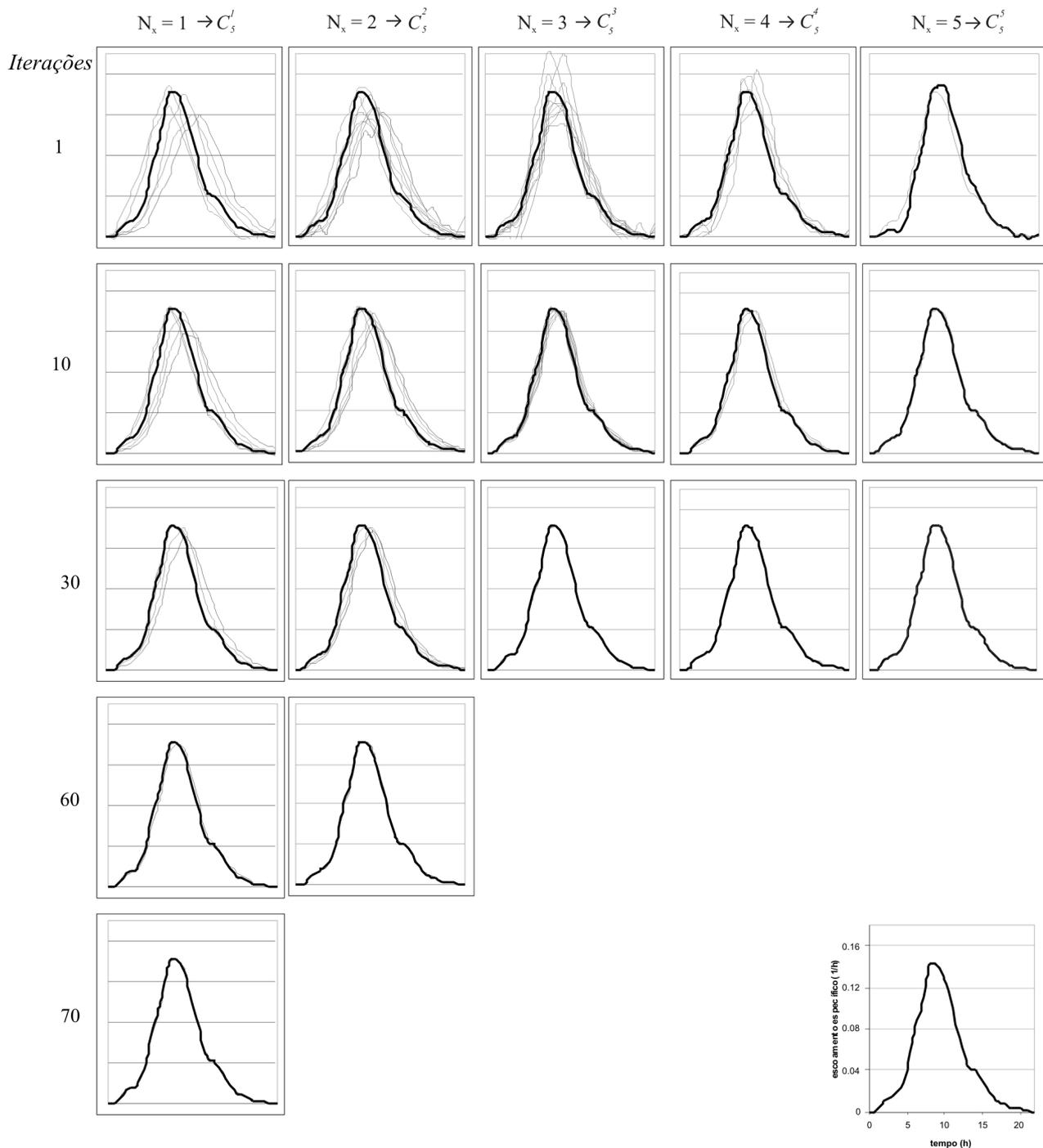


Figura 4 – Configurações de precipitações iniciais e convergência do processo iterativo. (gráfico isolado indica as escalas de tempo - eixo x, e de escoamento específico, eixo y).

quatro ou mais picos de escoamento no igarapé Bolívia. Nesse período de observação, houve apenas um evento extremo de precipitação, descartado em razão do transbordamento na seção do curso d'água

As características principais desses 43 eventos são mostradas na Tabela 1. A organização dos eventos nessa tabela segue a ordem crescente de escoamento superficial produzido, expresso pela precipitação efetiva calculada.

Verifica-se, de acordo com essa tabela, que uma quantidade relativamente pequena da precipitação total (coeficiente de escoamento = 12,3 %) deixa a bacia em forma de escoamento superficial. Do montante que não sai desta forma, uma parte retorna à atmosfera pelo processo de evapotranspiração e o restante armazenado nas camadas do solo da bacia alimenta o escoamento subterrâneo nos igarapés, sobretudo nos períodos de pouca chuva. Os mecanismos de armazenamento e de liberação de águas nas camadas do solo precisam ainda ser estudados, procurando determinar a profundidade da coluna de solo que tenha influência mais direta no escoamento básico. Fajardo *et al.* (2008) perceberam a formação de pelo menos duas camadas bem distintas de solo na mesma área de estudo, sendo a mais superficial com espessura de aproximadamente um metro. Esta camada superior apresenta uma condutividade hidráulica mais elevada que a inferior, dando um escoamento mais rápido à água da chuva infiltrada. Não se sabe se o armazenamento e a liberação de água para o igarapé são influenciados apenas por estas duas camadas ou se existem outros estratos que atuam nesses processos. Esta informação contribuiria muito para entender a fragilidade destes sistemas que ao longo dos anos vêm sofrendo interferências antrópicas, sem que se conheça uma forma segura de manejar estas bacias, evitando causar grandes interferências nos mecanismos que fazem com que os igarapés da região sejam perenes.

