

## MODELO HIDROLÓGICO DISTRIBUÍDO URBANO COM POUCOS PARÂMETROS

**André Luiz Lopes da Silveira**

Instituto de Pesquisas Hidráulicas, UFRGS  
Caixa Postal 15029 - CEP 91501-970 Porto Alegre-RS  
silveira@if.ufrgs.br

**Michel Desbordes**

Geofluides-Bassins-Eau Equipe Hydrologie  
Université Montpellier II (França)  
desbo@dstu.univ-montp2.fr

### RESUMO

*Este artigo trata de um modelo urbano chuva-vazão que considera a variabilidade espacial da precipitação, da ocupação do solo e dos caminhos de drenagem na geração de eventos de cheia. O modelo gera automaticamente um histograma tempo-área não linear (para a precipitação média) ao aceitar a entrada distribuída da precipitação. O processo de transferência se completa com o modelo do reservatório linear simples para considerar os efeitos do armazenamento temporário na condução do escoamento. A produção hídrica é distribuída pela realização da separação de escoamentos pixel a pixel nas áreas urbanas, considerando as taxas de impermeabilização. Nas áreas suburbanas foi aplicada uma capacidade de infiltração do solo. O modelo foi concebido com apenas três parâmetros: a velocidade de escoamento de pixel a pixel, a constante do modelo reservatório linear simples e a capacidade de infiltração suburbana. Aplicado à bacia semi-urbanizada do arroio Dilúvio em Porto Alegre, o modelo teve bom desempenho na simulação de cheias freqüentes com duração limitada. Os parâmetros revelaram um caráter pseudo-linear em função de características da precipitação. A importância do histograma tempo-área não-linear foi significativa na reprodução das cheias.*

### INTRODUÇÃO

Os modelos hidrológicos distribuídos procuram representar a variabilidade espacial dos processos hidrológicos, além da variabilidade temporal. A sua aplicação só teria sentido entretanto, quando a distribuição espacial dos processos ou grandezas físicas fosse conhecida.

A abordagem generalista é uma tendência dos modelos distribuídos que conduz, geralmente, a um detalhamento espacial de fenômenos ou processos físicos para os quais dificilmente existem dados medidos nas bacias.

Na modelação chuva-vazão de muitas bacias isto é comum, pois as informações normalmente disponíveis não abrangem todos os processos envolvidos, restringindo, muitas vezes, a utilização do enfoque distribuído somente na consideração da influência do tipo de ocupação do solo na produção de escoamento e na consideração do papel da topografia na definição dos caminhos de fluxo superficial.

Dada a escassez de dados distribuídos numa bacia, é questionável a aplicação de um modelo distribuído abrangente. Para a bacia semi-urbana do Arroio Dilúvio em Porto Alegre há esta escassez, mas por outro lado, ela já foi objeto de monitoramentos e estudos que produziram, pelo menos, três tipos de informação com dimensão espacial (Alvarez e Sanchez, 1979):

- i. ocupação do solo;
- ii. topografia;
- iii. precipitação.

Com o objetivo de caracterização do comportamento hidrológico desta bacia na geração de eventos de cheia, foi proposto um modelo chuva-vazão distribuído que aproveitasse esses três tipos de informação espacial disponíveis, mas com um número reduzido de parâmetros. Sendo a calibração dos parâmetros inevitável, seu número reduzido favorece sua interpretação.

Nestas condições, a modelagem distribuída foi o meio escolhido para análise:

- i. da contribuição relativa das superfícies permeáveis suburbanas comparada com a contribuição das áreas urbanas;

- ii. da qualidade de reprodução dos hidrogramas de cheia por mecanismos simples de translação e armazenamento na bacia;
- iii. da importância da distribuição espacial da precipitação na simulação dos hidrogramas.

Essas análises não foram plenamente realizadas pelos modelos e estudos anteriores da bacia do Dilúvio porque estes não tiveram abordagem verdadeiramente distribuída, conforme se pode observar nas publicações de Caicedo (1975), Alvarez e Sanchez (1980), Mota (1982), Mota e Tucci (1984), Simões Lopes e Sanchez (1986) e Campana (1995).

A elaboração do primeiro modelo distribuído para esta bacia justifica-se, portanto, pela busca de novas informações que somente poderiam ser extraídas pela consideração da variabilidade espacial de dados com esta dimensão medida.

## **BACIA DO DILÚVIO E DADOS DISPONÍVEIS**

A bacia do Arroio Dilúvio, com cerca de 80 km<sup>2</sup> de área, situa-se, quase na sua totalidade, no município de Porto Alegre/RS, aproximadamente entre as longitudes 51°04' e 51°15' oeste e latitudes 30°01' e 30°08' sul. A Figura 1 mostra a bacia com destaque para a sub-bacia intermediária, com 25,5 km<sup>2</sup>, que é objeto dos estudos apresentados neste artigo.

Estão localizados na Figura 1 os 14 postos pluviográficos (P1 a P14) e os 11 postos linigráficos (H1 a H11) que funcionaram durante a vigência do chamado Projeto Dilúvio, entre 1977 e 1986 (Alvarez e Sanchez, 1979 e Simões Lopes e Sanchez, 1986). Observe-se que a sub-bacia intermediária em destaque é limitada pelos postos H4 (Posto Agronomia) e H2 (Posto Ipiranga/CPRM), por isso ela será doravante denominada de bacia Agronomia-CPRM. Detalhes sobre o conjunto total da rede pluvio-linigráfica e dados disponíveis são encontrados em Silveira (1996).

A urbanização da bacia do Dilúvio começou em meados do século passado, mas foi entre 1950 e 1980, que a urbanização acelerou-se significativamente, atingindo a marca estimada de 430 mil habitantes na bacia, com base em dados do IBGE. A Figura 2 apresenta a mancha urbana na bacia Agronomia-CPRM, abrangendo 62% de sua área. A área impermeável corresponde a 20%, ou cerca de um terço da mancha urbana. Os solos da bacia apresentam boa drenagem, mas o reconhe-

cimento pedológico é precário, havendo melhor descrição da geologia (Schneider et al., 1974).

Para as simulações da bacia Agronomia-CPRM com o modelo distribuído estavam disponíveis 111 eventos de cheia ao passo de tempo de 30 minutos. Os dados utilizados foram os dados de vazão dos postos H4 (Posto Agronomia) e H2 (Posto Ipiranga/CPRM) e os dados de precipitação dos postos P1 a P14 que estavam em funcionamento em cada evento.

De modo geral, os eventos selecionados são freqüentes, do ponto de vista estatístico, com períodos de retorno de até 2 anos e vazões de pico abaixo de 60 m<sup>3</sup>/s. O tempo de pico varia de 3 a 6 horas, aproximadamente, os menores característicos do verão.

## **MODELO DISTRIBUÍDO**

O modelo distribuído aplicado à bacia Agronomia-CPRM representa a bacia hidrográfica através de uma malha com células quadradas, reproduzindo seu contorno e possibilitando o detalhamento espacial segundo vários planos horizontais de informação.

