

ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS DO MODELO IPH II PARA ALGUMAS BACIAS URBANAS BRASILEIRAS

Andréa Germano

*CPRM - Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais
Rua Banco da Província, 105 Porto Alegre, RS*

Carlos E. M. Tucci e André L. L. da Silveira

*Instituto de Pesquisas Hidráulicas - UFRGS
Av. Bento Gonçalves, 9500 - Caixa Postal 5029 - CEP 91501-970 Porto Alegre, RS
tucci@if.ufrgs.br*

RESUMO

O uso de modelos hidrológicos precipitação-vazão para estimativa de hidrograma de projeto em bacias urbanas é freqüente devido a falta de dados de vazão observados e pela alteração das características das bacias.

O modelo hidrológico IPH II tem sido utilizado por vários profissionais em recursos hídricos para estimativa de hidrogramas de cheias em bacias urbanas. No entanto, uma das principais dificuldades na sua utilização é a estimativa dos seus parâmetros dentro dos diferentes cenários.

Neste estudo são utilizados dados hidrológicos de 28 bacias urbanas em 6 cidades brasileiras, representando eventos de cheia. Com base nessas informações e nas características das bacias, o modelo foi ajustado aos eventos mencionados.

Com uma análise dos prognósticos e da variabilidade dos parâmetros foi possível orientar o uso deste modelo para outras bacias brasileiras.

ESTIMATIVA DO ESCOAMENTO EM BACIAS URBANAS

As bacias urbanas apresentam dificuldades adicionais para estimativa da vazão, devido ao seguinte: (i) existe um reduzido número de postos fluviométricos em áreas urbanas por causa de dificuldades em estabelecer uma curva de descarga, nos efeitos de jusante na seção de medição e na manutenção de operação de um posto sujeito a muito vandalismo; (ii) as séries hidrológicas em bacias urbanas em desenvolvimento não são homogêneas, devido as alterações no uso do solo que influenciam a vazão resultante.

Estas dificuldades fazem com que quantidade e a qualidade dos dados disponíveis sejam reduzidas. O profissional que necessita destas

vazões para estudos de gestão da bacia urbana, como: projeto de controle de cheias e de impacto ambiental, fica sujeito a utilização de técnicas baseadas em informações que, muitas vezes, nada tem a ver com a bacia em estudo.

Os modelos hidrológicos precipitação-vazão como MIT (Leclerc e Schaake, 1973); SCS (1975) e IPH II (Tucci et al. 1981) têm sido utilizados para minimizar este tipo de problema. Esses modelos, utilizam a precipitação existente na bacia para estimar a vazão, e necessitam de informações históricas do local ou de outras bacias, com características semelhantes para estimar os parâmetros, que geralmente compõem a estrutura dos mesmos.

O IPH II (Tucci et al, 1981; Tucci e Campana, 1993) foi desenvolvido com o objetivo de buscar um modelo com o máximo de parcimônia e que pudesse ser utilizado em bacias de diferentes tamanhos e características. Os algoritmos utilizados são conhecidos na literatura, da mesma forma que seus parâmetros.

Neste estudo são discutidos procedimentos de estimativa dos parâmetros com base em dados de bacias brasileiras, buscando melhorar seu uso para diferentes tipos de aplicação em bacias urbanas.

MODELO IPH II

Apesar do modelo ser suficientemente documentado na literatura (Tucci et al, 1981; Tucci e Campana, 1993) será descrito neste texto para que o leitor possa entender a ligação dos parâmetros com a estrutura do modelo.

O modelo IPH II na sua última versão Tucci e Campana (1993) é descrito a seguir:

O modelo é composto dos seguintes algoritmos:

1. perdas através da evaporação e interceptação;

2. separação de escoamentos;
3. propagação dos escoamentos superficial; e
4. propagação subterrânea.

$$I(t) = I_0 + (I_0 - I_b)h^t \quad (3)$$

$$T(t) = I_b(1 - h^t) \quad (4)$$

Algoritmo de perdas: evaporação e interceptação

A evaporação inicialmente é retirada da precipitação quando I_h for inferior. Caso contrário, a evaporação potencial é atendida pelo reservatório de interceptação (áreas permeáveis e depressões). No caso em que este reservatório seja totalmente esgotado, o déficit de evaporação potencial passa a ser atendido pela água contida no solo através da relação linear:

$$ES_t = \frac{EP_t \cdot S_t}{S_{max}} \quad (1)$$

onde ES_t é a evaporação do solo no tempo t , EP_t é a evaporação potencial e S_t é a umidade do solo, todos no intervalo t , e S_{max} o teor máximo de umidade do solo.

Quando a precipitação é maior que a evaporação potencial, a diferença é retida por interceptação, até atingir sua capacidade máxima (R_{max}). Parte da precipitação restante é utilizada no algoritmo de infiltração para o cálculo dos valores superficial e percolado nas áreas permeáveis. A outra parte da precipitação resultante, sobre as áreas impermeáveis, é escoada apenas superficialmente, sem passar pelo algoritmo referido. IMP é o parâmetro utilizado para definir a percentagem de área impermeável na bacia.

Algoritmo de separação do escoamento

A equação da continuidade, aplicada à zona superior do solo, é expressa por:

$$\frac{dS}{dt} = I - T \quad (2)$$

onde S é o armazenamento na camada superior do solo; I é a taxa de infiltração e T é a percolação, considerada como o escoamento na zona superior do solo.

Para representar I e T , o modelo faz uso, respectivamente, das equações de Horton e Berthelot (Tucci et al., 1981):

onde $h = e^{-k}$; k é um parâmetro empírico, relacionado ao tipo de solo; I_0 é a capacidade de infiltração quando o solo está com armazenamento correspondente à capacidade de infiltração mínima; e t é o tempo.

Substituindo-se as Equações (3) e (4) na Equação (2) e integrando-se, resulta:

$$S = a_i + b_i I \quad (5)$$

$$S = b_t T \quad (6)$$

onde:

$$a_i = \frac{-I_0^2}{\ln h (I_0 - I_b)}$$

$$b_i = \frac{I_0}{\ln h (I_0 - I_b)}$$

$$b_t = \frac{-I_0}{\ln h \cdot I_b}$$

As situações do algoritmo são:

- a. a precipitação é maior ou igual a capacidade de infiltração ($P_t \geq I_t$). Neste caso é calculado I_{t+1} , pela Equação de Horton (3); S_{t+1} pela Equação (5) e T_{t+1} , pela Equação (6). O volume infiltrado é obtido por integração da função de infiltração:

$$V_i = \int_t^{t+1} I dt = I_b \Delta t + \frac{I_t - I_b}{\ln h} (h^{\Delta t} - 1) \quad (7)$$

O volume escoado também é obtido pela integração da função de infiltração:

$$V_e = (P_t - I_b) \Delta t - \frac{(I_t - I_b)}{\ln h} (h^{\Delta t} - 1) \quad (8)$$

O volume percolado é obtido pela equação:

$$V_p = \int_t^{t+1} T dt = V_i - S_{t+1} + S_t \quad (9)$$

- b. a precipitação é menor do que a capacidade de infiltração I_t ($P_t < I_t$). Neste caso, assume-se que toda a precipitação se infiltra:

$$S_{t+1} = S_t + P_t \cdot \Delta t - \frac{(T_{t+1} + T_t)}{2} \Delta t \quad (10)$$

No fim do intervalo a capacidade de infiltração I_{t+1} é obtida pela Equação (5). Nesta situação duas alternativas podem apresentar-se: $I_{t+1} > P_t$ e $I_{t+1} < P_t$.

Quando $I_{t+1} > P_t$, a percolação é obtida pela Equação (6). O volume infiltrado é toda a precipitação no intervalo de tempo e o volume escoado é nulo.

Quando $I_{t+1} < P_t$, deve-se dividir o intervalo Δt em duas partes, sendo Δt_x a duração do primeiro subintervalo, do qual $I_x = P$. Após o cálculo de S_x e T_x , através do mesmo procedimento seguido no caso de $I_{t+1} > P_t$, extrai-se o valor de Δt_x da equação (da continuidade).

$$\Delta t_x = \frac{2b_t (S_x - S_t)}{2b_t P - S_x - S_t} \quad (11)$$

O volume escoado superficialmente no primeiro subintervalo será nulo. Observando-se que $V_t = P_t \Delta t_x$, as variáveis do segundo subintervalo podem ser calculadas como no caso $I_t < P_t$, utilizando como Δt o valor $(\Delta t - \Delta t_x)$. Os volumes são obtidos pela soma de dois intervalos.

Algoritmo de escoamento superficial

A propagação do volume superficial, determinado no algoritmo anterior, é feita até a seção principal da bacia pelo método de Clark. Este método utiliza a teoria do histograma tempo-área para representar e efeito de translação e o modelo do reservatório linear simples para o amortecimento. O volume trasladado é igual a:

$$V_t = \sum_{j=1}^t V_{e_{t-j+1}} f_j \quad (12)$$

O histograma tempo-área pode ser determinado através de um conhecimento detalhado da bacia, e quando não se dispõe destas informações pode-se utilizar o histograma tempo-área sintético (HEC, 1974). Este histograma é obtido admitindo-

se que o tempo de percurso é proporcional à distância do ponto em estudo à seção principal.

Histograma tempo-área sintético -

Considera-se a área de contribuição relacionada ao tempo de percurso pelas seguintes equações:

$$A_c = aT^n \quad \text{para} \quad 0 < T < T_c/2$$

$$A_c = 1 - a(T_c - T)^n \quad \text{para} \quad T_c/2 < T < T_c$$

onde A_c é a área contribuinte acumulada expressa relativamente à área total, T o tempo, T_c o tempo de concentração da bacia e n o coeficiente que varia com a forma da bacia.

O histograma tempo-área é dividido em k intervalos onde as ordenadas são:

$$f_i = (A_{c_i} - A_{c_{i-1}}), \quad \text{para} \quad i = 1, 2, 3 \dots k.$$

utilizando histograma tempo-área.

Histograma tempo-área com base no

cálculo das isócronas - Essa reformulação baseia-se nas isócronas de uma bacia. A ordenada do histograma tempo-área i é obtida por:

$$f_i = \frac{A_i}{A_t} \quad (13)$$

onde A_i é a área de contribuição correspondente a duas isócronas adjacentes com tempo médio t_i de contribuição à seção principal da bacia. O histograma tempo-área fica representado pelas ordenadas f_i , para $i = 1, 2, \dots, n$; e A_t é a área total da bacia. O histograma tempo-área foi obtido com base nas características da precipitação e no tempo de deslocamento das diferentes partes da bacia urbana.