Numa ordenação dos resultados de otimização obtidos, considerando eventos com picos isolados, eventos com picos duplos e eventos com picos múltiplos, as representações respectivas são mostradas nas Figuras 5, 6 e 7, abaixo. Na parte superior de cada gráfico é mostrada a distribuição temporal de chuva dos eventos; e na parte inferior os hidrogramas observado e calculado.

O hidrograma unitário médio obtido para o igarapé Bolívia é mostrado na Figura 8, junto com os hidrograms unitários parciais associados aos hidrogramas de picos isolados, picos duplos e picos múltiplos.

Um contraste marcante entre as determinações individuais por eventos de diferentes classes é mostrado nas figuras correspondentes: as determinações associadas aos hidrogramas observados com picos isolados apresentam uma grande dispersão, refletida tanto na variabilidade do tempo de ocorrência dos picos dos hidrogramas unitários individuais, como nas flutuações das curvas representativas correspondentes.

Tabela 1 - Resumo dos Eventos - Hidrogramas 1-43.

Ordem	Data	Hora	Pt (mm)	Pe (mm)	Cs (adim)
1	13/10/2005	16 h	12,76	0,73	0,057
2	28/06/2006	7 h	7,07	0,88	0,124
3	25/08/2006	14 h	10,50	1,17	0,111
4	28/03/2006	14 h	14,73	1,29	0,088
5	25/06/2006	6 h	10,50	1,33	0,154
6	30/08/2006	15 h	4,82	1,35	0,280
7	03/11/2005	5 h	23,24	1,58	0,068
8	10/11/2005	15 h	11,25	1,62	0,144
9	12/03/2006	3 h	51,73	1,62	0,031
10	16/11/2005	11 h	42,84	1,90	0,044
11	02/08/2006	18 h	22,26	1,98	0,089
12	19/06/2006	5 h	23,35	2,21	0,095
13	10/06/2006	8 h	19,98	2,21	0,111
14	30/03/2006	18 h	42,94	2,52	0,059
15	30/07/2006	11 h	36,01	2,62	0,073
16	12/07/2006	13 h	15,95	2,62	0,164
17	03/06/2006	14 h	12,93	2,65	0,205
18	21/11/2005	8 h	27,68	2,79	0,101
19	02/04/2006	10 h	28,20	2,80	0,099
20	30/11/2005	13 h	32,95	3,28	0,100
21	02/01/2006	10 h	5,59	3,31	0,592
22	30/05/2006	11 h	31,75	3,35	0,106
23	30/12/2006	15 h	40,63	3,43	0,084
24	04/12/2005	6 h	70,26	3,49	0,050
25	16/03/2006	14 h	31,99	3,70	0,116
26	22/04/2006	15 h	20,29	3,84	0,189
27	17/12/2005	11 h	32,23	4,42	0,137
28	25/05/2006	4 h	25,01	4,47	0,179
29	18/01/2006	18 h	51,84	4,48	0,086
30	03/05/2006	4 h	74,14	4,48	0,060
31	22/03/2006	13 h	50,31	4,63	0,092
32	05/11/2005	12 h	77,20	4,82	0,062
33	18/04/2006	15 h	32,67	5,21	0,159
34	12/12/2005	15 h	39,14	5,30	0,135
35	06/04/2006	10 h	52,06	6,32	0,121
36	13/04/2006	11 h	71,18	7,42	0,104
37	25/04/2006	7 h	46,12	7,46	0,162
38	19/11/2005	16 h	89,44	7,90	0,088
39	23/11/2005	13 h	113,00	11,38	0,101
40	27/01/2006	14 h	99,48	11,52	0,116
41	26/02/2006	8 h	154,50	17,98	0,116
42	07/05/2006	11 h	198,96	19,07	0,096
43	05/02/2006	13 h	195,34	23,34	0,119
					Cs médio = 0,123