### **Planos de informação**

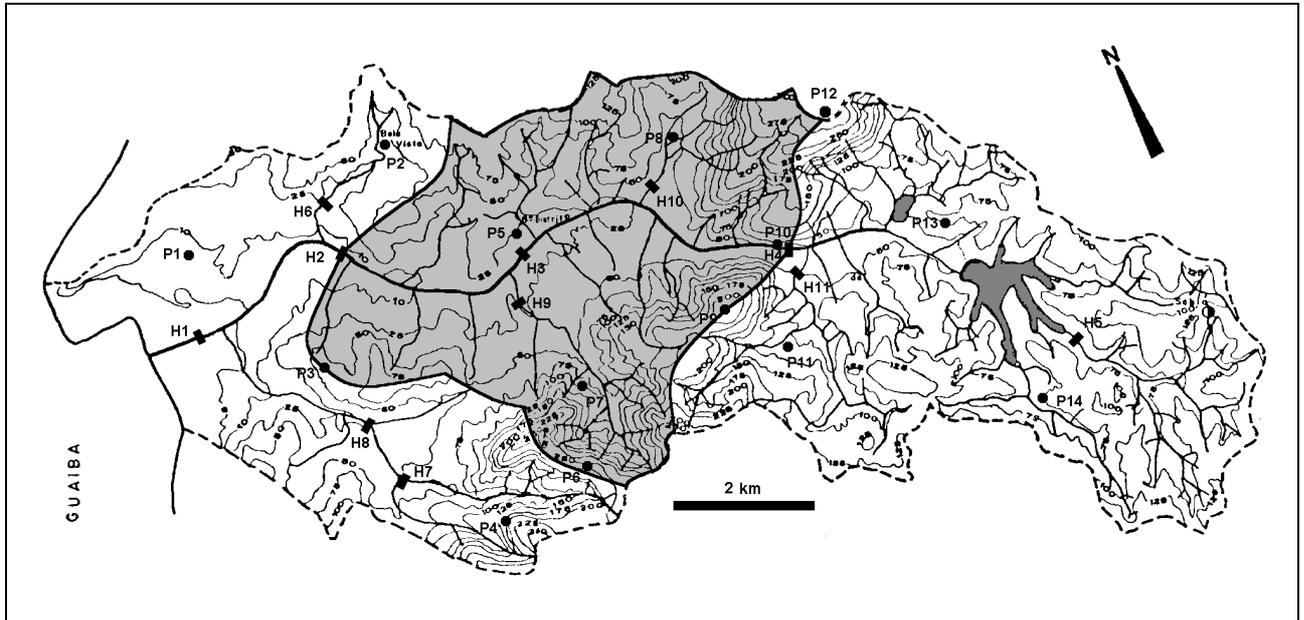
Os planos de informação introduzem as espacializações das grandezas relacionadas com os escoamentos.

Para cada informação distribuída no espaço existe um plano que atribui a cada célula o valor correspondente.

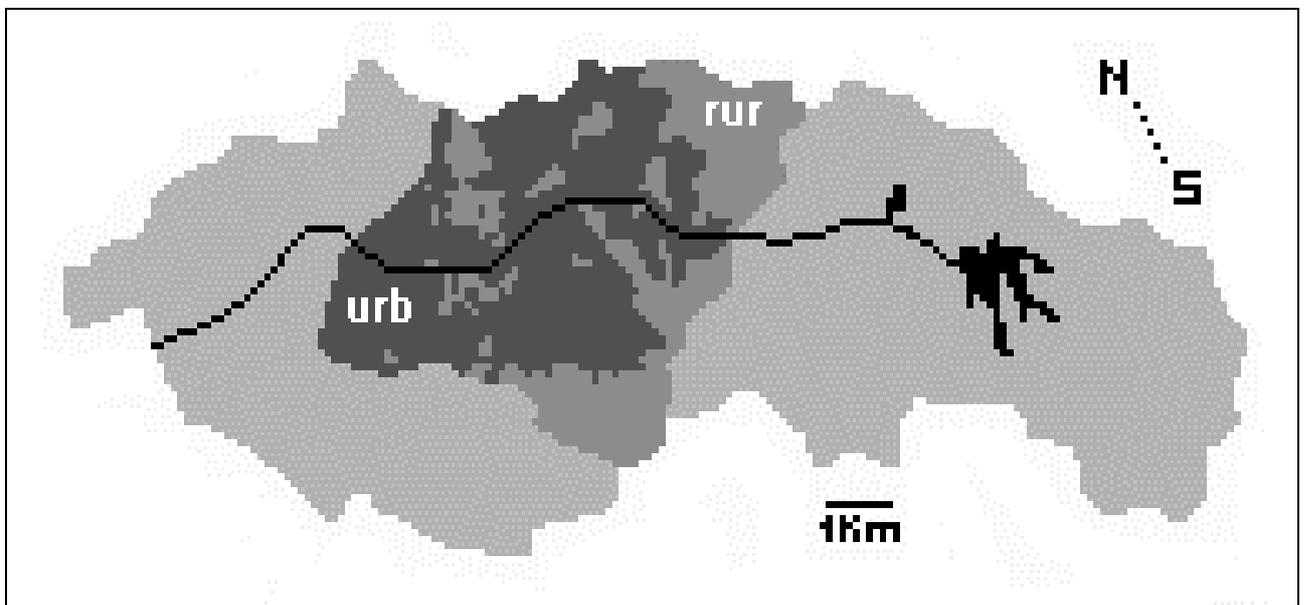
De acordo com os dados disponíveis para o presente estudo e considerando-se os objetivos, julgou-se suficiente uma malha com células de 100 m de lado (o aspecto serrilhado do contorno da Figura 2 mostra o efeito da malha). Os planos de informação estabelecidos foram:

- plano de drenagem;
- plano da topografia;
- plano de ocupação do solo;
- plano das taxas de impermeabilização;
- planos das isoietas no tempo.

O plano de drenagem estabelece os caminhos médios de escoamento dentro da bacia na precisão da célula. Cada célula aceita oito direções possíveis para os fluxos de entrada ou saída. Ela pode receber várias entradas com direções diversas mas tem apenas uma saída. Para a bacia do Dilúvio o plano de drenagem não foi estabelecido



**Figura 1. Bacia do Arroio Dilúvio e a sub-bacia intermediária Agronomia-CPRM.**



**Figura 2. Urbanização da sub-bacia Agronomia-CPRM.**

automaticamente a partir do plano da topografia, necessitando de intervenções manuais para definir melhor os sentidos médios da drenagem nas células em função da rede pluvial.

O plano de ocupação do solo foi elaborado com a incorporação de informações sobre a ocupação urbana de 1982 obtidas em uma carta 1: 5.000 da Prefeitura de Porto Alegre. Foram consideradas apenas duas classes, por uma questão de parcimônia (Figura 2):

- i. áreas urbanas;
- ii. áreas suburbanas (rurais).

Para atribuir a cada célula urbana uma taxa de impermeabilização, foi realizada uma ponderação simples para distribuir a informação recolhida de fotos aéreas, apresentada por Alvarez e Sanchez (1979). Esta informação foi organizada no plano das taxas de impermeabili-

zação, onde foi atribuído o valor nulo para as células rurais.

Os planos das isoietas dos eventos, por sua vez, foram calculados pelo método do inverso da distância a partir dos dados pontuais dos pluviógrafos.

### Histograma tempo-área não linear

A representação da bacia com uma malha de células quadradas admite implicitamente que a translação faz parte do algoritmo de propagação do modelo. Basta atribuir uma velocidade de translação entre uma célula e outra, segundo as direções definidas no plano de drenagem. No modelo proposto a translação abrange apenas o escoamento superficial e, para efeito de parcimônia dos parâmetros, uma velocidade única foi considerada, a velocidade  $v_0$ . Isto caracteriza evidentemente uma grande simplificação, mas é preciso observar que, se as maiores declividades favorecem maiores velocidades, as zonas de baixas declividades das bacias escoam com maior carga hidráulica, promovendo uma espécie de homogeneização das velocidades. Isto é, sendo a velocidade de escoamento proporcional à lâmina d'água na potência  $n$  (na equação de Manning  $n = 2/3$  para escoamentos a grande largura), o aumento desta lâmina de montante para jusante pode compensar a perda de velocidade que haveria pelo declínio da declividade.

Apesar da simplificação de uma velocidade única na malha, a translação resultante pode ser interpretada como a resposta de um histograma tempo-área não linear aplicado à chuva efetiva. Isto é devido à possibilidade da chuva efetiva variar no espaço e ao fato de que o tempo de translação ao exutório varia de célula a célula. A translação de cada célula ao exutório é linear (pois  $v_0$  é constante) mas a contribuição conjunta de todas as células, devido aos tempos de viagem ao exutório serem diferentes, célula a célula, apesar de fixos, propicia uma translação global não linear para a precipitação efetiva média na bacia. Em outras palavras, o hidrograma de translação varia segundo a distribuição espacial da chuva, mesmo para precipitações efetivas cujo valor médio é o mesmo.

O tempo de translação do escoamento de cada célula de coordenadas  $(x,y)$  até o exutório, para uma velocidade  $v_0$  constante, é:

$$t(x, y) = \frac{\sum \ell}{v_0} \quad (1)$$

sendo que o somatório abrange toda a sucessão de lados e diagonais das quadrículas percorridas ao longo da trajetória até o exutório.