O algoritmo de separação do escoamento é utilizado para a parcela permeável da bacia. A altura de água resultante deste algoritmo é $V_s(t)$. A altura de água superficial das superfícies impermeáveis é $P(t)$. A altura total de água superficial resultante das superfícies permeáveis e impermeáveis é:

$$V(t) = \sum_{i=r}^t V_{t-i+1} \cdot f_p(i) + \sum_{i=r}^t P_{t-1+1} \cdot f_m(i) \quad (14)$$

onde: $r = 1$ para $t < n$; $r = t - n + 1$ para $t > n$; n é o número de ordenadas do histograma tempo-área; $f_p(i)$ é um fator de ponderação do volume de esco-

amento superficial da parcela permeável, estimado como:

$$f_p(i) = f(i) \cdot (1 - \alpha) \quad (15)$$

onde, $f_m(i)$ é o fator de ponderação do volume de escoamento superficial da parcela impermeável, estimado como:

$$f_m(i) = \alpha_i \cdot f(i) \quad (16)$$

Essa metodologia considera que a precipitação é uniforme sobre toda a bacia. Para considerar a variabilidade espacial da precipitação, estima-se um fator de correção das ordenadas do histograma tempo-área. A precipitação média na bacia é obtida por:

$$P_m = \sum_{i=1}^n P_i \cdot A_i \quad (17)$$

onde P_i é a precipitação entre duas isócronas adjacentes e corresponde a ordenada $f(i)$ do histograma tempo-área.

O fator de correção é calculado como:

$$\beta_i = \frac{P_i}{P_m} \quad (18)$$

Logo, modificam-se as ordenadas do histograma tempo-área para:

$$f(i)^c = f(i) \cdot \beta_i \quad (19)$$

Para levar em conta o efeito de armazenamento, o histograma resultante do uso do histograma tempo-área é simulado através do método do Reservatório Linear Simples. Este modelo considera a relação:

$$S = k_s Q_s \quad (20)$$

onde S é o armazenamento de um reservatório fictício, k_s o parâmetro do mesmo e Q_s a vazão de saída do escoamento superficial. Combinando-se com a equação da continuidade, tem-se:

$$Q_{s_{t+1}} = Q_{s_t} e^{-\frac{\Delta t}{k_s}} + E_{t+1} (1 - e^{-\frac{\Delta t}{k_s}}) \quad (21)$$

onde Q_{s_t} e $Q_{s_{t-1}}$ são as vazões nos intervalos t e $t-1$ e V_t a precipitação efetiva.

Algoritmo de escoamento subterrâneo

A propagação subterrânea é calculada por equação semelhante a (21)

$$Q_b = Q_{b_t} e^{-\frac{\Delta t}{k_{sub}}} + V_{p_{t+1}} (1 - e^{-\frac{\Delta t}{k_{sub}}}) \quad (22)$$

onde k_{sub} é o tempo médio de esvaziamento do aquífero e V_{pt} é o volume percolado.

A vazão total é obtida pela soma de Q_b e Q_s em cada intervalo de tempo.

Variabilidade dos parâmetros do modelo

Os parâmetros utilizados pelo modelo, que necessitam ser ajustados, são R_{max} , l_0 , l_b , h , k_s , t_c e k_{sub} . R_{max} representa as perdas iniciais que variam com as características da bacia hidrográfica e também com as condições antecedentes ao evento. Bacias com alto índice de urbanização ou com solo em condições de saturação, apresentam pequenos valores para R_{max} . Bacias com vegetação e / ou grandes depressões, devem possuir valores altos. Esse parâmetro é ajustado através da análise dos volumes observados e calculados.

l_0 , l_b e h são os parâmetros de separação de escoamentos. Os parâmetros l_0 e h definem a capacidade máxima de umidade do solo ($= -l_0/lnh$), enquanto que l_b define a capacidade máxima da percolação. Tucci (1979) analisou a sensibilidade desses parâmetros através de equações e experimentos numéricos. O autor chegou aos seguintes resultados: (i) os parâmetros de l_0 e l_b variam de acordo com o valor de h ; (ii) o aumento de l_0 , l_b e h produzem redução do volume de escoamento superficial; (iii) a influência de l_0 diminui a medida que diminui o valor de h , aumentando a influência de l_b .

Os parâmetros k_s e t_c determinam a propagação superficial. O parâmetro k_s , que é o tempo de retardo do escoamento superficial, depende do tempo de concentração da bacia, do armazenamento e da celeridade da onda, que é função da vazão de pico. O tempo de concentração define o histograma tempo-área e pode ser estimado previamente por expressões adequadas ao sistema que está sendo estudado.

O parâmetro k_{sub} representa o tempo médio de esvaziamento do reservatório de escoamento subterrâneo. Este parâmetro pode ser estimado a partir da recessão dos hidrogramas observados.

RESULTADOS

Os dados hidrológicos disponíveis de bacias urbanas brasileiras utilizados neste estudo são apresentados na Tabela 1. Representam cinco cidades brasileiras (Curitiba, Joinville, Porto Alegre, Rio de Janeiro e São Paulo) e 28 bacias urbanas e suburbanas. Destas, 60% são bacias com área impermeável maior que 20% e 71% com área inferior a 30 km².

Os dados foram obtidos de diferentes estudos e variam quanto a: (i) qualidade da curva de descarga; (ii) discretização temporal; (iii) características físicas das bacias.

Os eventos foram selecionados com base nos seguintes critérios: (i) existência de dados pluviográficos e linigráficos na mesma escala de tempo; (ii) eventos significativos; (iii) consistência dos dados. Com base nesta seleção resultaram 230 eventos.

Ajuste dos parâmetros

Inicialmente o modelo foi ajustado individualmente a cada evento, permitindo que os parâmetros variassem de acordo com a busca das melhores estatísticas e do melhor resultado gráfico visual. Os resultados de alguns eventos são apresentados nas Figuras 1 a 4.

Os parâmetros de infiltração I_0 e h são muito sensíveis, mas seus valores podem variar muito entre bacias. O parâmetro I_0 apresentou pequena variação e pouca sensibilidade, permitindo a adoção de valores médios. O parâmetro de perdas iniciais mostrou-se pouco variável de evento para evento, podendo ser fixado em cada bacia de acordo com critérios de projeto. Seu valor é quase nulo quando o evento selecionado ocorre após um período chuvoso. O parâmetro de água subterrânea mostrou-se pouco sensível para a simulação de cheias, como era esperado. No entanto, para a

Tabela 1. Resumo das informações das bacias.

| Bacia | Cidade | Nº de eventos | Área (km ²) | Perímetro (km) | Talvegue (km) | Decliv. % | IMP % | LCG (km) |
|------------------|----------------|---------------|-------------------------|----------------|---------------|-----------|-------|----------|
| Casa de Portugal | Porto Alegre | 5 | 6,7 | 12,7 | 3,8 | 4,1 | 1 | 1,6 |
| Saint Hilaire | Porto Alegre | 5 | 6,4 | 11,3 | 3,8 | 1,6 | 0 | * |
| Bela Vista | Porto Alegre | 6 | 2,5 | 7,1 | 2,4 | 1,9 | 53 | 1,2 |
| Arroio Meio | Porto Alegre | 8 | 5,2 | 9,3 | 4,0 | 5,3 | 10 | * |
| Beco do Carvalho | Porto Alegre | 5 | 3,5 | 7,8 | 2,4 | 5,2 | 18 | 1,1 |
| Cascatinha I | Porto Alegre | 8 | 8,0 | * | 4,9 | 4,0 | 27 | * |
| Cascatinha II | Porto Alegre | 5 | 4,0 | * | 1,3 | 4,0 | 25 | * |
| Mathias | Joinville | 9 | 1,9 | 6,5 | 2,5 | 1,8 | 16 | 1,1 |
| Jaguarão | Joinville | 4 | 6,5 | 11,8 | 4,0 | 0,7 | 8 | 2,3 |
| Prado Velho | Curitiba | 13 | 42,0 | 22,3 | 11,3 | 0,9 | 40 | 4,2 |
| Afonso Camargo | Curitiba | 3 | 112,3 | * | 29,5 | * | 15 | * |
| Gregório | São Carlos | 4 | 15,6 | 23,5 | 8,4 | 2,0 | 29 | 4,4 |
| Carapicuíba | São Carlos | 2 | 23,1 | 22,0 | 8,9 | 0,1 | 19 | 3,0 |
| Cabuçu de Cima | São Paulo | 3 | 106,8 | 52,5 | 22,4 | 0,1 | 10 | 5,5 |
| Tiquatira | São Paulo | 4 | 17,3 | 22,2 | 8,4 | 0,6 | 62 | 3,2 |
| Jaguará | São Paulo | 2 | 13,9 | 18,5 | 7,7 | 0,6 | 32 | 3,2 |
| Ipiranga | São Paulo | 2 | 27,1 | 26,0 | 10,1 | 0,2 | 50 | 4,2 |
| Águas Espraiadas | São Paulo | 3 | 12,0 | 22,7 | 7,8 | 0,6 | 60 | 4,6 |
| Vermelho | São Paulo | 2 | 14,4 | 19,2 | 6,3 | 0,8 | 30 | 4,7 |
| Pirajussara | São Paulo | 4 | 57,9 | 38,2 | 19,8 | 0,1 | 35 | 9,0 |
| Meninos | São Paulo | 8 | 106,7 | 37,5 | 16,4 | 0,1 | 40 | 8,7 |
| Tamanduatei | São Paulo | 2 | 137,4 | 44,2 | 23,4 | 0,1 | 28 | 11,5 |
| Mandaqui | São Paulo | 3 | 19,0 | 17,7 | 6,1 | 0,6 | 58 | 3,3 |
| Jacaré | Rio de Janeiro | 2 | 7,0 | * | 6,4 | 11,3 | 22,5 | * |
| Faria | Rio de Janeiro | 3 | 20,6 | * | 7,5 | 5,3 | 30,9 | * |
| Timbo | Rio de Janeiro | 5 | 10,6 | * | 9,2 | 4,4 | 29,6 | * |
| Sarapuí | Rio de Janeiro | 4 | 103,0 | * | 23,3 | 3,6 | 16,3 | * |
| Saracuruna | Rio de Janeiro | 7 | 91,3 | * | 24,8 | 5,8 | 1 | * |

* informação não disponível.