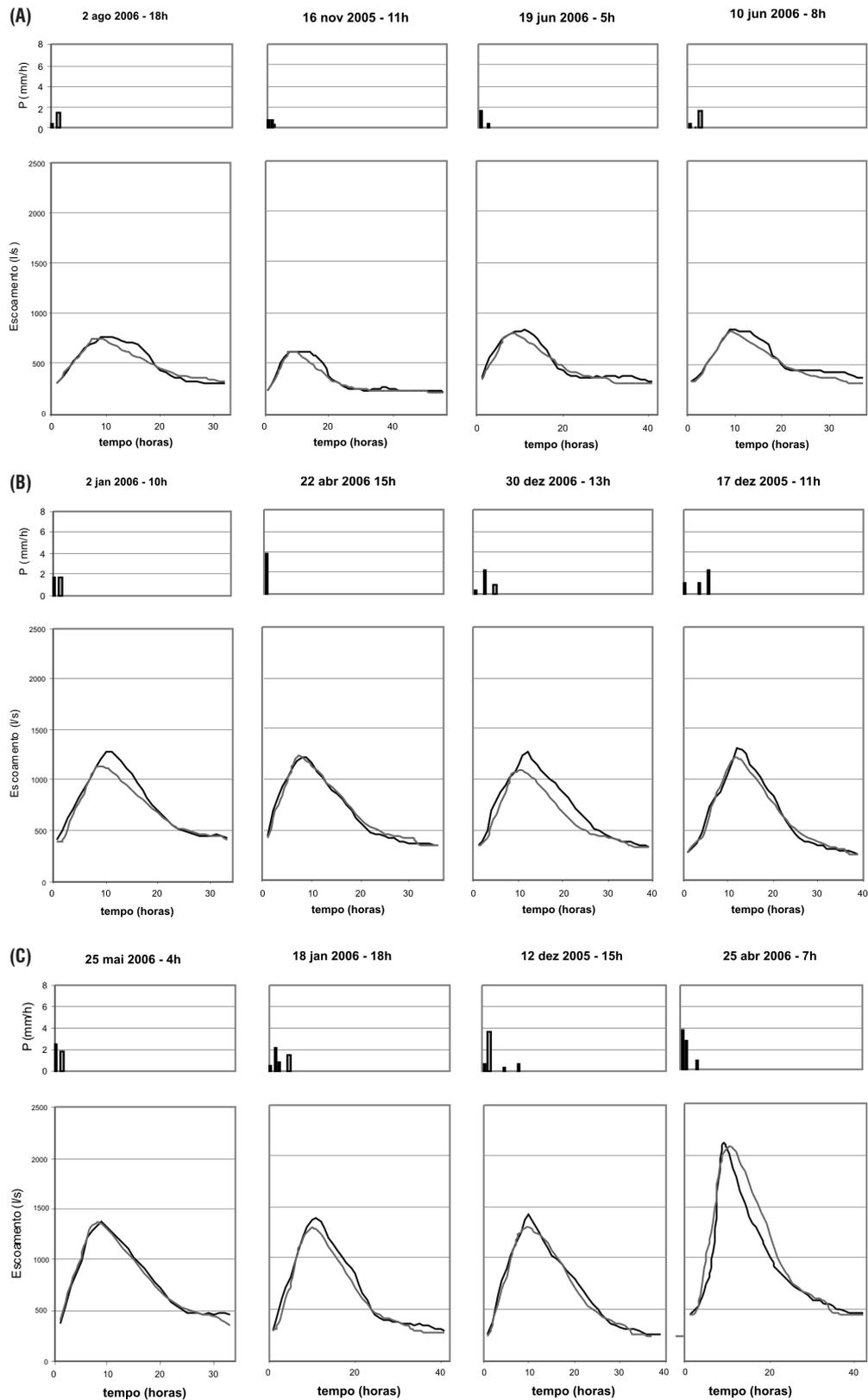
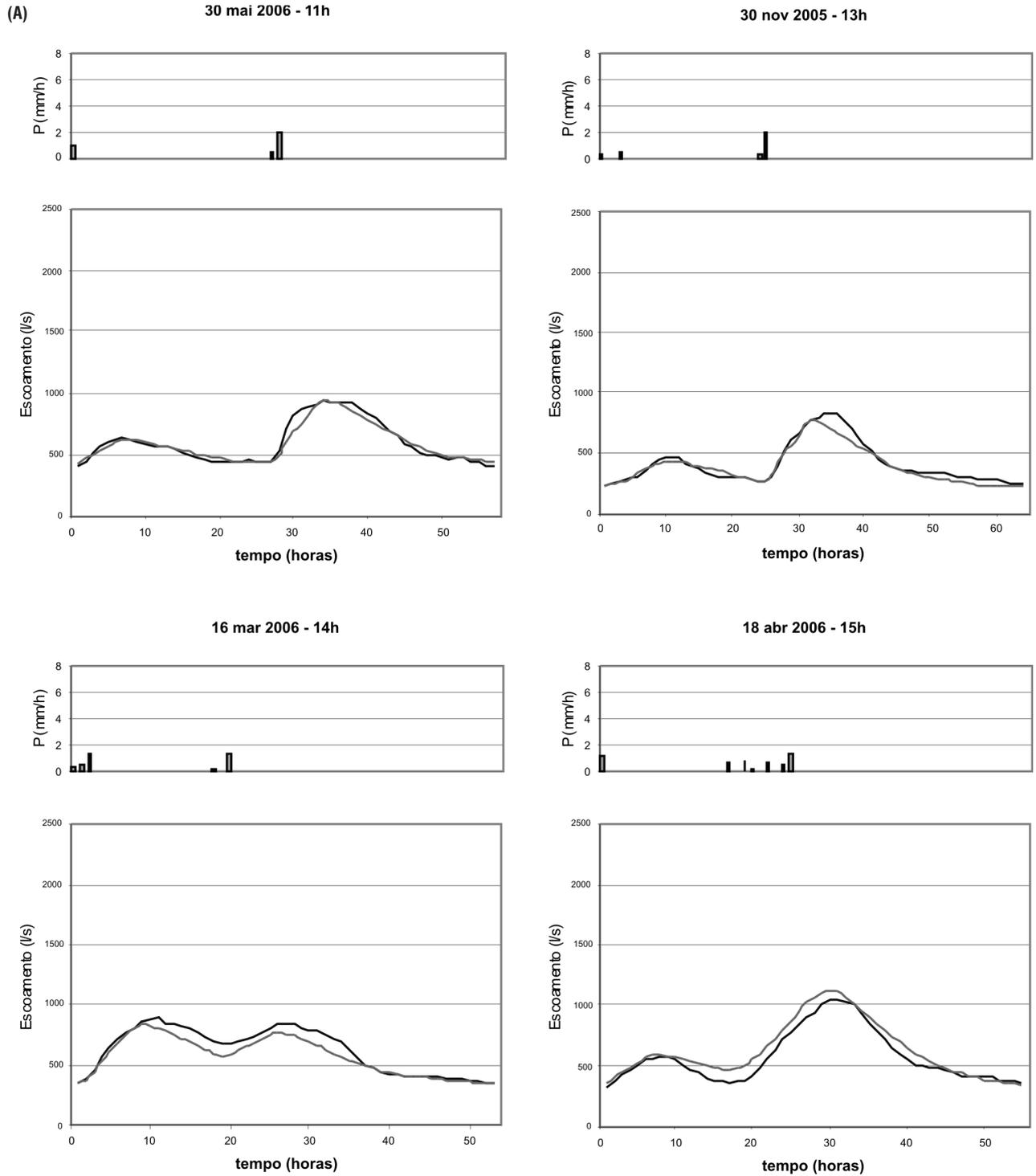
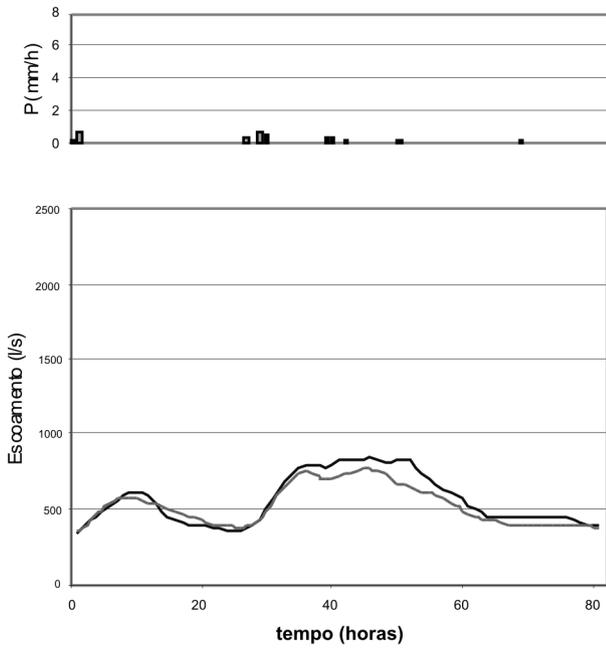