### Armazenamento superficial

A propagação do escoamento superficial dificilmente pode ser representada somente pela translação, pois há na bacia armazenamentos temporários durante os eventos, principalmente nos condutos, canais e arroios da rede de drenagem. Portanto, houve necessidade de incorporar no modelo um segundo processo de propagação baseado no armazenamento. A escolha recaiu sobre o método do Reservatório Linear Simples (RLS), pela sua simplicidade e eficiência largamente comprovada em diversos modelos hidrológicos (Desbordes, 1984, 1985 e 1987).

O método RLS resulta da consideração de uma relação linear entre o armazenamento e a vazão e pode ser expresso pelo seguinte Hidrograma Unitário Instantâneo (HUI):

$$h(t) = \frac{1}{K} e^{-t/K} \quad (2)$$

onde  $h(t)$  é o operador do HUI,  $t$  é o tempo e  $K$  é o parâmetro do modelo.

### Produção de escoamento superficial

As propagações acima mencionadas dizem respeito somente ao escoamento superficial. Como o modelo distribuído proposto é um modelo de eventos de cheia optou-se por desconsiderar escoamentos lentos ou subterrâneos, seja porque sua magnitude relativa é geralmente reduzida, seja pelo alto grau de desconexão entre o aquífero e a rede de drenagem numa área urbana.

O esquema de produção de escoamento considerado é bastante simples, conforme indicado abaixo:

1. a chuva efetiva em superfícies impermeáveis corresponde a 100% da chuva;
2. as superfícies permeáveis urbanas infiltram toda chuva, não produzindo escoamento superficial para a rede de drenagem;
3. as superfícies permeáveis suburbanas geram volume de escoamento superficial (chuva efetiva) se a intensidade da chuva ultrapassa a capacidade de infiltração do solo.

As duas primeiras hipóteses não são isoladamente verdadeiras numa área urbana, porém admite-se uma compensação entre as perdas por detenção e interceptação nas áreas impermeáveis com o excesso pluvial das áreas permeáveis urbanas que atinge a rede de drenagem.

Desta forma, apenas a contribuição das áreas permeáveis suburbanas depende de uma parametrização, uma vez que o comportamento das áreas urbanas é ditado pelas informações do plano das taxas de impermeabilização. Coerentemente com a simplicidade das formulações de propagação, optou-se por representar a separação de escoamentos nas áreas suburbanas por apenas um parâmetro: uma capacidade de infiltração constante e única. Notada por INF, esta capacidade de infiltração completa o jogo de parâmetros do modelo, juntamente com  $v_0$  e K.

### Ciclo de um passo de tempo

A representação do ciclo de um passo de tempo do modelo distribuído, mostrado na Figura 3, expõe o papel dos três parâmetros:  $v_0$ , K e INF.

A chuva bruta (entrada do modelo) é representada por um histograma tridimensional, espelhando seu caráter variado no recorte da bacia e constituindo o plano das isoietas. As células da malha da bacia são diferenciadas em urbanas e suburbanas, sendo atribuídas às do primeiro tipo os valores das suas taxas particulares de impermeabilização AIMP e, às do segundo tipo, o parâmetro único INF. Essas informações constituem os planos de ocupação do solo e das taxas de impermeabilização.

A separação de escoamentos propiciada pelos AIMP e por INF, gera o histograma tridimensional da chuva efetiva que é, como o da chuva bruta, variado no espaço. A partir daí é efetivado o processo de translação através do plano de drenagem no recorte da bacia, com os tempos de percurso ao exutório de cada célula definidos por  $v_0$ .

Por superposição, ou seja, pela soma das chuvas efetivas transladadas das células que atingem o exutório nos mesmos intervalos de tempo futuros, chega-se ao hidrograma de translação do passo de tempo destas chuvas. Este hidrograma passa em seguida pelo processo do reservatório linear simples de parâmetro K para obtenção do hidrograma final do passo de tempo.

A cada passo de tempo é gerado então um hidrograma independente no exutório. Após o cálculo destes, nos sucessivos passos de tempo,

nova superposição é realizada para a obtenção do hidrograma global do evento.

Apesar do emprego de três parâmetros globais, o modelo proposto permite a simulação dos efeitos da entrada distribuída da precipitação e da ocupação diversa do solo, conforme estabelecido no início.

Mesmo que a chuva bruta fosse homogênea o caráter distribuído do modelo perduraria em função da ocupação do solo que gera uma chuva efetiva variada no espaço. Isto decorre das taxas constantes, mas variadas no espaço, dos índices de impermeabilização AIMP, nas áreas urbanas, e do parâmetro INF, eleito para representar a capacidade de infiltração média das áreas suburbanas. O caráter distribuído do modelo manifesta-se efetivamente, entretanto, pelas linhas de drenagem que transladam a chuva efetiva de cada célula por meio de  $v_0$ .

Assim, apesar dos três parâmetros do modelo serem globais e não distribuídos, apenas o parâmetro K traduz um processo concentrado.

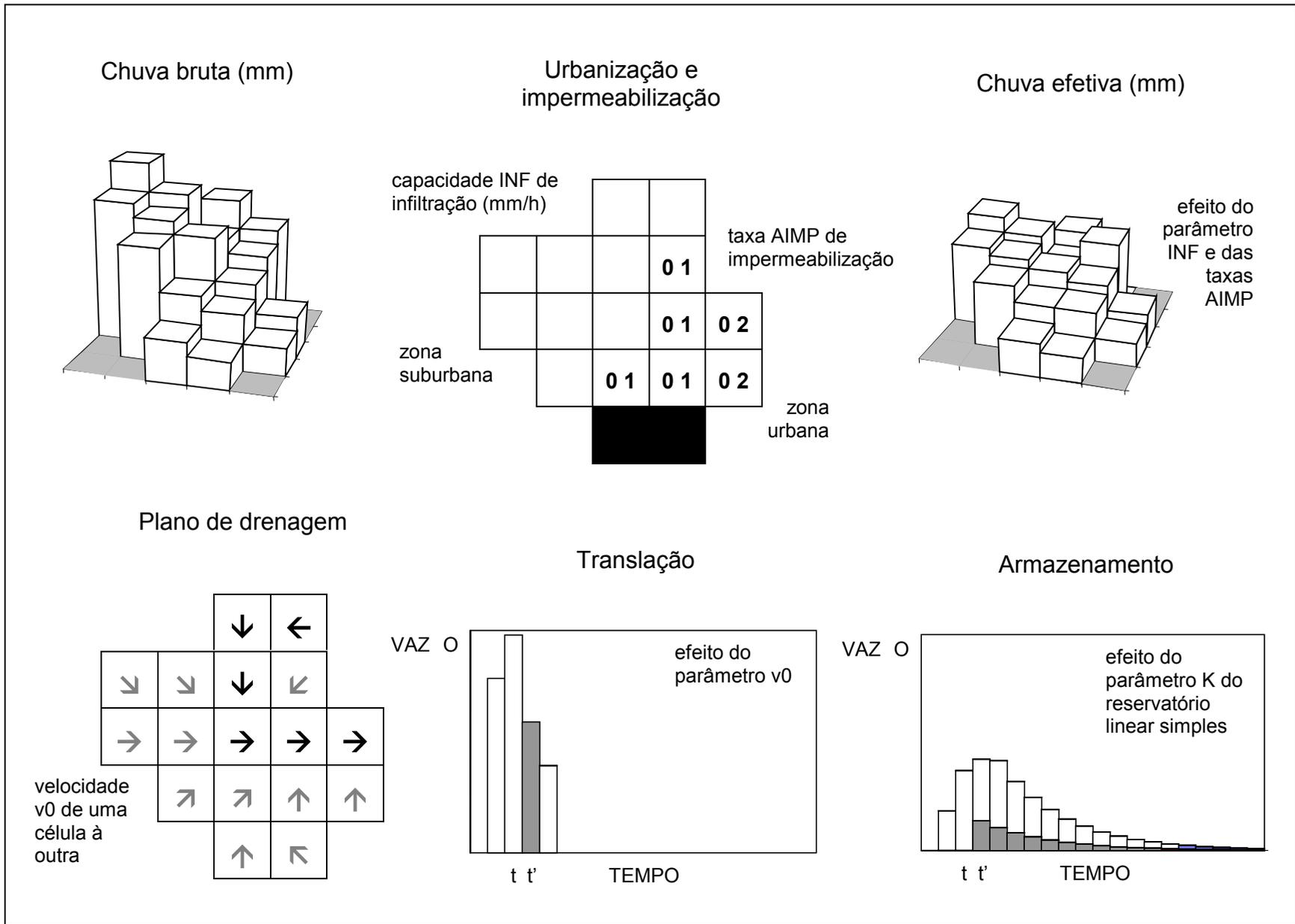
Por outro lado, é verdade que, se a chuva efetiva fosse homogênea sobre toda bacia (o que não é esperado pela ocupação variada do solo), a translação controlada por  $v_0$  se reduziria a um processo de transferência global, podendo até ser definido um histograma tempo-área fixo (naturalmente linear). Isto é, no caso da chuva efetiva ter o mesmo valor em todos os pontos, a translação passa a ser função apenas das isócronas da bacia, o que conduz à definição clássica de histograma tempo-área.