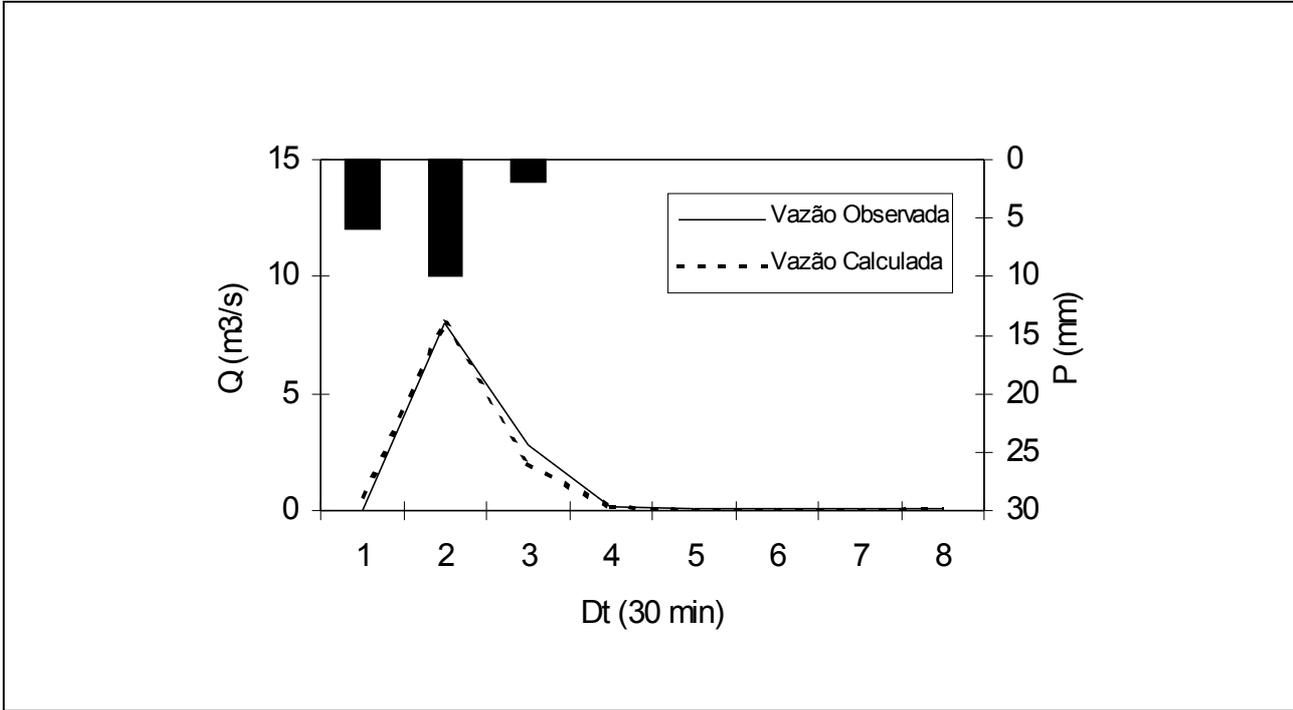


Figura 1. Evento em 03/04/81 na bacia Bela Vista em Porto Alegre.

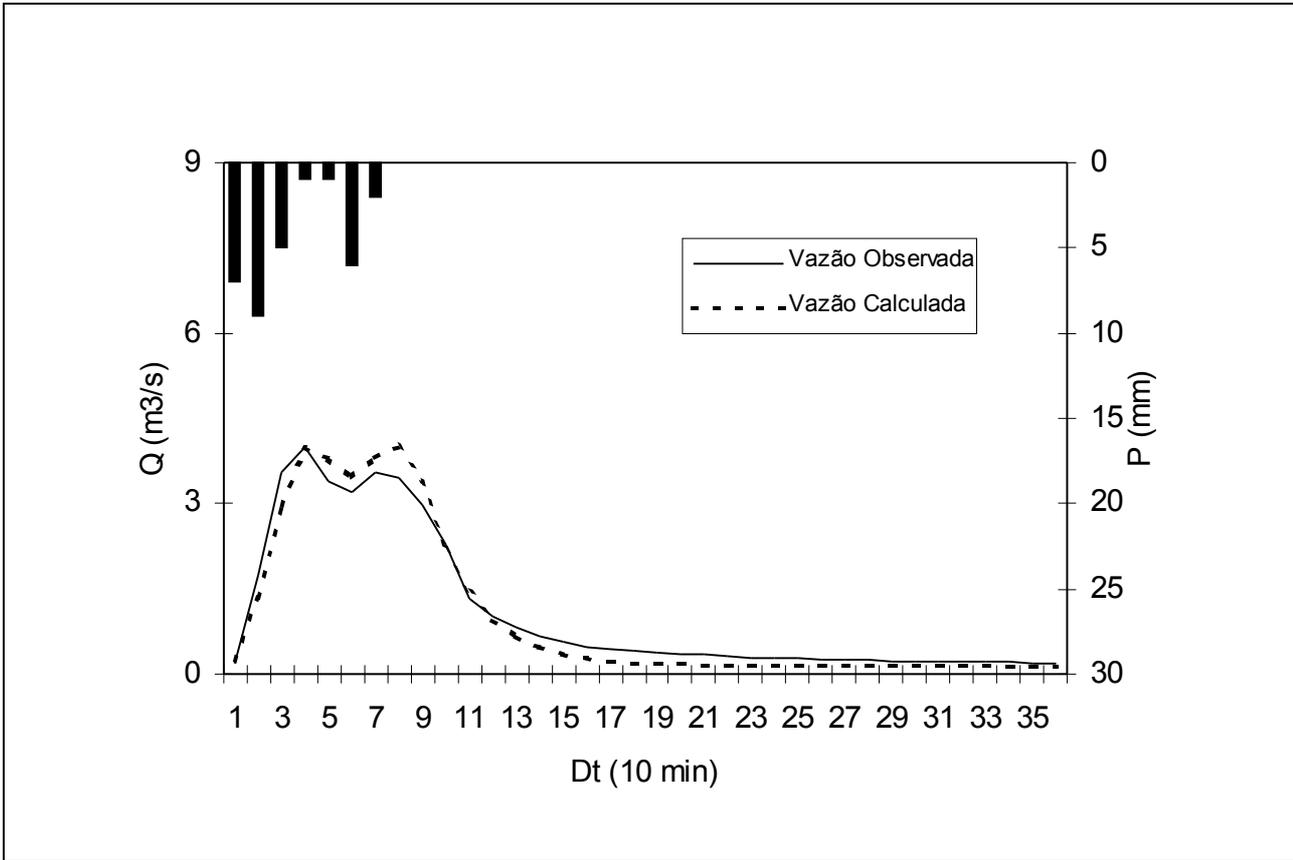


Figura 2. Evento em 20/10/80 na bacia Mathias em Joinville.

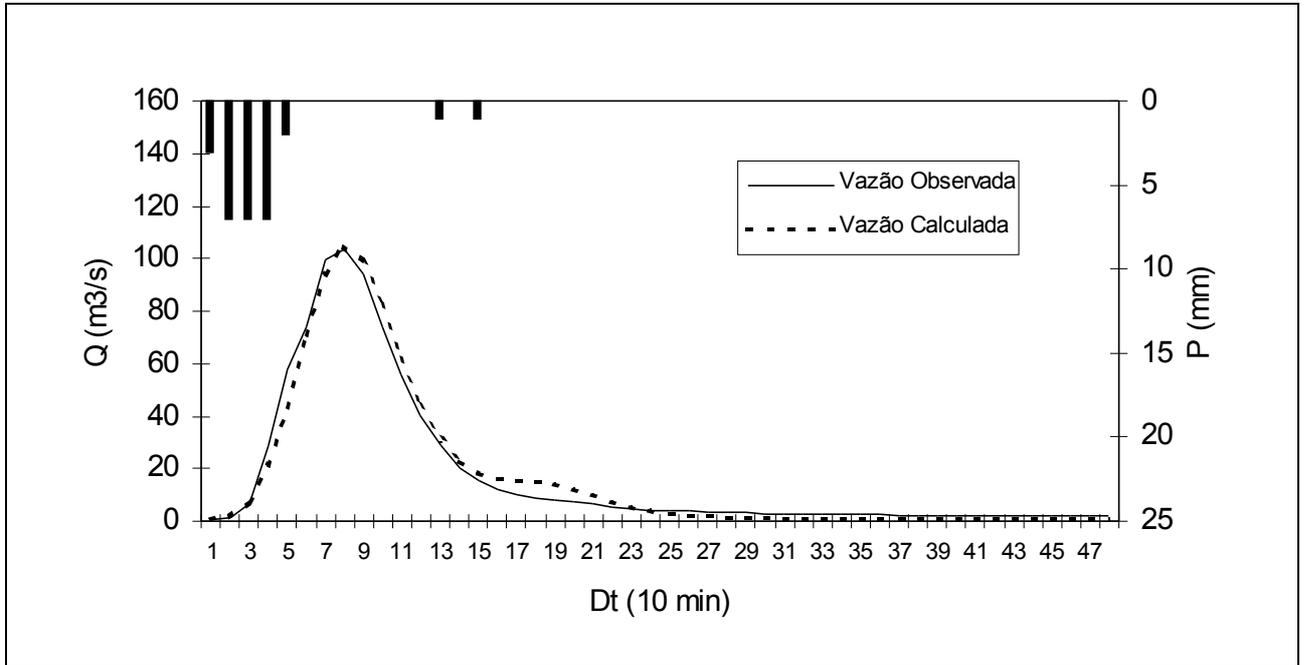


Figura 3. Evento em 08/11/87 na bacia Prado Velho em Curitiba.

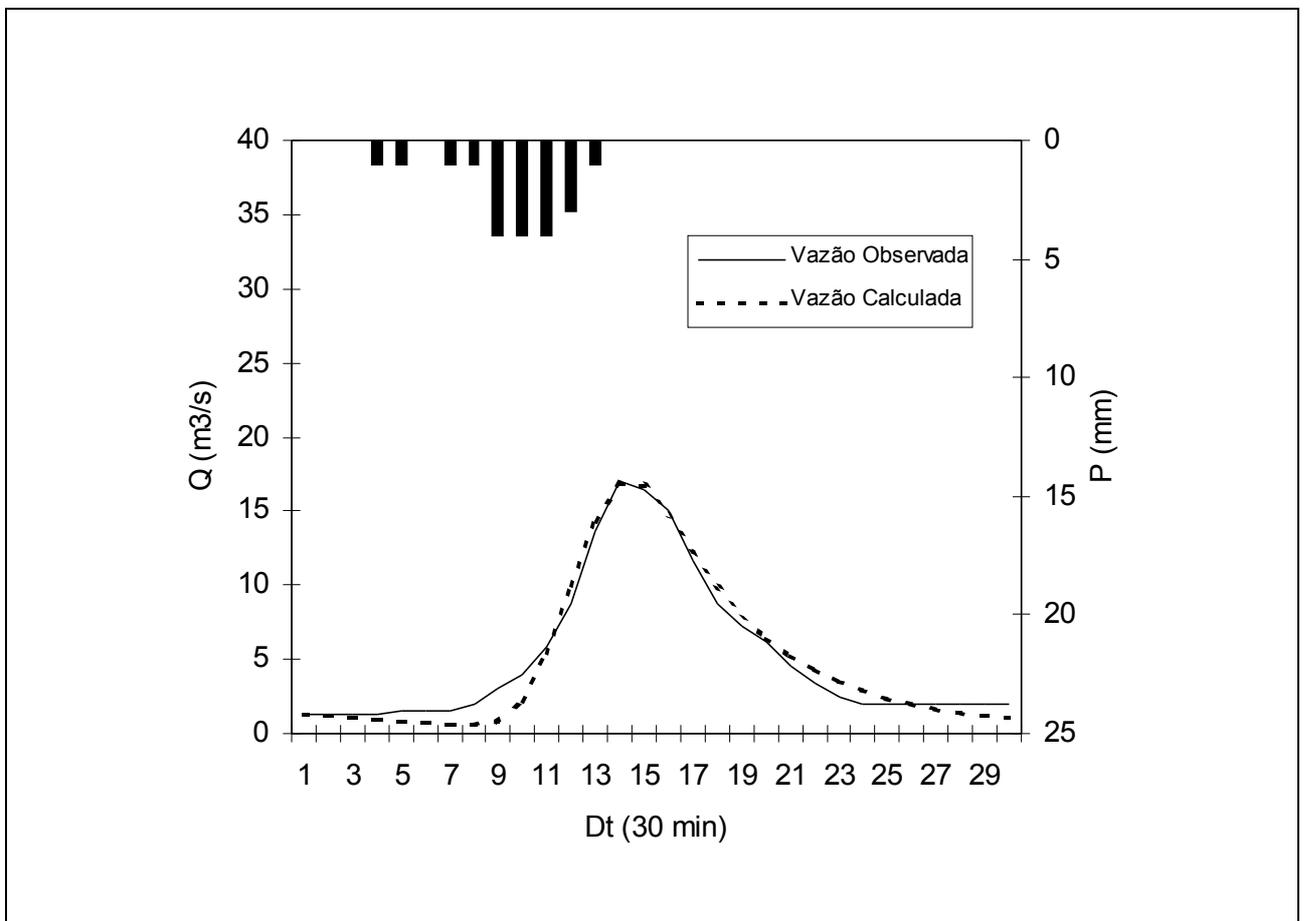


Figura 4. Evento em 13/01/81 na bacia Pirajussara em São Paulo.