Figura 5 – Eventos de precipitação – descarga no igarapé Bolívia. – Picos Isolados.(a), (b), (c). (-) hidrograma observado; (-) Hidrograma calculado.

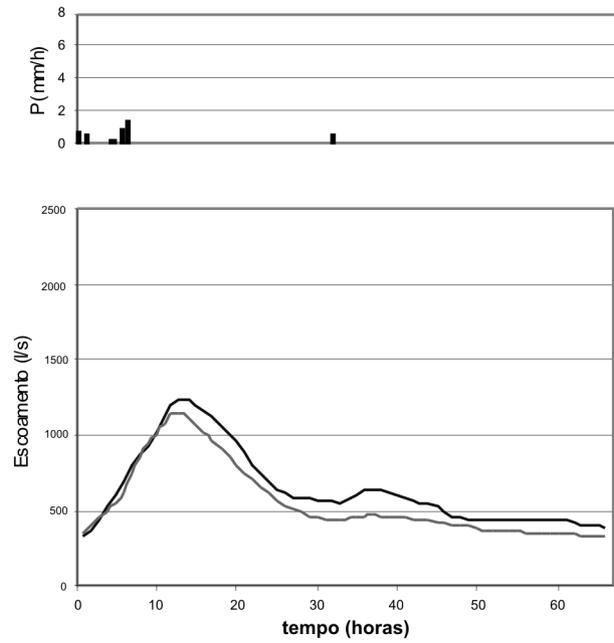


(B)