## RESULTADOS

O modelo foi aplicado na reprodução de cheias observadas na sub-bacia Agronomia-Ipiranga do Arroio Dilúvio com intervalos de tempo de 30 min.

Para efetuar as análises propostas, a aplicação do modelo não se preocupou em estabelecer um conjunto de cheias para o ajuste dos parâmetros e outro para verificar este ajuste. Isto porque o objetivo era analisar os parâmetros e verificar a possibilidade de explicar o comportamento hidrológico da bacia por meio das hipóteses feitas. Não é do escopo deste artigo, portanto, propor um modelo calibrado, o que necessitaria efetivamente de um criterioso procedimento de ajuste e verificação dos parâmetros, inclusive com a análise de incerteza.

O critério de ajuste dos parâmetros  $v_0$ , K e INF foi baseado na clássica função objetivo de Nash e Sutcliffe (1970), que procura um erro ab-



**Figura 3. Modelo distribuído urbano ciclo de um passo de tempo.**

soluto mínimo constante entre o hidrograma observado e o calculado, o que vem a significar um erro relativo menor para as maiores vazões:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^o - Q_i^s)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i^o - Q^{om})^2} \quad (3)$$

$Q^o$  e  $Q^s$  são, respectivamente, a vazão observada e a vazão simulada;  $i$  identifica o intervalo de tempo cronológico das  $n$  vazões do hidrograma;  $Q^{om}$  é a média das vazões observadas.

Quanto mais o valor de  $R^2$  se aproximar de 1 melhor é o ajuste, sobretudo ao redor do pico.

O não menos clássico método de Rosenbrock (1960) foi adotado para o ajuste automático, pela sua comprovada eficiência para um número reduzido de parâmetros.

O modelo ajustou-se bem à maioria das 111 cheias observadas na sub-bacia Agronomia-Ipiranga, obtendo reproduções de cheias muito boas para 67 eventos (com  $R^2$  quase sempre maior que 0,9 como o mostrado na Figura 4). Em alguns poucos eventos o ajuste foi ruim e de uma maneira geral, onde os ajustes foram regulares, haviam problemas, ou de consistência de dados, ou de cheias com características além da capacidade do modelo, como cheias longas, cheias muito pequenas e cheias com repiques. Em Silveira (1996) são mostrados os gráficos dos hidrogramas observados.

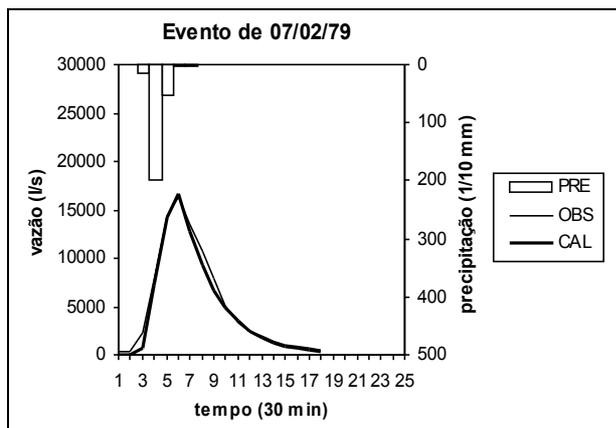


Figura 4. Exemplo de ajuste (cheia 1).

Pelas razões expostas, para efeito de análise dos parâmetros e de outros aspectos propostos na introdução deste artigo, utilizou-se como amostras os 67 eventos mais bem ajustados.

### Parâmetros $v_0$ e $K$

Os resultados dos ajustes do modelo revelam que para a maioria das 67 cheias selecionadas os parâmetros de transferência  $v_0$  e  $K$  variaram, respectivamente, dentro dos intervalos de 1 a  $2 \text{ ms}^{-1}$  e de 1 a 2,5 h (Figura 5). Apesar dessas gamas de magnitude que vão aproximadamente do simples ao dobro, foi possível vislumbrar uma tendência que será abordada a seguir. Para algumas cheias o processo de propagação parece ser dominado pela translação e para outras, pelo armazenamento.

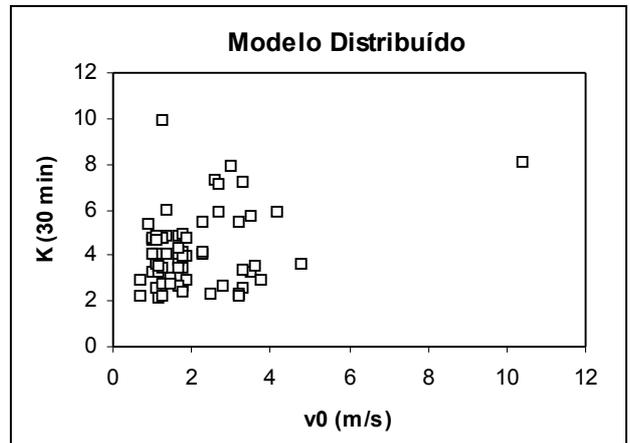
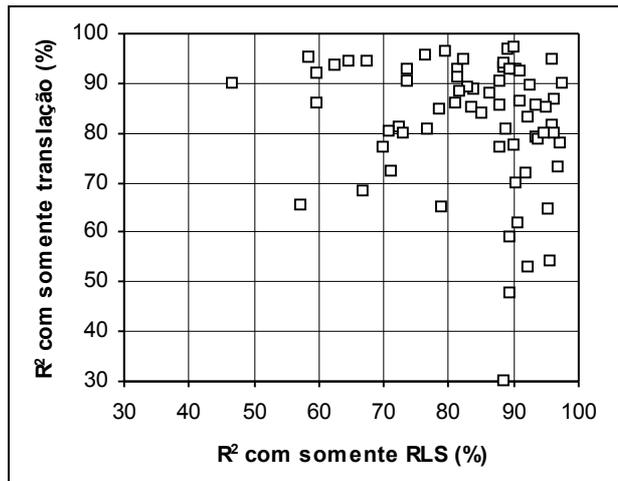


Figura 5. Ajuste dos parâmetros  $v_0$  e  $K$ .

O processo de otimização pode chegar eventualmente a valores inaceitáveis para os parâmetros, sem que isso se configure numa falha deste processo. É o caso sobretudo do parâmetro  $v_0$ . Tendo em vista o intervalo de tempo de simulação e as dimensões da bacia simulada é possível deduzir que uma velocidade de translação da ordem de  $4 \text{ ms}^{-1}$  já equivale a um efeito de translação praticamente nulo. Basta considerar que todas as células cujas trajetórias de escoamento distam  $v_0 \Delta t$  têm suas chuvas transladadas ao exutório no mesmo  $\Delta t$ . Para  $v_0 = 4 \text{ ms}^{-1}$  e  $\Delta t = 30 \text{ min}$  chega-se a um percurso de 7,2 km, que supera qualquer comprimento de escoamento na bacia modelada.