simulação de séries contínuas deve ter um peso maior. Os parâmetros de escoamento superficial, como era de se esperar, apresentaram variação importante de bacia para bacia. Na Tabela 2 é apresentado um resumo dos parâmetros e sua variação para cada bacia estudada.

Para buscar estabelecer uma relação entre os parâmetros dos algoritmos de escoamento t_c e k_s e as características das bacias, foram testadas várias regressões com os valores ajustados.

As melhores regressões obtidas são as seguintes:

$$T_c = 18,628 \frac{L^{0,882}}{IMP^{0,272}} \quad R^2 = 0,815 \quad (23)$$

$$K_s = 24,058 \frac{L^{1,063}}{S^{0,126} IMP^{0,549}} \quad R^2 = 0,806 \quad (24)$$

A visualização gráfica do ajuste das regressões é apresentada nas Figuras 5 e 6. Era de se esperar que o tempo de concentração obtivesse boa correlação com a declividade, como expresso nas equações de escoamento uniforme utilizadas para determinar o tempo de concentração. Os resultados obtidos nas regressões, não apresentaram melhor correlação com a declividade porque provavelmente, neste caso, o comprimento L e a área impermeável IMP já explicam parte desta variável.

Tabela 2. Resultados dos parâmetros ajustados.

| Bacia | R_{max} mm | l_o mm/ Δt | l_b mm/ Δt | h mm/ Δt | t_c Δt | k_s Δt | k_{sub} Δt | Δt (min) | Condições |
|----------------|-----------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------|---------------------|---------------------|-------------------------|---------------------|-----------|
| C. Portugal | 0-5,2 | 10 | 0,4 | 0,78 | 3 | 8 | 20 | 30 | R |
| Saint Hilaire | 5-13 | 12 | 0,4 | 0,9 | 5 | 20 | 5 | 30 | R, P |
| Bela Vista | 2-6,5 | 10 | 0,4 | 0,7 | 1 | 0,5 | 10 | 30 | U, AD |
| Arroio Meio | 0-11 | 10 | 0,4 | 0,6 | 1 | 0,5 | 10 | 30 | SU, AD |
| B. Carvalho | 2-25 | 11 | 0,6 | 0,7 | 2,5 | 2,4 | 20 | 30 | SU, AM |
| Cascatinha I | 2-12 | 14 | 0,4 | 0,8 | 1,4 | 1 | 20 | 30 | U, IAM |
| Cascatinha II | 6-25 | 14 | 0,4 | 0,9 | 3 | 1,5 | 20 | 30 | U, IAM |
| Mathias | 0-5 | 9 | 0,6 | 0,63 | 4 | 2,4 | 10 | 10 | SU, DV |
| Jaguarão | 0-5 | 9 | 0,4 | 0,74 | 6 | 10 | 20 | 10 | SU, EL |
| Prado Velho | 0,7-15 | 7 | 0,4 | 0,6 | 7 | 2,5 | 90 | 10 | U, ER |
| A. Camargo | 3-14,6 | 12,5 | 0,48 | 0,84 | 2 | 6 | 120 | 60 | U, IAM |
| Gregório | 5-20 | 14 | 0,4 | 0,8 | 3 | 1,5 | 20 | 10 | U, IAM |
| Carapicuíba | 0 | 6 | 0,2 | 0,6 | 8 | 12 | 10 | 30 | U,ER |
| C. de Cima | 0,6-1,2 | 12 | 0,2 | 0,8 | 2 | 1,8 | 10 | 30 | SU |
| Tiquatira | 3-14 | 12 | 0,1 | 0,5 | 6 | 2,2 | 10 | 30 | U, IBM |
| Jaguaré | 1-6 | 11 | 0,6 | 0,8 | 2 | 8 | 30 | 15 | U, ER |
| Ipiranga | 1,6-9,5 | 10 | 0,4 | 0,77 | 3 | 1,4 | 20 | 30 | AU |
| Á. Espriaiadas | 3-15 | 12 | 0,2 | 0,8 | 6 | 2 | 10 | 15 | U |
| Vermelho | 0-2,8 | 10 | 0,2 | 0,5 | 8 | 1,6 | 280 | 15 | U |
| Pirajussara | 4-9 | 8 | 0,4 | 0,7 | 5 | 5 | 10 | 30 | UF |
| Meninos | 0,5-11,5 | 10 | 0,4 | 0,7 | 3 | 4,2 | 10 | 30 | U |
| Tamanduatei | 0,2-11 | 10 | 0,4 | 0,8 | 4 | 1,8 | 30 | 30 | U |
| Mandaqui | 0-8 | 15 | 0,4 | 0,9 | 2 | 2,8 | 20 | 15 | U, IBM |
| Jacaré | 0-7,8 | 12 | 0,4 | 0,77 | 4 | 5 | 10 | 10 | SU,AD |
| Faria | 0-8 | 4 | 0,4 | 0,6 | 5 | 12 | 10 | 10 | U, AD |
| Timbó | 0-32 | 8 | 0,3 | 0,94 | 4 | 8 | 10 | 10 | U,AD |
| Sarapuí | 0,5-9 | 10 | 0,4 | 0,7 | 3 | 3,4 | 20 | 60 | SU |
| Saracuruna | 1,5-22 | 10 | 0,5 | 0,9 | 6 | 10 | 5 | 60 | SU, IAM |

R – Rural; U – Urbana; SU – Semi-Urbana; AD – Alta Declividade; IAM Infiltração Acima da Média; IBM – Infiltração Abaixo da Média; UF – Urbanização Concentrada na Foz; ER – Escoamento Rápido; EL – Escoamento Lento; P – Parque.

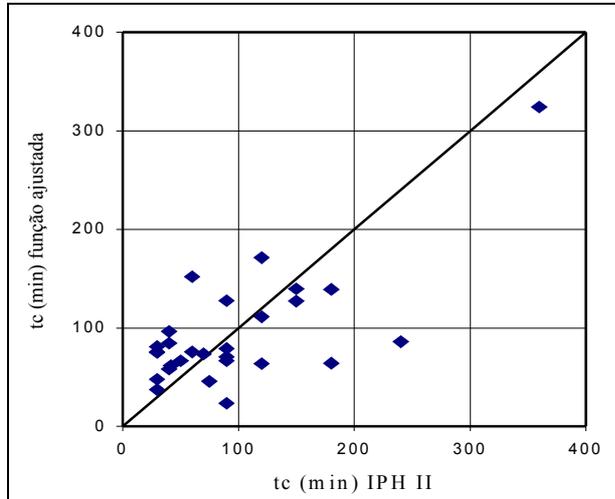


Figura 5. Relação entre t_c ajustado IPH II x $t_c = f(L, IMP)$.

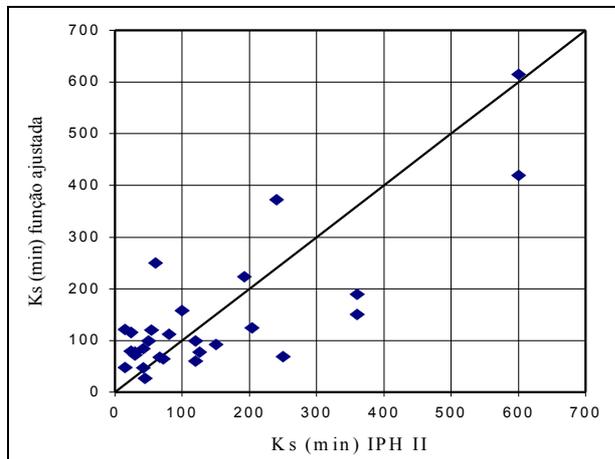


Figura 6. Relação entre k_s ajustado IPH II x $k_s = f(L, S, IMP)$.

ANÁLISE DAS ESTIMATIVAS

Para análise dos resultados foram examinadas duas variáveis: (i) vazão de pico e (ii) o volume do hidrograma; de acordo com o seguinte:

1. ajuste individual (ajuste evento a evento);
2. ajuste com parâmetros médios de infiltração (mantidos os demais);
3. ajuste com parâmetros médios de infiltração e de t_c e k_s ;
4. ajuste com parâmetros médios de infiltração e t_c e k_s estimados pelas características fisiográficas.

Ajuste individual dos picos - Os resultados foram muito bons como normalmente acontece em ajustes individuais, com um erro padrão de $1,4 \text{ m}^3/\text{s}$ na vazão de pico. Os resultados dos ajustes podem ser analisados na Figura 7.

Ajuste dos picos com parâmetros médios de infiltração

Como os parâmetros mais sensíveis do modelo são l_0 e h , analisamos o comportamento da vazão de pico, utilizando os seus valores médios indicados para cada bacia. Para l_0 também foi adotado o valor médio. Nesta análise os valores de k_s e t_c são os individuais de cada evento. A vazão de pico tem um erro padrão de $9 \text{ m}^3/\text{s}$ utilizando os valores indicados para cada bacia (Figura 8).

Estes resultados indicam que a adoção de valores médios por bacia para os parâmetros de infiltração, é aceitável para um cálculo relativamente preciso dos picos. O maior evento da bacia do Belém, em Prado Velho (Curitiba), é responsável pelo maior desvio em relação ao calculado. Sem este evento o erro padrão cai para $7 \text{ m}^3/\text{s}$. Como o modelo é ajustado, na maioria dos eventos, para vazões dentro do canal, a extrapolação para cheias maiores tende a superestimar, pois não considera o extravasamento da seção.