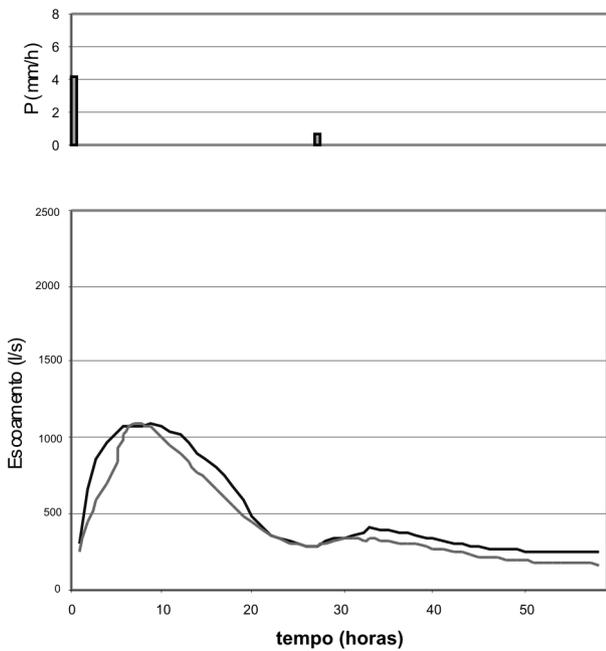
22 mar 2006 - 13h



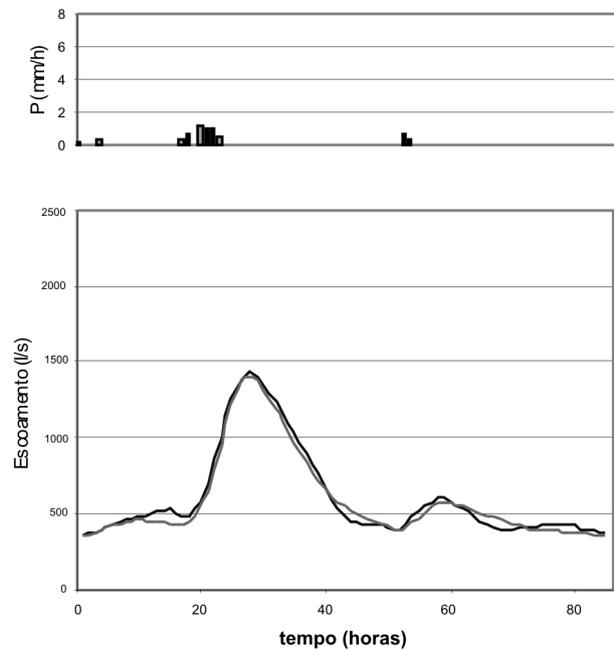
3 mai 2006 - 4h



5 nov 2005 - 12h



6 abr 2006 - 10h



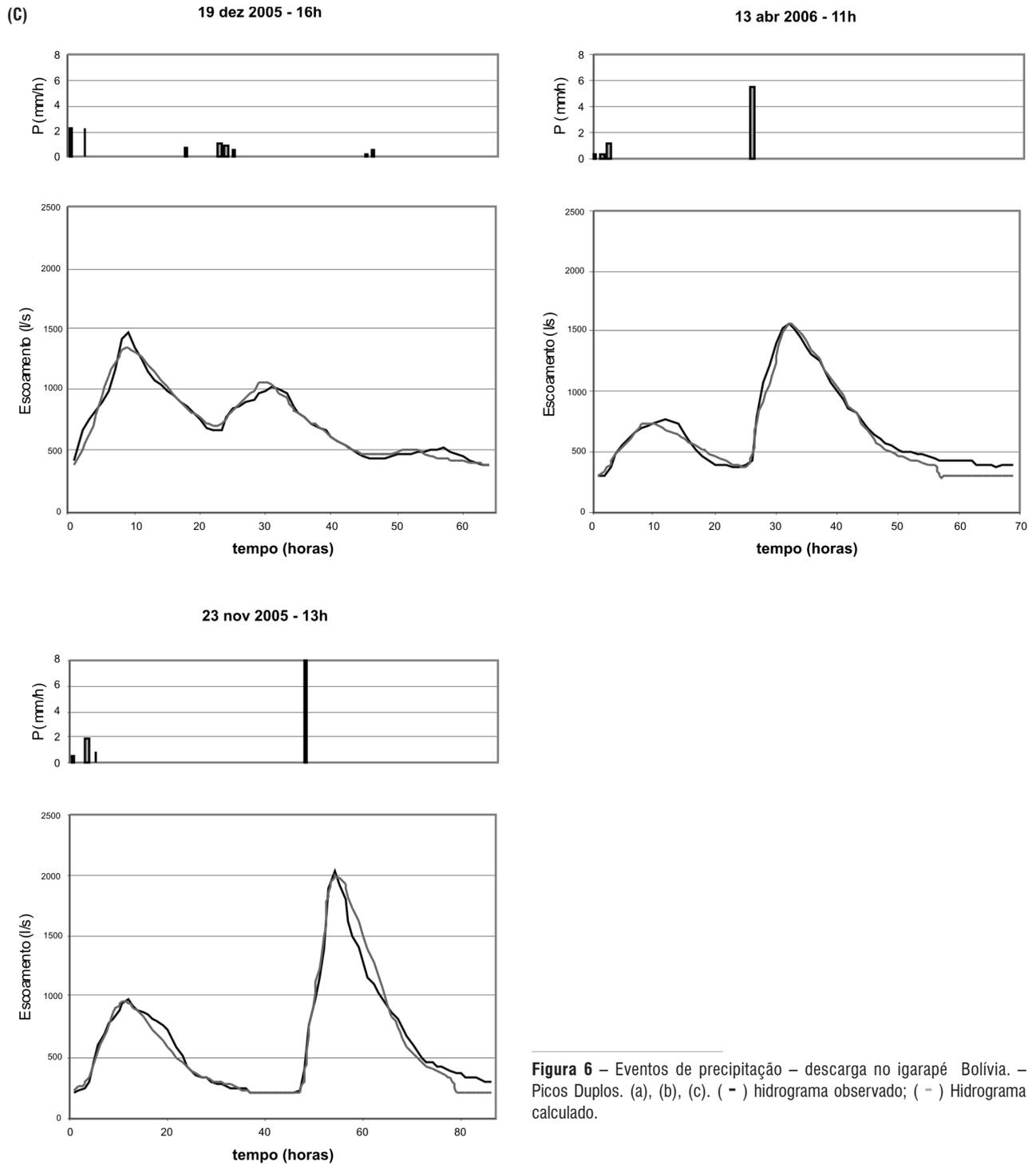
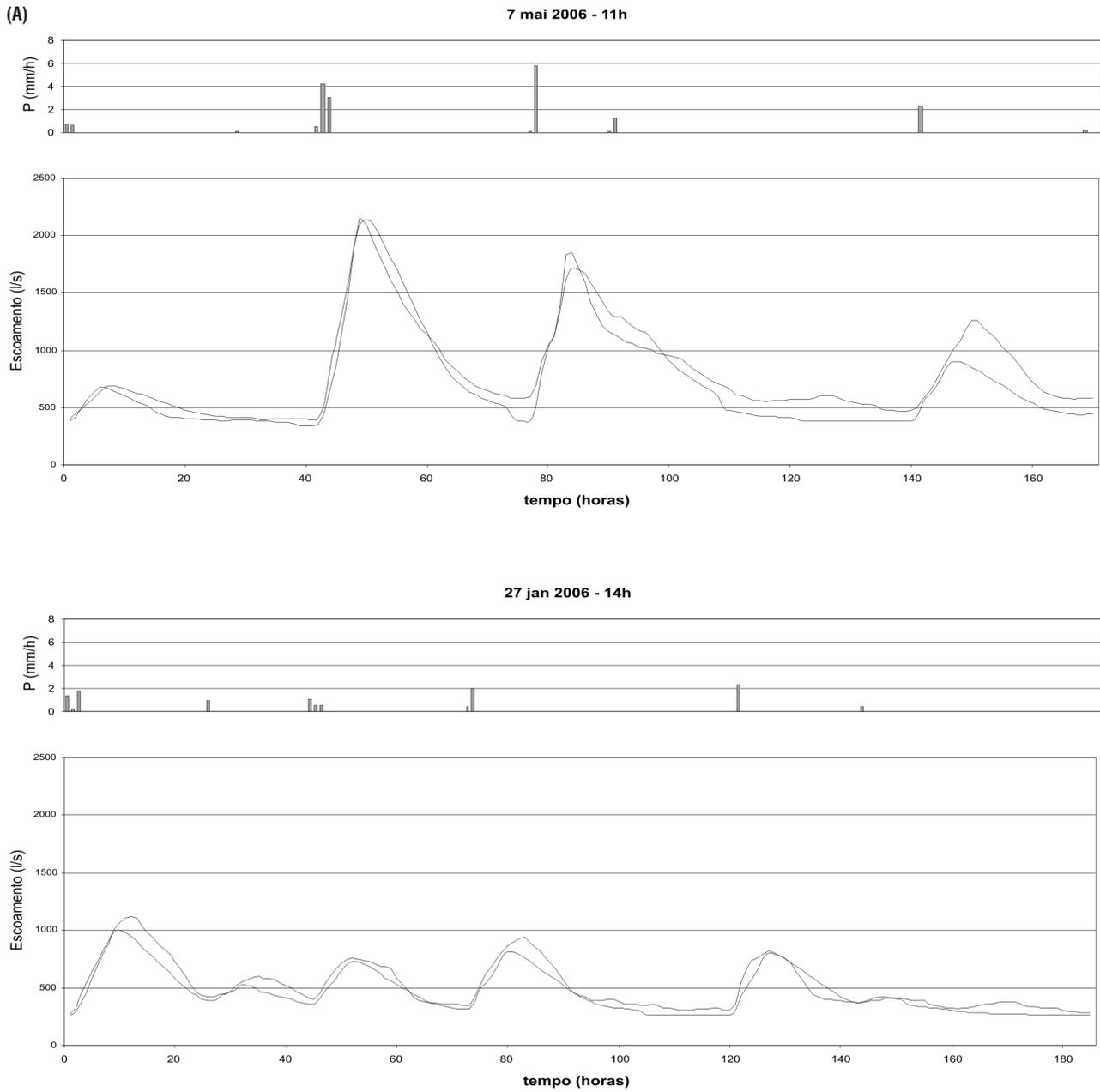