Para  $v_0 = 2 \text{ ms}^{-1}$  a translação reduz-se aproximadamente, a apenas dividir em duas partes iguais, distribuindo em dois intervalos de tempo sucessivos do hidrograma de translação, cada histograma do hidrograma médio. Então, se pelo método de otimização obtém-se velocidades de translação maiores que  $v_0 = 2 \text{ ms}^{-1}$ , é possível interpretar que o modelo direciona a propagação mais para o sentido da solução pelo reservatório linear simples. A esse propósito a Figura 6 revela

uma tendência interessante, ao comparar os  $R^2$  de ajustes quando forçou-se o modelo a funcionar só à base de translação ou só à base de RLS. Observa-se claramente que há cheias que são melhor ajustadas com propagação por translação e outras por RLS, havendo um terceiro grupo de cheias indiferente ao processo de propagação.



**Figura 6. Translação versus RLS.**

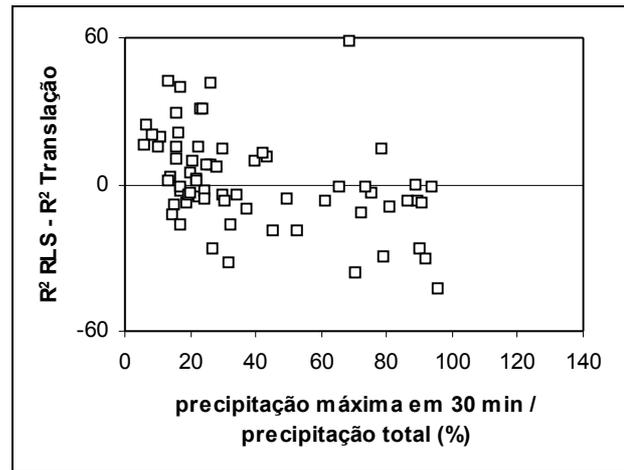
Na tentativa de caracterizar por que em certas cheias predomina um ou outro processo de propagação, foi construído o gráfico da diferença de  $R^2$  dos dois processos contra um indicador da intensidade de precipitação, no caso, o quanto a máxima precipitação num intervalo de tempo do hietograma bruto corresponde na precipitação total deste mesmo hietograma. A Figura 7 mostra esse gráfico, devendo-se notar que a diferença positiva dos  $R^2$  corresponde ao predomínio do RLS sobre a translação e a negativa, o contrário.

Se há uma tendência na Figura 7, ela indica que o mecanismo de transferência por translação predomina quando a chuva é mais concentrada no tempo. No sentido inverso o mecanismo por RLS predomina quando a evolução da precipitação é mais lenta.

Uma possível interpretação física, apesar das incertezas, seria de que a chuva mais concentrada no tempo encheria mais rapidamente a rede pluvial, o que poderia limitar as flutuações de armazenamento dentro da bacia, favorecendo, em consequência, o predomínio da translação. Em compensação, uma precipitação mais longa pode fazer a bacia funcionar com situações variadas de estoque d'água nos escoamentos superficiais, fazendo aparecer mais a influência dos armazenamentos internos.

Apesar do exposto acima é importante salientar que os parâmetros  $v_0$  e  $K$  do modelo são, na

verdade, indissociáveis e não podem ter seus valores interpretados isoladamente. Há uma tendência de  $v_0$  aumentar, ou seja, de apressar o escoamento, quando  $K$  aumenta, ou seja, quando o armazenamento retarda esse mesmo escoamento. Há uma compensação de seus valores numéricos que desautoriza qualquer tentativa de medição a campo. Em outras palavras,  $v_0$  e  $K$  são parâmetros empíricos.



**Figura 7. Efeito da chuva na transferência.**

A dependência entre  $v_0$  e  $K$  poderia autorizar a procura de um algoritmo de propagação superficial com apenas um parâmetro, mas flexível o suficiente para abranger as situações de predomínio alternado da translação e do armazenamento. Isto, entretanto, não fez parte do escopo deste trabalho.

Como o processo de propagação mostrou-se sensível às características da precipitação tentou-se estabelecer relações quantitativas entre os parâmetros  $v_0$  e  $K$  e certas variáveis explicativas da chuva. Para a chuva bruta foram consideradas a duração, a intensidade média, a intensidade máxima, a lâmina total e a razão entre a lâmina da intensidade máxima e a lâmina total. Considerou-se também a lâmina total de chuva efetiva e a porcentagem desta com origem em área urbana (Figura 8).

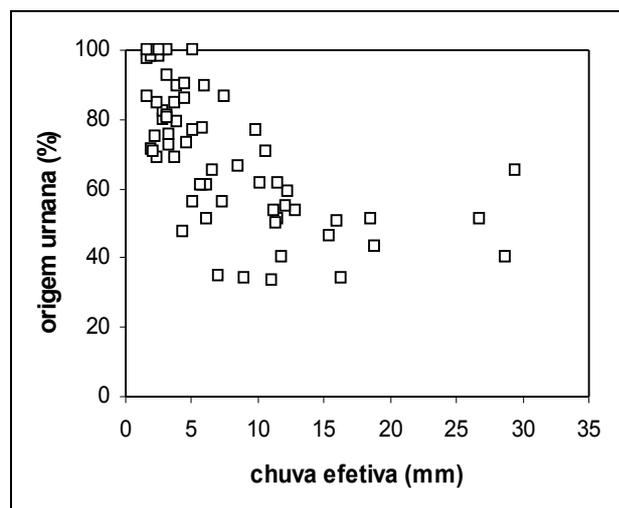
Uma regressão múltipla do tipo *step wise* foi aplicada aos dados de 40 eventos onde  $1 \leq v_0 \leq 2 \text{ ms}^{-1}$  e  $2 \leq K \leq 5 \Delta t (30 \text{ min})$  e obteve-se como resultado as mesmas variáveis explicando ambos parâmetros, o que é coerente com a dependência entre  $v_0$  e  $K$  apontada acima. As equações obtidas foram:

$$v_0 = 0,056I_{\text{méd}} + 0,093P_{\text{ef}} + 0,014O_{\text{urb}} - 0,024P_{\text{br}} \quad (4)$$

$$K = 0,061I_{\text{méd}} + 0,404P_{\text{ef}} + 0,047O_{\text{urb}} - 0,132P_{\text{br}} \quad (5)$$

onde  $I_{méd}$  é a intensidade média (mm) da chuva bruta,  $P_{br}$  é a lâmina total da chuva bruta (mm),  $P_{ef}$  é a lâmina da chuva efetiva (mm) e  $O_{urb}$  é a porcentagem da chuva efetiva com origem em área urbana ( $100 - O_{urb}$  é a fração suburbana).

A expressão de  $v0$  obteve  $R^2 = 0,96$  e a de  $K$ ,  $R^2 = 0,94$ , indicando a boa qualidade do ajuste. Os quatro coeficientes calculados de cada equação, entretanto, não são interpretáveis isoladamente. O coeficiente negativo de  $P_{br}$  significa simplesmente que ele corrige, pela chuva bruta, a explicação global das outras variáveis.



**Figura 8. Origem urbana da chuva efetiva.**

A principal informação revelada pelas expressões anteriores de  $v0$  e  $K$  é que o processo de transferência na bacia depende não só da bacia, mas também da precipitação. Isto significa que a bacia simulada funciona com uma propagação pseudo-linear, podendo  $v0$  e  $K$  incorporar inclusive a variabilidade sazonal que afeta os eventos de precipitação.

## Parâmetro INF

A capacidade de infiltração INF é o parâmetro de produção nas superfícies permeáveis suburbanas, as únicas superfícies permeáveis consideradas pelo modelo que produzem escoamento com potencial de atingir a rede pluvial urbana. É, em última análise, o parâmetro de ajuste da chuva efetiva, já que as outras zonas produtoras, as áreas impermeáveis, consideram sempre toda a chuva bruta como chuva efetiva.

Na bacia estudada, as superfícies suburbanas correspondiam a 38% da área, quase o

dobro da taxa de impermeabilização de 20%. As simulações mostraram que, às vezes, bastava somente a ação desses 20% impermeáveis conectados à rede pluvial para produzir a chuva efetiva causadora do hidrograma de saída. Nestes casos, o valor do parâmetro INF, obtido pelo processo de otimização, buscava traduzir uma situação de infiltração total da chuva nas áreas permeáveis, e qualquer valor elevado seu poderia satisfazer as exigências da otimização. Assim, decidiu-se atribuir a INF, nesta situação, não o valor impreciso indicado pela otimização, mas sim o valor da intensidade máxima da precipitação bruta, no caso, a intensidade média máxima em 30 min do hietograma correspondente ( $I_{max}$ ).