Ajuste dos picos com parâmetros médios de infiltração e de t_c e k_s : Utilizando l_0 , l_b , h , t_c e k_s médios obtém-se um erro padrão de $16 \text{ m}^3/\text{s}$ (Figura 9). A magnitude do erro se mostra ainda razoável, mas nota-se que eventos extremos de bacias de maior área (Meninos em São Paulo, Sarapuí no Rio de Janeiro e Belém em Curitiba) tem seus picos superestimados devido, provavelmente, ao extravasamento de calha que o modelo não considera. Sem estes eventos extremos o erro padrão reduz-se para $11 \text{ m}^3/\text{s}$.

Ajuste dos picos com parâmetros médios de infiltração e k_s e t_c estimados pelas características fisiográficas

- Utilizando os valores médios de infiltração e os valores estimados pelas Funções (22) e (23) para t_c e k_s respectivamente o usuário tem um erro padrão de $24 \text{ m}^3/\text{s}$ (Figura 10). Pode-se notar que, em relação aos valores médios (ajuste anterior), ocorreu uma melhora para os eventos extremos na bacia Prado Velho em Curitiba e para o evento extremo na bacia Sarapuí no Rio de Janeiro. Para estes eventos a vazão de pico ficou mais próxima da observada. Para os eventos extremos na bacia Ribeirão dos Meninos em São Paulo, os picos con-

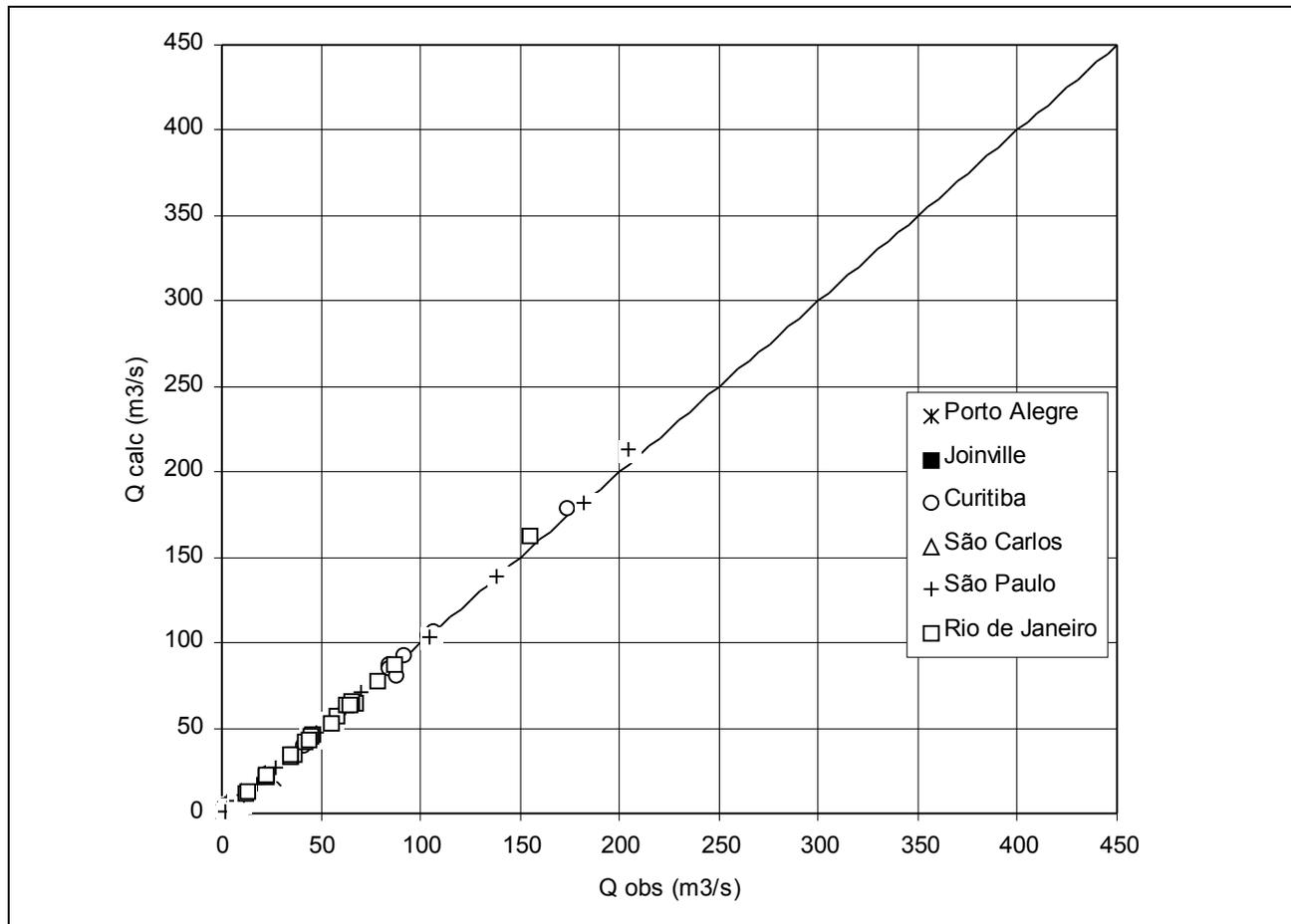


Figura 7. Resultados dos ajustes.

tinuaram sofrendo uma superestimativa ainda maior. Estes resultados podem ser explicados, principalmente, pela diferença entre os valores de k_s : (i) ajustados evento a evento, (ii) médio, e (iii) estimado pelas características da bacia; estes valores forçam uma propagação maior que a real. Sem estes eventos extremos da bacia Ribeirão dos Meninos em São Paulo a magnitude do erro cai para $14 \text{ m}^3/\text{s}$.

A diferença do erro entre os valores médios de t_c e k_s para os obtidos nas funções ajustadas com as características físiográficas, não é muito significativa, e é aceitável para um cálculo relativamente preciso dos picos dos hidrogramas. Na Tabela 3 é apresentada uma avaliação do erro médio na estimativa do pico, por bacia, utilizando os valores com l_0 , l_b e h médios e t_c e k_s das funções.

Ajuste individual dos volumes - Assim como no ajuste dos picos, o ajuste de volumes

individuais apresentou bom ajuste, com um erro padrão de 2 mm no volume total do hidrograma. Os resultados dos ajustes podem ser analisados na Figura 11.

Ajuste dos volumes com parâmetros médios de infiltração -

Utilizando os valores médios de infiltração indicados para cada bacia, os resultados aumentam o erro, visto que os parâmetros de infiltração produzem influência direta no volume de escoamento superficial. O volume total sofre um erro padrão de 10 mm (Figura 12).

Ajuste dos volumes com parâmetros médios de infiltração e de t_c e k_s -

Utilizando l_0 , l_b , h , t_c e k_s médios, os resultados apresentam maior dispersão, porém o erro padrão do volume total não sofre degradação, pois os parâmetros t_c e k_s não afetam o volume do

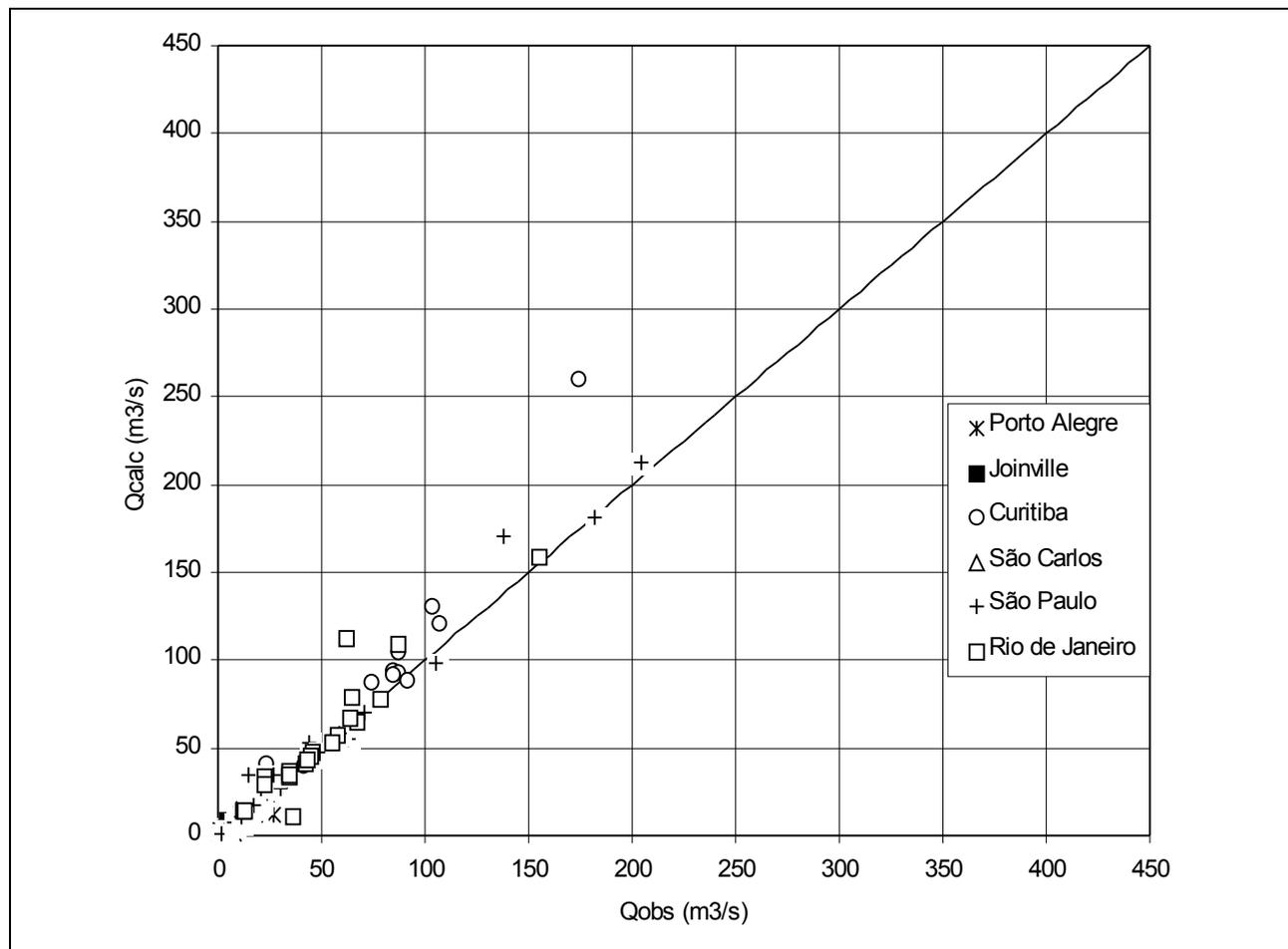


Figura 8. Resultados com l_0 , l_b e h médios.

hidrograma. Neste caso o erro padrão foi de 9 mm (Figura 13).