Figura 6 – Eventos de precipitação – descarga no igarapé Bolívia. – Picos Duplos. (a), (b), (c). (-) hidrograma observado; (-) Hidrograma calculado.



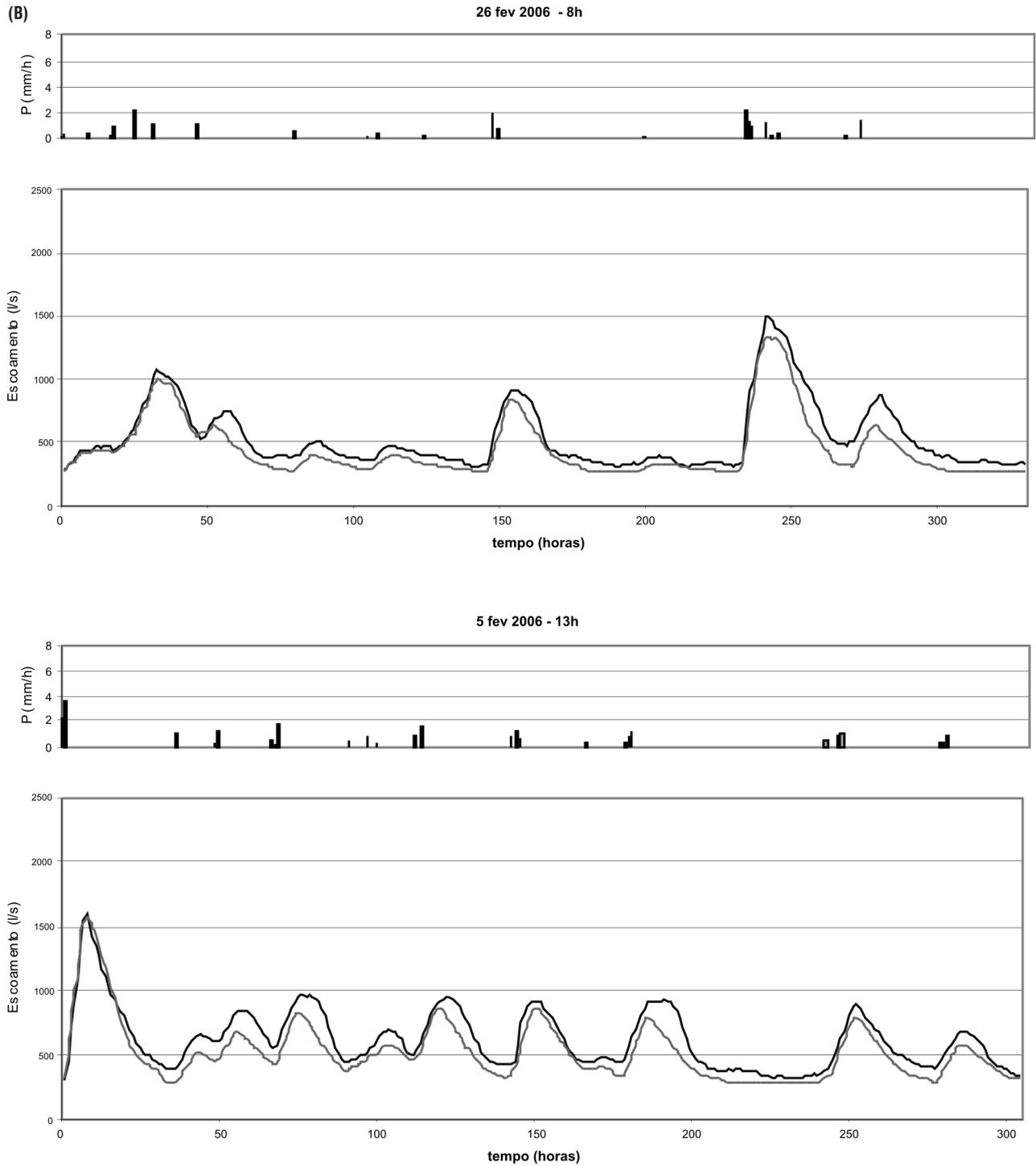


Figura 7 – Eventos de precipitação – descarga no igarapé Bolívia. – Picos Múltiplos. (a). (b). (-) hidrograma observado; (-) Hidrograma calculado.