Feitas as devidas correções, a análise da relação  $INF/I_{max}$  em todos os eventos simulados, uma espécie de capacidade de infiltração relativa,  $INF_{rel}$ , conduziu a algumas indicações sobre o comportamento hidrológico do solo. Quando  $INF_{rel}$  se aproxima de 1 é provável que o solo esteja numa condição típica muito favorável à infiltração e quando se aproxima de zero, o contrário.

O comportamento de  $INF_{rel}$  relativamente à precipitação ( $I_{max}$  e  $I_{méd}$ ) e à época do ano (períodos outono-inverno e primavera-verão) está sintetizado na Tabela 1. A variabilidade de  $INF_{rel}$  não permitiu extrair uma tendência imediata, mas foi possível vislumbrar uma certa lógica a partir de um reagrupamento das chuvas segundo quatro tipos, por período: i) chuva fraca (tipo 1); ii) chuva média (tipo2); iii) chuva média-forte (tipo 3); e iv) chuva forte (tipo 4).

As capacidades de infiltração relativas ( $INF_{rel}$ ) medianas indicam que as chuvas fracas tendem a se infiltrar totalmente. Quando se atinge intensidades médias,  $INF_{rel}$  diminui, mas cresce para intensidades de chuva de médias a fortes, voltando a decair para as chuvas fortes. Isto sugere que, em função da intensidade da chuva, o controle do processo de infiltração passa do solo à chuva. Pode-se pensar num limiar de intensidade de chuva abaixo do qual o solo impõe uma capacidade de infiltração residual, mas, uma vez ultrapassada, esta capacidade aumentaria com a intensidade da precipitação, de maneira não proporcional, é claro, pois o solo vai resistir sempre a taxas de infiltração elevadas.

Este comportamento dependente de  $INF_{rel}$  com respeito às precipitações foi observado tanto no período outono-inverno como no de primavera-verão. Há uma leve diferença perceptível, entretanto, revestida de certa lógica, na tendência de uma infiltração um pouco maior no semestre mais quente. A evaporação mais intensa neste período,

**Tabela 1. Capacidade de infiltração relativa  $INF_{rel}$  e precipitações.**

		Outono-Inverno				Primavera-Verão				
Tipo da Chuva		1	2	3	4	1	2	3	4	4
$I_{max}$ (mm/h)		3,8 a 5,0	5,1 a 7,0	7,1 a 12,0	10,0 a 28,0	3,6 a 5,6	5,6 a 8,0	8,1 a 23,0	>18 (*)	>18 (**)
$I_{moy}$ (mm/h)	1,5 à 2,6	0,81 (23) 0,84 (24) 1,00 (57) 0,96 (62) 0,60 (72)				1,00 (73) 1,00 (76) 0,53 (79) 1,00 (80) 0,86 (92)	0,63 (40) 0,88 (74)			
	2,7 à 3,1	1,00 (71)	0,41 (13) 1,00 (16) 0,54 (55) 0,74 (64) 0,55 (94) 0,59 (97)	0,65 (6) 0,79 (8) 0,20 (18) 0,78 (59) 0,73 (61) 0,98 (63) 1,00 (67)			0,73 (36) 0,69 (91)		0,16 (77)	
	3,2 à 4,6			0,70 (7) 0,40 (14) 0,14 (68)	0,78 (11) 0,34 (12) 0,48 (70)			1,00 (33) 0,87 (35) 1,00 (48) 1,00 (50)		
	4,7 à 10,5				0,25 (22) 0,71 (25) 0,37 (53) 0,49 (65) 0,37 (66) 0,32 (69) 0,31 (101)			0,77 (4) 0,77 (106)	0,36 (28) 0,31 (38) 0,47 (42) 0,44 (83) 0,00 (89) 0,00 (108) 0,00 (110)	0,92 (1) 0,26 (34) 0,65 (47) 0,18 (49) 0,49 (109) 0,19 (111)
	> 10,5				0,14 (60)				0,80 (37) 0,02 (90)	0,63 (27)
Mediana		0,9	0,6	0,7	0,4	1,0	0,8	0,9	0 à 0,4	0,6

\* estiagem de menos de 5 dias; \*\* estiagem de mais de 5 dias; O valor entre parêntesis ao lado de cada  $INF_{rel}$  é o número da cheia conforme Silveira (1996).

deixando os solos mais secos seria uma explicação.

Por outro lado, foi somente no período primavera-verão que observaram-se eventos com  $INF_{rel}$  nula sob chuva intensa, mas que encontram uma explicação em estados de umidade inicial elevada dos solos (tempo antecedente seco, ou seja, tempo anterior sem chuvas na bacia, inferior a cinco dias). Evidentemente, os eventos com  $INF_{rel}$  ajustada nula devem ser interpretados como eventos de muito baixa infiltração, pois a infiltração nula não acontece na realidade. Em suma, estes eventos caracterizam situações de chuvas convectivas intensas de verão caindo sobre solos com alto teor de umidade.

Pelas simulações realizadas, a escolha de um valor representativo para  $INF$  ficaria entre 4 a 5 mm/h para chuvas de fracas a médias durante o ano todo. Para chuvas mais fortes (acima de 8 mm/h) seria mais indicado usar as medianas da Tabela 1, mas isso pode conduzir a taxas de infiltração elevadas.

Uma alternativa a este procedimento foi buscar uma estimativa de  $INF_{rel}$  a partir de características da precipitação e do estado do solo. Num procedimento *stepwise*, onde foram propostas seis variáveis relativas ao hietograma médio espacial, a saber: lâmina de chuva total, duração, intensidade média, intensidade máxima em 30 min, volume relativo do intervalo com intensidade máxima e tempo antecedente seco; foram retidas as quatro últimas na expressão:

$$INF = 0,234T_{sec} + 0,335I_{m\acute{a}x} + 0,086V_{rel} - 0,556I_{m\acute{e}d} \quad (6)$$

onde  $T_{sec}$  é o tempo antecedente seco em dias,  $I_{m\acute{a}x}$  é a intensidade máxima de chuva em 30 min (mm/h),  $V_{rel}$  é o volume de  $I_{m\acute{a}x}$  em relação ao volume total do hietograma (%), e  $I_{m\acute{e}d}$  é a intensidade média (mm/h).

Com um coeficiente de determinação de  $R^2 = 0,76$ , a expressão acima sintetiza, de forma quantitativa, a dependência (para o ano todo) da taxa de infiltração média de um evento em função

de características da chuva e do estado inicial de umidade do solo. Consta-se, portanto, que também o parâmetro de produção assume seu valor em função da precipitação e da bacia.

### Simulação com a parametrização

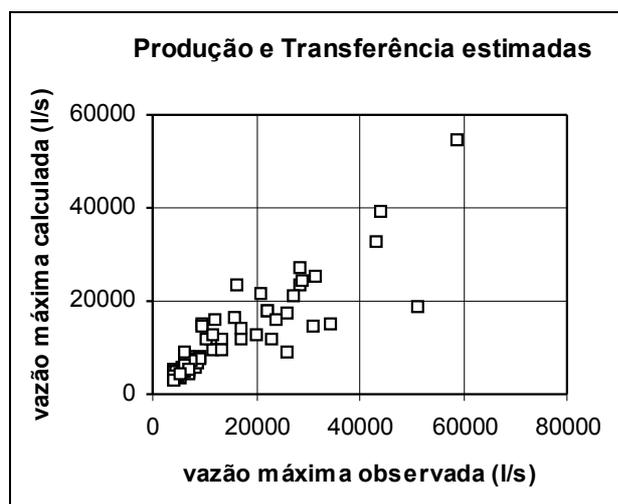
Pode-se avaliar a representatividade da parametrização acima obtida, através da simulação com o modelo distribuído, observando-se a inevitável degradação dos ajustes na reprodução das cheias.

Focalizando o interesse nos picos das 67 cheias ajustadas anteriormente, foi possível verificar, com as simulações parametrizadas, se as abordagens de modelagem eram aceitáveis, como sugerido pelos  $R^2$  das expressões obtidas para os parâmetros.