Ajustes dos volumes com parâmetros médios de infiltração e t_c e k_s estimados pelas características fisiográficas - O mesmo acontece utilizando os valores médios de infiltração e os valores estimados pelas Funções (29) e (30) para t_c e k_s respectivamente. Neste ajuste obtivemos um erro padrão de 10 mm (Figura 14).

Os resultados dessa análise indicam que o volume do hidrograma é influenciado diretamente pelos parâmetros de infiltração l_0 , l_b e h . Utilizando os valores médios destes, o volume sofre praticamente o mesmo erro, quando o ajuste é realizado com t_c e k_s obtidos pelas funções ajustadas com as características fisiográficas (situação 4), pois os parâmetros de transferência (t_c e k_s) não influenciam no volume do hidrograma. Deve-se salientar que os erros indicados nas Tabelas 3 e 4 são valo-

res absolutos, e quando o pico do hidrograma sofre um erro de 20%, o volume será influenciado por esse erro, tanto subestimando como superestimando.

Na Tabela 4 é apresentada a avaliação do erro médio na estimativa do volume, por bacia, utilizando os valores com l_0 , l_b e h médios e t_c e k_s das funções.

ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS PARA OUTRAS BACIAS

Para bacias com dados, é recomendável o ajuste do modelo aos eventos (3 a 5), evitando-se eventos muito pequenos que podem distorcer os parâmetros finais. Os melhores parâmetros são aqueles que representam os eventos com riscos semelhantes aos do prognóstico.

Para as bacias sem dados os valores de k_s e t_c podem ser obtidos com base nas Equações (23) e (24). As perdas iniciais geralmente são esti-

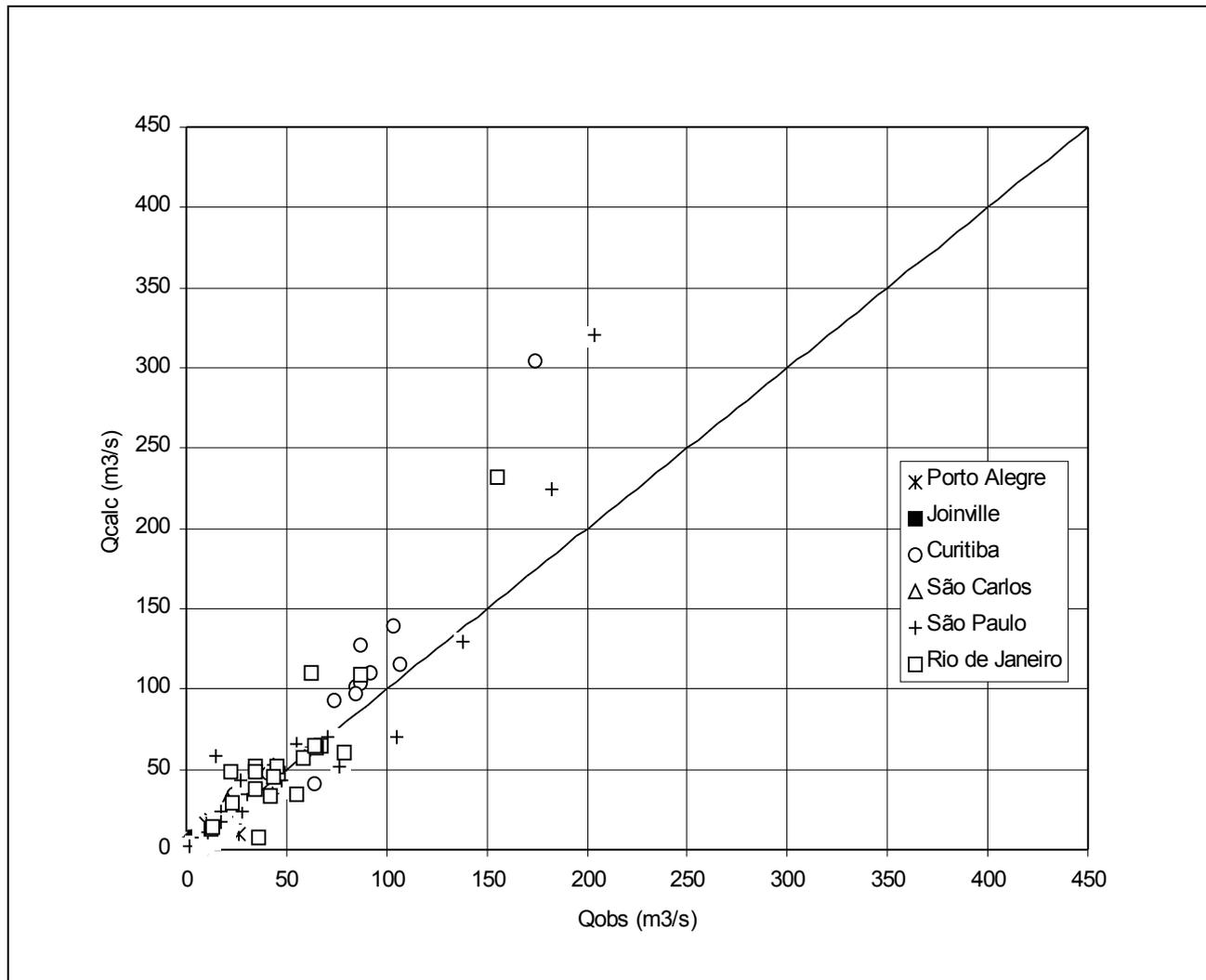


Figura 9. Resultados com I_0 , I_b , h , t_c e k_s médios.

madras de acordo com as condições de projeto. A condição mais desfavorável é $R_{max} = 0$. O parâmetro k_{sub} pode ser fixado em 30 intervalos de tempo, devido a sua pequena influência no período de enchente. O parâmetro I_b , na maioria das bacias, ficou em $0,4 \text{ mm}/\Delta t$. O parâmetro h variou no intervalo de $0,5$ a $0,95$, mas com predominância entre $0,7$ e $0,85$. O parâmetro I_0 variou no intervalo de 4 a $15 \text{ mm}/\Delta t$, mas com predominância entre os valores de 8 a $12 \text{ mm}/\Delta t$.

Estes valores podem ser obtidos de acordo com a predominância do solo da bacia, segundo relações apresentadas em Tucci (1998) ou comparando com os valores das bacias deste estudo. Estes dois últimos parâmetros são muito sensíveis para bacias com pequena área impermeável, mas seu efeito é menor com bacias muito urbanizadas.

CONCLUSÕES

A estimativa dos parâmetros de modelos hidrológicos é uma tarefa que depende de vários fatores como: (i) qualidade e representatividade dos dados observados; (ii) as condições do modelo em representar os processos; (iii) a capacidade dos parâmetros em retratar a variabilidade física da bacia.

Os modelos hidrológicos são utilizados, entre outras aplicações, para estimar vazões máximas e hidrogramas de projeto em locais com dados limitados (poucos dados ou inexistentes). Este estudo teve como objetivo avaliar a variabilidade dos parâmetros do modelo hidrológico IPH II, freqüentemente utilizado em bacias urbanas brasileiras. Os objetivos desta pesquisa

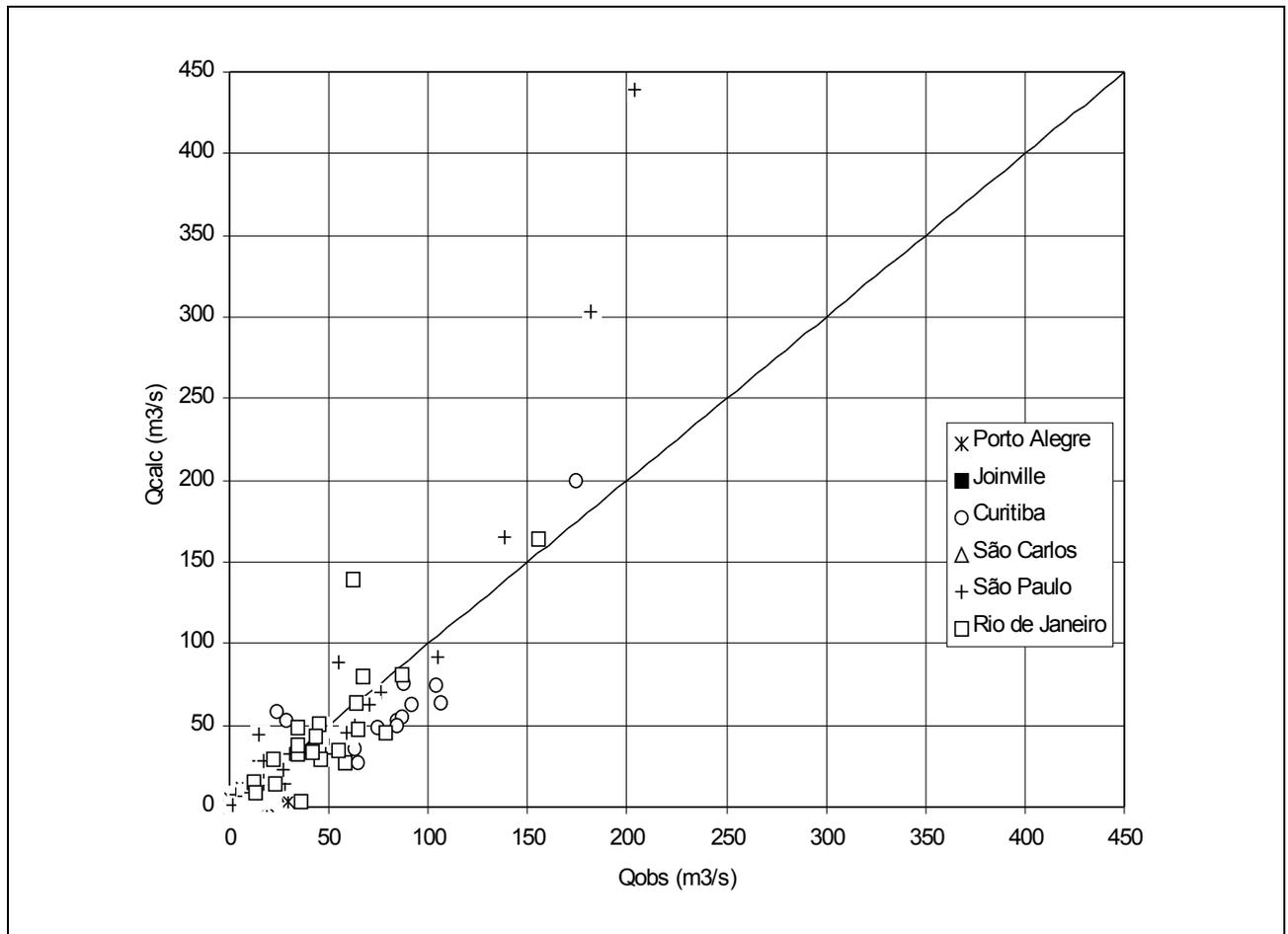


Figura 10. Resultados com l_0 , l_b , h (médios), $t_c = f(L, IMP)$ e $k_s = f(L, S, IMP)$.