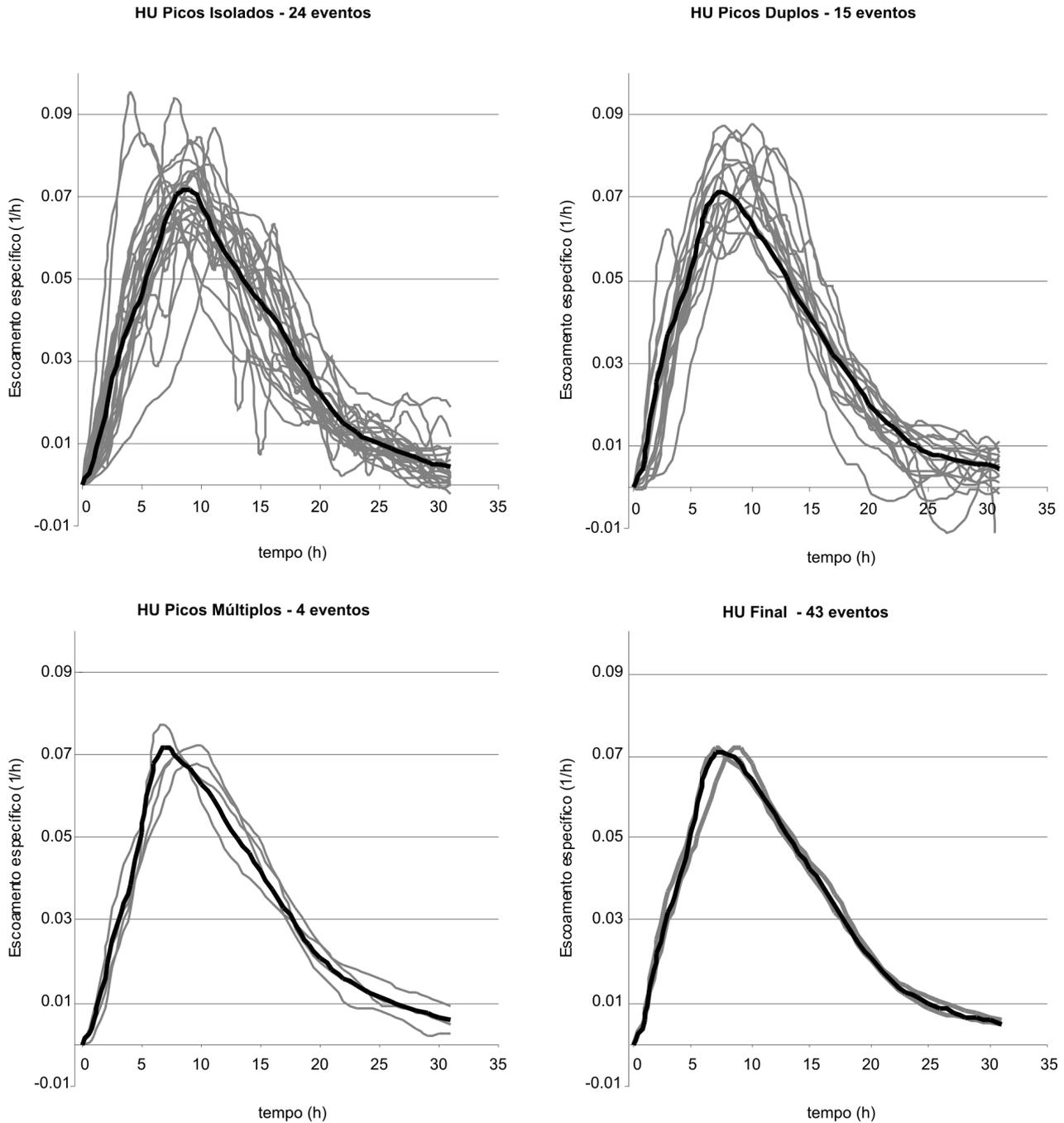


Figura 8 – Hidrograma unitário médio para o igarapé Bolívia e sua variação em função dos hidrogramas observados.

Essa dispersão ocorre nas determinações associadas aos hidrogramas observados com picos duplos, mas de forma bastante atenuada, especialmente no aspecto de regularidade das curvas representativas dos hidrogramas unitários. Na classe dos hidrogramas com picos múltiplos, mesmo que o número de eventos seja bem reduzido, a tendência de regularidade é consolidada pela ausência de qualquer flutuação nas curvas, restando apenas uma pequena variabilidade no tempo de ocorrências dos picos dos hidrogramas unitários. A síntese dos 43 eventos mostra o hidrograma unitário final, abrangendo todas as informações existentes e comparado aos hidrogramas unitários médios determinados para cada uma das classes descritas acima. As pequenas variações entre as curvas assim estabelecidas indicam que a determinação de um hidrograma unitário médio para uma bacia hidrográfica depende essencialmente da quantidade de informação disponível para a sua determinação. As determinações parciais tendem a convergir para uma mesma curva representativa do hidrograma unitário da bacia, não apresentando dependência em relação às classes originais dos hidrogramas observados.