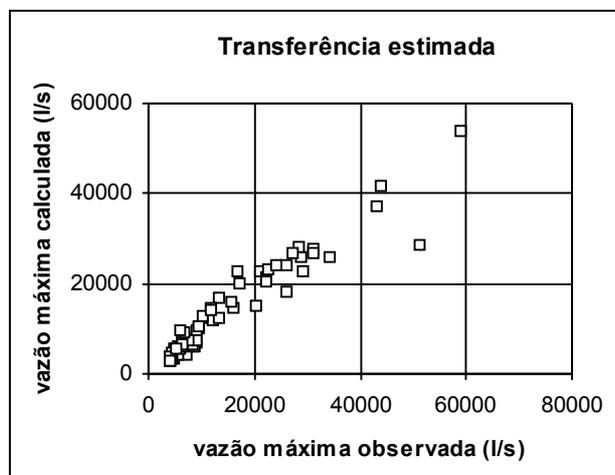
O parâmetro de produção INF foi estimado a partir dos valores medianos de  $INF_{rel}$  da Tabela 1. Porém, resultados análogos são obtidos caso seja aplicada a expressão analítica (6). Com o valor de INF aplicado ao hietograma bruto, é possível estimar a chuva efetiva média  $P_{ef}$  e sua fração com origem urbana na bacia,  $O_{urb}$ , que permitem, por sua vez, o cálculo dos parâmetros  $v_0$  e K de transferência, pelas suas respectivas expressões analíticas (4) e (5).

Foram testadas duas situações, a primeira com estimativa tanto de INF como de  $v_0$  e K (Figura 9), e a segunda com estimativa somente destes dois últimos parâmetros de transferência (Figura 10).

Observa-se nas Figuras 9 e 10 que os picos simulados e observados apresenta dispersão menor dos pontos quando a produção é conhecida e apenas o processo de transferência é estimado.



**Figura 9. Simulação com os parâmetros de produção e transferência estimados.**



**Figura 10. Simulação com somente os parâmetros de transferência estimados.**

Na verdade, esse resultado era esperado, pois, além dessa segunda situação envolver menos parâmetros, o cálculo das perdas é normalmente a etapa com maior incerteza no uso de um modelo hidrológico de eventos.

As simulações efetuadas não configuram a calibração do modelo distribuído proposto; entretanto, indicam que as hipóteses de comportamento pseudo-linear e da importância das contribuições-suburbanas à rede pluvial constituem-se em pistas sérias para a compreensão do funcionamento hidrológico da bacia do Dilúvio.

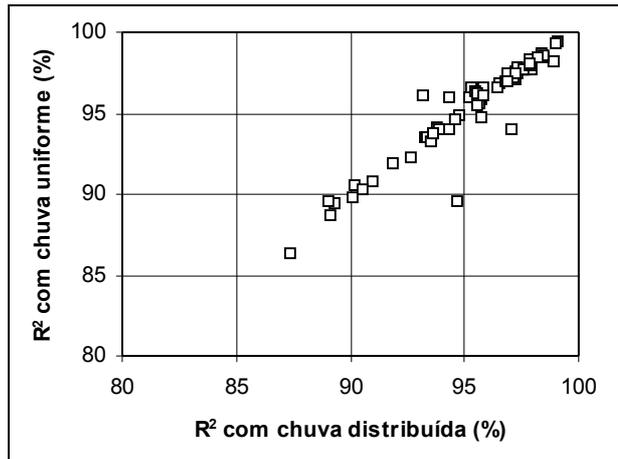
### Simulação com chuva uniforme

Na simulação com chuva uniforme no espaço estabeleceu-se um parâmetro de comparação que permitiu avaliar o efeito de se considerar a chuva distribuída na bacia como propõe o modelo.

Repetindo-se o processo de ajuste do modelo às mesmas 67 cheias anteriores, considerando a chuva uniforme, observou-se que os resultados, em termos de  $R^2$ , foram bastante próximos aos da situação com chuva distribuída (Figura 11).

Em ambas as situações, os jogos de parâmetros ajustados foram semelhantes, para cada evento. A razão principal disto, entretanto, não deve ser buscada na estrutura do modelo, mas sim no fato da chuva efetiva na bacia estudada ter sido frequentemente semelhante nas áreas urbanas e rurais, mascarando a não linearidade da translação, que propiciaria um melhor  $R^2$  com chuva distribuída. Isto aconteceu porque a chuva bruta dos eventos não variou efetivamente muito no es-

paço, e também porque observou-se que o coeficiente de escoamento rural (próximo de 0,3) aproxima-se muito da taxa de impermeabilização urbana. É também possível que o intervalo de tempo de simulação de 30 min tenha promovido uma filtragem pela superposição de muitas contribuições de células diferentes, atenuando o caráter não homogêneo da translação.



**Figura 11. Simulação com chuva uniforme.**

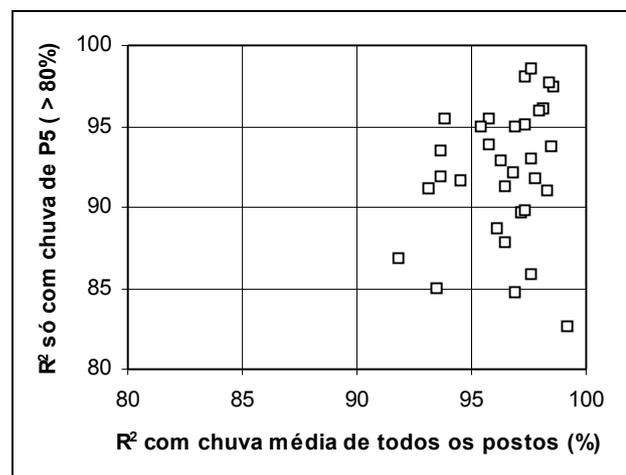
### Simulação com chuva pontual

Freqüentemente dispõe-se de, no máximo, apenas um pluviógrafo numa bacia urbana. Isto caracteriza uma situação de conhecimento restrito da precipitação espacial, o que degrada o desempenho de qualquer modelo, seja distribuído ou concentrado. Para avaliar este efeito no presente estudo, realizaram-se simulações considerando apenas as precipitações registradas no posto P5 (posto do 8º Distrito de Meteorologia - INMET), aliás o único atualmente em funcionamento na bacia do Dilúvio.

Os resultados dos ajustes somente com as chuvas de P5 estendidas à toda bacia foram, como esperado, em geral piores que os da situação em que se considerou todos os dados pluviográficos disponíveis (Figura 12). Entretanto, os resultados não foram sistematicamente piores, sendo algumas vezes até ligeiramente melhores. De qualquer forma, obteve-se algum resultado do efeito dos erros de representação da precipitação média sobre a bacia quando se considera um valor pontual e não do campo espacial das chuvas.

No conjunto das 52 cheias, para as quais havia dados do posto P5, em 26 (50%) os ajustes foram claramente piores nas simulações com somente a chuva deste posto. Comparando-se os

parâmetros ajustados nesta situação com os mesmos parâmetros ajustados com a aplicação do campo médio das precipitações, observa-se maior discrepância dos valores do parâmetro INF do que nos parâmetros de transferência,  $v_0$  e  $K$ . Isto acontece porque é o parâmetro INF que ajusta a chuva efetiva, partindo de chuvas brutas médias não exatamente iguais nas duas situações. A chuva efetiva, portanto, tende a ser semelhante nos dois casos, a despeito da representação diferenciada da chuva bruta, às custas de se introduzir maior incerteza no parâmetro INF. No entanto, constatou-se que os parâmetros  $v_0$  e  $K$  foram, cada qual, bastante semelhantes num caso e noutro.



**Figura 12. Simulação com chuva pontual.**

### Simulação com translação linear

A simulação com chuva uniforme, abordada anteriormente, mostrou-se inconclusiva para destacar a importância da translação não-linear propiciada pelo modelo distribuído. Para isso, fez-se então uma avaliação, substituindo todo o processo de translação, cujo parâmetro era  $v_0$ , por um processo do tipo reservatório linear simples. Isto equivale a estabelecer um novo modelo para comparação, do tipo concentrado, onde o processo de transferência (translação+armazenamento) é descrito por dois reservatórios lineares simples em cascata, com parâmetros  $K_1$  e  $K_2$ .