Tabela 3. Erro médio na estimativa dos picos.

| Bacia | Erro médio % | Bacia | Erro médio % |
|------------------|--------------|------------------|--------------|
| Casa de Portugal | 20,0 | Tiquatira | 14,0 |
| Saint Hilaire | 77,0 | Jaguaré | 10,0 |
| Bela Vista | 18,0 | Ipiranga | 56,0 |
| Arroio Meio | 11,0 | Águas Espraiadas | 7,0 |
| Beco do Carvalho | 20,0 | Vermelho | 77,0 |
| Cascatinha I | 20,0 | Pirajussara | 29,0 |
| Cascatinha II | 38,0 | Meninos | 26,0 |
| Mathias | 56,0 | Tamanduatei | 17,0 |
| Jaguarão | 34,0 | Mandaqui | 10,0 |
| Prado Velho | 13,0 | Jacaré | 60,0 |
| Afonso Camargo | 73,0 | Faria | 24,0 |
| Gregório | 16,0 | Timbo | 36,0 |
| Carapicuíba | 88,0 | Sarapuí | 25,0 |
| Cabuçu de Cima | 3,0 | Saracuruna | 23,0 |

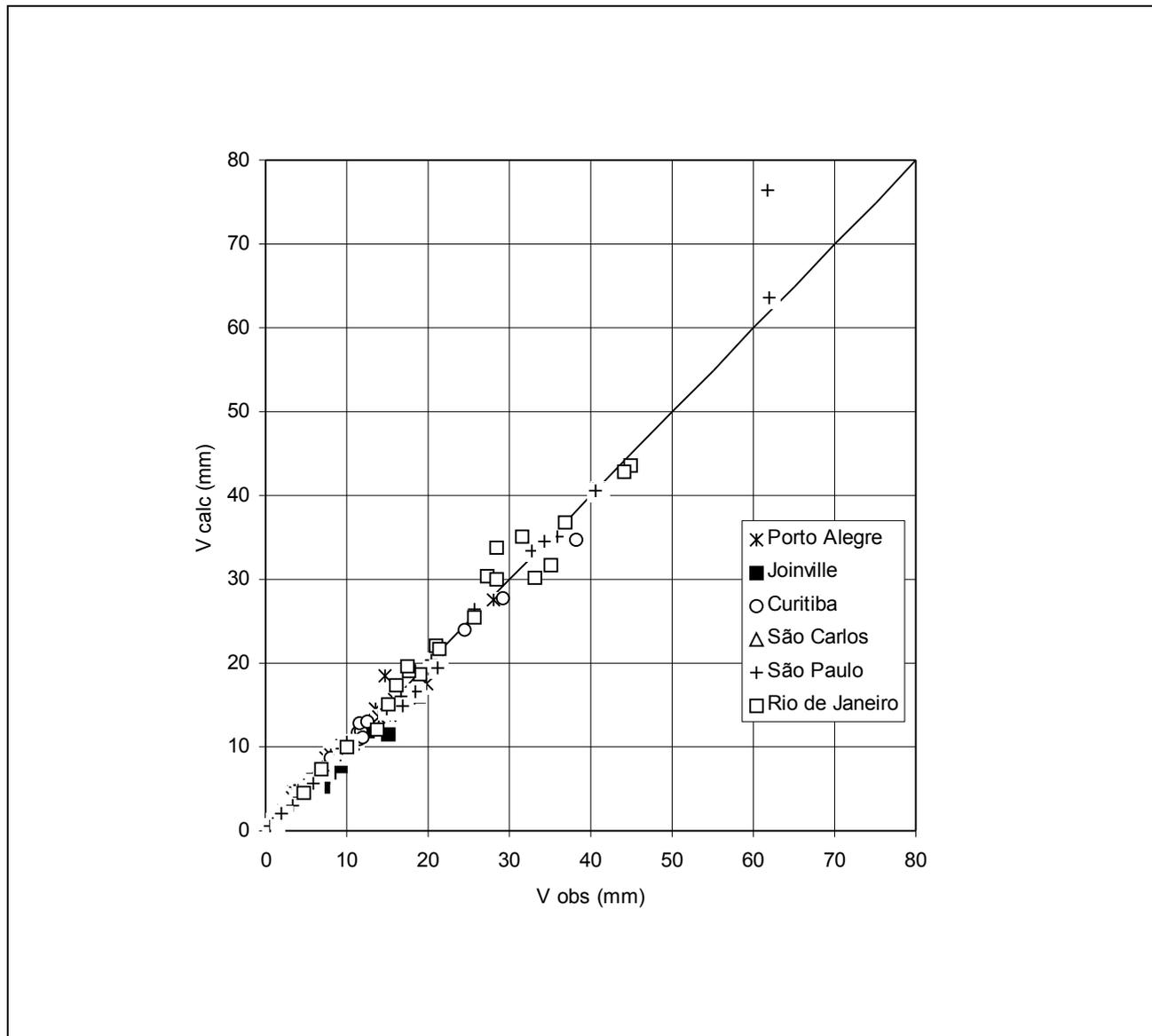


Figura 11. Resultados dos ajustes.

não foram o de criar novas metodologias de estimativas de parâmetros, diferentes das que normalmente se utilizam, mas visaram obter parâmetros dos modelos para bacias com características e dados hidrológicos de bacias urbanas, onde existem poucas informações e grande variabilidade das condições físicas.

Os resultados obtidos buscaram analisar a variabilidade dos parâmetros para permitir aos seus usuários mais informações na utilização dos mesmos em bacias urbanas.

Com base nesse estudo os resultados permitiram verificar o seguinte:

1. para cada sub-bacia analisada, o ajuste do modelo IPH II a diversos eventos permitiu a obtenção de parâmetros médios de infiltração representativos (I_o , I_b e h). O erro médio absoluto no volume das cheias foi menor que 25% em 60% da bacias. A taxa de áreas impermeáveis foi considerada um parâmetro fixo e conhecido em todas as bacias;
2. os parâmetros k_s e t_c do modelo IPH II, que influenciam fortemente os picos das cheias, foram descritos com base em informações fisiográficas e de ocupação do

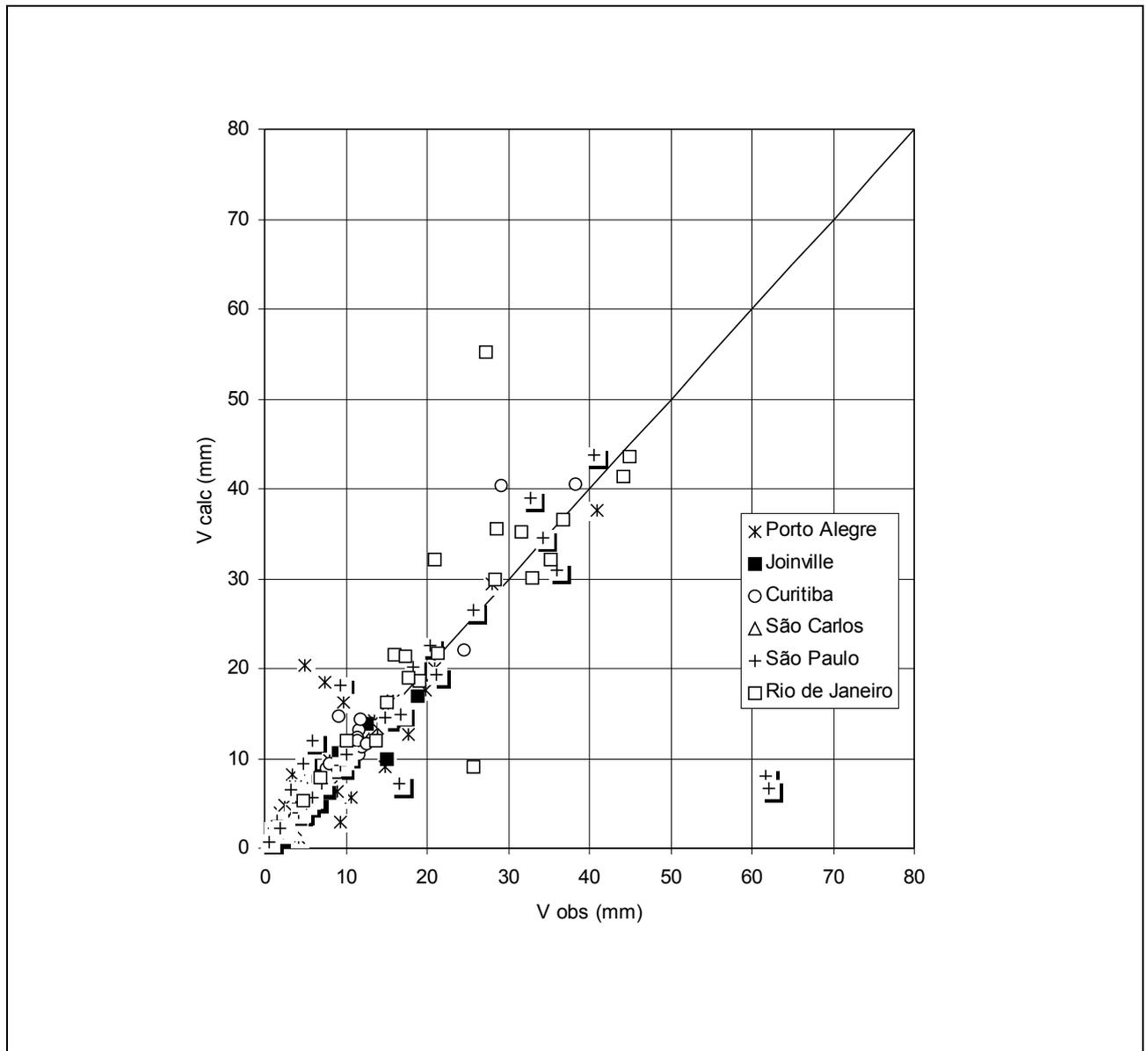


Figura 12. Resultados do ajuste de volumes com I_o , I_b e h médios.

solo, notadamente através do comprimento do curso de água e da área impermeável absoluta. O erro médio absoluto no pico das cheias com as regressões obtidas para estes parâmetros também foi menor que 25% em praticamente 60% das bacias. Nesta avaliação foram considerados os parâmetros médios de infiltração de cada bacia;

3. a variabilidade das respostas das bacias

estudadas, não permitiu estabelecer intervalos de variação precisos para os parâmetros de infiltração do modelo analisado, no cálculo de cheias de bacias urbanas brasileiras. Entretanto os parâmetros aqui determinados, e seus intervalos, são indicadores comparativos que permitem melhor definir a grandeza dos mesmos, numa eventual extrapolação de seus resultados a outras áreas.