Uma comparação preliminar dos resultados apresentados neste estudo com os resultados de simulação hidrológica obtidos para a Bacia Modelo – ZF2. (Marques Filho *et al.*, 1983) pode ser sintetizada da seguinte forma: (i) os procedimentos de otimização são similares do ponto de vista conceitual nos dois casos, com a diferença de que no estudo da Bacia Modelo apenas o hidrograma unitário é determinado; (ii) a área da bacia associada ao PF1 da Bacia Modelo (11,5 Km²) é da mesma ordem de grandeza daquela do Igarapé Bolívia; (iii) a quantidade e o tipo de eventos selecionados na Bacia Modelo são bastante inferiores ao conjunto de eventos do presente estudo; (iv) os tempos de ocorrência dos picos e a duração total dos hidrogramas unitários para o Igarapé Bolívia e para o PF1 da Bacia Modelos são da mesma ordem de grandeza, tempo de ocorrência do pico: – 7 horas e 5 horas; duração total do hidrograma unitário: 31 horas e 28 horas, respectivamente. A similaridade de resultados obtidos para pequenas bacias hidrográficas na região sugere a realização de novos estudos, utilizando o método descrito, na busca de condições favoráveis à simulação hidrológica em diferentes ambientes florestais.

CONCLUSÃO

O hidrograma unitário médio para o Igarapé Bolívia foi obtido neste estudo com o aproveitamento de quarenta e três eventos de precipitação-escoamento observados na bacia. O algoritmo computacional de otimização criado para a determinação dessa função constitui um artefato numérico iterativo com convergência verificada para diferentes configurações iniciais assumidas de precipitação. A grande dispersão entre as curvas que representam os hidrogramas

unitários calculados a partir de hidrogramas com picos isolados indica a necessidade de um grande número de eventos para gerar um hidrograma médio representativo, em contraste aos eventos complexos em que uma pequena quantidade ou mesmo um único evento distribuído ao longo do tempo já é suficiente para gerar um hidrograma unitário médio para a bacia. As precipitações efetivas calculadas para todos os eventos representam também um conjunto de informação sobre a infiltração ocorrida em cada evento e próprio para investigação futura sobre modelos de infiltração no solo sob floresta primária.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos técnicos da Coordenação de Pesquisas em Clima e Recursos Hídricos do INPA: Afonso Ligório da Motta, Osvaldo Pinto de Albuquerque, Pedrinho de Almeida Paiva e Sérgio Magno Valério de Souza pela preparação, instalação e operação dos sistemas de medidas na bacia experimental; ao bolsista PCI do SIGLAB/CPCS Frederico Octávio Ribeiro Fonseca pela concepção de imagem de localização da Reserva Ducke. Este estudo está inserido no projeto de pesquisa: Regime hidrológico e monitoramento ambiental de bacia hidrográfica em reserva florestal sob crescente pressão antrópica em seu entorno. Ref.: CTHIDRO/CNPQ – 50.3677/03-5.

BIBLIOGRAFIA CITADA

- Diskin, M. H.; Boneh, A. 1975. Determination of an optimal IUH for linear time invariant systems from multi-storms records. *Journal of Hydrology*, 24:57-76.
- Dooge, J. C. I. 1959. A general theory of the unit hydrograph. *Journal of Geophysical Research*, 64(2): 241- 256.
- Dooge, J. C. I. 1973. Linear theory of hydrological systems. Technical Bulletin no. 1468, A.R.S, U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C. 327p.
- Duband, D.; Obled, C.; Rodriguez, J. Y. 1993. Unit Hydrograph revisited: an alternate iterative approach to UH and effective precipitation identification. *Journal of Hydrology*, 150: 115-149.
- Fajardo, J.D; Ferreira, S. J. F.; Miranda, S. A. F.; Marques Filho, A. O. 2008. Características hidrológicas do solo saturado na reserva florestal Adolpho Ducke - Amazônia Central. *Árvore (artigo submetido em 2008)*
- Hewlett, J. D.; Hibbert, A. R. 1967. Factors affecting the response of small watersheds to precipitation in humid areas. In: Sopper, W. E.; Lull, H. W. (Eds). *Forest Hydrology*. Pergamon Press. Oxford. p. 275-290.
- Marques Filho, A. O.; Dallarosa, R. G. 2000. Intercepção de radiação solar e distribuição espacial de área foliar em floresta de terra firme da Amazônia Central. *Acta Amazonica*, 30(3):453-470.

Marques Filho, A. O.; Ribeiro, M. N. G.; Santos, J. M.; Salati, E. 1982. Simulação de escoamento superficial em bacias representativas na Amazônia. *Acta Amazonica*, 12(3) Suplemento:29-37.

Maia, A. N.; Amaral, I. R.; Versiani, B. R. 2006. Metodologia DPFT de identificação do hidrograma unitário e das precipitações efetivas: estudo de caso para a bacia hidrográfica de Juatuyba - MG. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 11(1): 79-90.

Nalbantis, I.; Obled, C.; Rodriguez, J. Y. 1995. Unit hydrograph and effective precipitation identification. *Journal of Hydrology*, 168: 127-157.

Nash, J. E. 1959. Systematic determination of unit hydrograph parameters. *Journal of Geophysical Research*, 64(1): 111- 115.

Newton, D. W.; Vinyard, J. W. 1967. Computer-determined unit hydrograph from floods. *Journal of the Hydraulics Division - ASCE*, 93(Hy5): 219-235.

Recebido em 08/04/2009

Aceito em 27/06/2009