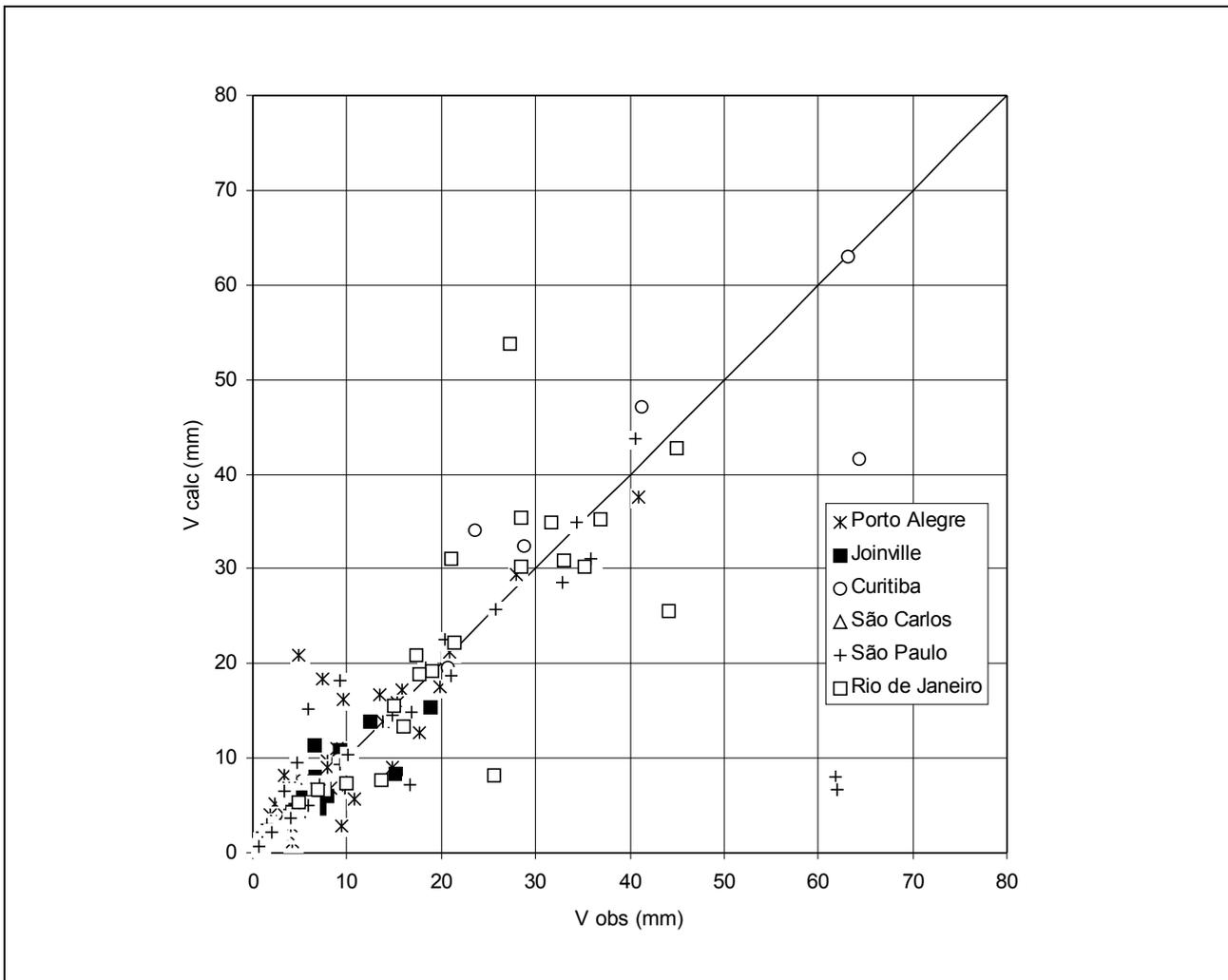


Figura 13. Resultados do ajuste de volumes com I_o , I_b , h , t_c e k_s médios.

AGRADECIMENTOS

Esta pesquisa fez parte da dissertação de mestrado de Andréa Germano que contou com bolsa de estudo do CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Tecnológico. Os estudos apresentados tiveram também o apoio do projeto REHIDRO do FINEP, e PRONEX do MCT.

REFERÊNCIAS

- HEC, (1974). *Training Course on Urban Hydrology* US Army, Hydrologic Engineering Center.
- LECLERC, H, SCHAAKE, J. C. (1973). Methodology for assessing the Potential Impact of Urban Development on Urban Runoff and the Relative Efficiency of Runoff Control Alternatives MIT Ralph Parson Lab. for *Water Resources and Hydrodynamics Report 167*, março.
- SCS (1975). *Urban hydrology for small watersheds*. Washington US Dept. Agr. Technical Release n.55.
- TUCCI, C. E. M. (1979). Análise de Sensibilidade dos Parâmetros do algoritmo de infiltração. *Anais. III Simpósio Brasileiro de Hidrologia*. Brasília.
- TUCCI, C. E. M. (1998). *Modelos Hidrológicos*. Edit. UFRGS ABRH, p652.
- TUCCI, C. E. M., ORDONEZ, J. S., SIMÕES, L. M. (1981). Modelo Matemático Precipitação-Vazão IPH II Alguns Resultados. IV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. ABRH, *Anais*. Fortaleza.
- TUCCI, C. E. M., CAMPANA, N. (1993). Simulação distribuída com IPH II, Nova versão. X Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos Gramado *Anais v3*, p495-504.

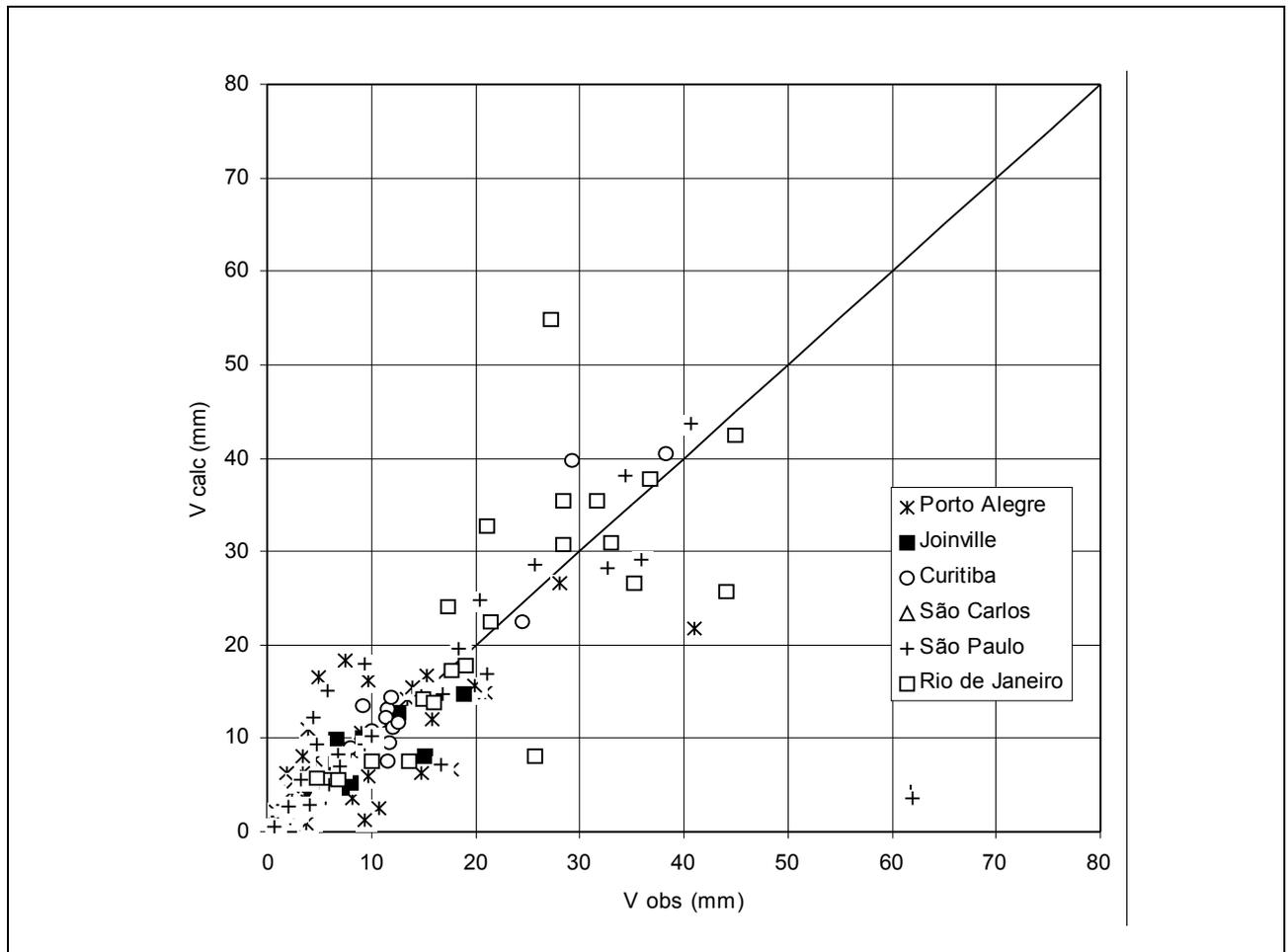


Figura 14. Resultado do ajuste dos volumes com I_0 , I_b , h (médios) e t_c e k_s estimados.

Tabela 4. Erro médio na estimativa dos volumes.

| Bacia | Erro médio % | Bacia | Erro médio % |
|------------------|--------------|-----------------|--------------|
| Casa de Portugal | 6,0 | Tiquatira | 67,0 |
| Saint Hilaire | 58,0 | Jaguará | 9,0 |
| Bela Vista | 38,0 | Ipiranga | 23,0 |
| Arroio Meio | 11,0 | Águas Espaiadas | 15,0 |
| Beco do Carvalho | 12,0 | Vermelho | 58,0 |
| Cascatinha I | 8,0 | Pirajussara | 46,0 |
| Cascatinha II | 6,0 | Meninos | 5,0 |
| Mathias | 21,0 | Tamanduatei | 29,0 |
| Jaguaraão | 42,0 | Mandaqui | 8,0 |
| Prado Velho | 22,0 | Jacaré | 32,0 |
| Afonso Camargo | 13,0 | Faria | 60,0 |
| Gregório | 8,0 | Timbo | 31,0 |
| Carapicuíba | 42,0 | Sarapuí | 12,0 |
| Cabuçu de Cima | 23,0 | Saracuruna | 15,0 |

**Evaluation of the
IPH II Model Parameters
for some Brazilians Urban Basins**

ABSTRACT

Rainfall – runoff models have often been used to evaluate the design hydrograph in urban basins due to the lack of recorded data and changes in basin characteristics.

The hydrologic model IPH II has been used by many water resources professionals to estimate the flood hydrograph in urban basins. However, the main difficulty in applying this model is estimating parameters for different scenarios.

In this study floods events from 28 urban basins in 6 Brazilians cities were used. The model parameters were fitted to these basins using the floods events and basin characteristics.

The analysis of forecasts and parameter variability for these basins helped guide for use of this model in other urban basins.