Os ajustes realizados para as 67 cheias com este duplo RLS mostraram resultados satisfatórios em termos de  $R^2$  para o modelo concentrado (Figura 13), em alguns casos até melhores que o do modelo distribuído. Entretanto o ajuste foi melhor para a maioria das 67 cheias estudadas, quando a translação não-linear (modelo distribuído)

foi usada. Esta constatação foi importante pois sinalizou que a translação não-linear, como proposta no modelo distribuído, é significativa no processo de transferência ou propagação.

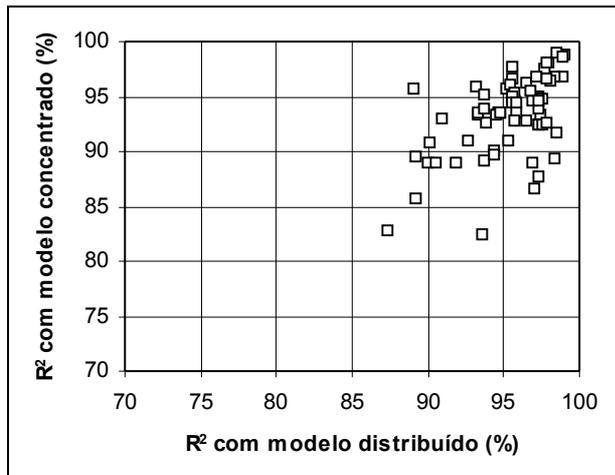


Figura 13. Efeito da translação distribuída.

## CONCLUSÃO

Foi apresentado um estudo dos mecanismos de transformação chuva-vazão na bacia do Arroio Dilúvio em Porto Alegre. A adoção de uma abordagem simples, através de um modelo distribuído com três parâmetros permitiu avaliar:

- i. o papel relativo das superfícies urbanas e suburbanas na produção de escoamento;
- ii. a possibilidade de representação do processo de transferência por mecanismos simples de translação e armazenamento;
- iii. a importância na geração dos escoamentos da distribuição espacial da precipitação e da ocupação do solo.

O parâmetro de produção proposto foi a capacidade de infiltração única para a zona suburbana-constituída, por hipótese, de superfícies permeáveis cujo escoamento superficial atinge a rede pluvial da zona urbanizada, que se mostrou ligeiramente influenciada pelo aspecto sazonal (capacidade de infiltração mais acentuada na primavera-verão), e significativamente dependente das características da precipitação (principalmente da intensidade máxima do hietograma) e do estado de umidade do solo (avaliado indiretamente pelo tempo antecedente seco). Os valores obtidos para este parâmetro situaram-se na maioria dos casos, entre 5 e 10 mm/h, o que conduziu no caso estudado, por coincidência, à uma homogeneização

significativa da chuva efetiva no conjunto das zonas urbanas e suburbanas, indicando ter pouca importância a representação distribuída da chuva.

Entretanto, a representação distribuída parece ser necessária na simulação da translação, que mostrou características pseudo-lineares em relação à precipitação. Efetivamente, comparada a outro mecanismo de transferência concentrado, a combinação de uma translação distribuída com o reservatório linear simples se mostrou mais precisa. Os parâmetros correspondentes (uma velocidade de translação e o coeficiente de armazenamento do RLS) não são, entretanto interpretáveis isoladamente, mostrando-se cada qual dependente das mesmas variáveis explicativas numa análise multivariada. Na gama de variação predominante (velocidade de translação entre 1 e 2  $\text{ms}^{-1}$  e coeficiente de armazenamento entre 1 e 2,5 h), o processo de transferência varia em função da chuva bruta (lâmina e intensidade média) e da chuva efetiva (lâmina e porcentagem com origem na zona urbana).

A partir destas constatações específicas pode-se concluir que a modelagem proposta é promissora na simulação de escoamentos urbanos com aproveitamento de informações distribuídas. Estudos posteriores deverão entretanto avaliar a incerteza dos resultados, mesmo que as análises de desempenho do modelo na reprodução de vazões de pico tenham indicado boa capacidade neste sentido.

Outro aspecto que não deve passar despercebido é que os estudos realizados envolveram cheias freqüentes do Arroio Dilúvio (períodos de retorno < 1-2 anos e vazões de pico < 50-60  $\text{m}^3/\text{s}$ ) e não autorizam uma extrapolação direta para cheias extremas que já teriam atingido cerca de 250  $\text{m}^3/\text{s}$ , segundo estimativas de Mota (1982). Entretanto, as simulações com o modelo distribuído indicaram que as cheias extremas teriam necessariamente uma contribuição suburbana importante da mesma ordem de grandeza das áreas urbanizadas, em função da grande intensidade da chuva em períodos equivalentes ao tempo de concentração da bacia.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio do projeto do REHIDRO da FINEP e do PRONEX (IPH/UFRGS, MCT/MEC), e ao programa Geofluides-Bassins-Eau, Universidade de Montpellier e ORSTOM.

## REFERÊNCIAS

- ALVAREZ, C., SANCHEZ, J. (1979). *Estudos Hidrológicos da Urbanização da bacia do Arroio Dilúvio, Relatório Final*, Departamento de Esgotos Pluviais da Prefeitura Municipal de Porto Alegre e Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- ALVAREZ, C., SANCHEZ, J. (1980). Effects of urbanization on the hydrology of a suburban basin in Porto Alegre, Brazil, *Proceedings of the Helsinki Symposium*, IAHS publ. 130.
- CAICEDO, N. (1975). *Métodos de síntesis en la hidrología urbana*, Dissertação de Mestrado, p70, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- CAMPANA, N. A. (1995). *Impacto da urbanização nas cheias urbanas*, Tese de Doutorado, Pós-graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, p185.
- DESBORDES, M. (1984). *Modélisation en Hydrologie Urbaine: recherches et applications*, LHM 22/84, p183, STU, Paris.
- DESBORDES, M. (1985). Linear reservoir misteries, p94, *inédit Laboratoire d'Hydrologie Mathématique*, Université de Montpellier.
- DESBORDES, M. (1987). *Contribution à l'analyse et à la modélisation des mécanismes hydrologiques en milieu urbain*, Thèse, p242, Académie de Montpellier, Université des Sciences et Techniques du Languedoc.
- MOTA, J. C. (1982). *Simulação hidrológica de uma bacia urbana: Arroio Dilúvio - Porto Alegre*, Dissertação de Mestrado, p177, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- MOTA, J. C., TUCCI, C. E. M. (1984). Simulation of the urbanization effect in flow, *Hydrological Sciences Journal*, (29) 2, 6/1984, p131-147.
- NASH, J. E., SUTCLIFFE, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models, 1, a discussion of principles, *Journal of Hydrology*, 10, p282-290.
- ROSENBROCK, H. H. (1960). An automatic method for finding the greatest or least value of a function, *Computer Journal*, v3, p175-184.
- SCHNEIDER, A. W., LOSS, E. L., PINTO, J. F. (1974). *Mapa geológico da folha de Porto Alegre*, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS/CNPq, escala 1: 50 000.
- SILVEIRA, A. L. L. (1996). *Contribution à l'étude hydrologique d'un bassin semi-urbanisé dans le Brésil subtropical, bassin de l'Arroio Dilúvio à Porto Alegre*, Thèse, p240, Académie de Montpellier, Université Montpellier II, Sciences et Techniques du Languedoc.
- SIMÕES LOPES, M., SANCHEZ, J. (1986). *Avaliação do impacto hidrológico causado pela urbanização de uma bacia*, Relatório Final FINEP, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

### **An Urban Distributed Rainfall-Runoff Model with Parameters**

#### **ABSTRACT**

*This paper presents an urban rainfall-runoff model which accepts distributed inputs of precipitation, considers urban and suburban land cover types, and a transfer by a square-mesh grid to simulate flood events in urbanized watersheds. The model generates automatically a non-linear time-area histogram for the spatially averaged precipitation that simulates the translation of the net distributed rainfall. The transfer process is completed by a linear reservoir to represent the temporary storage of overland and channel flows. The rainfall abstractions are calculated pixel by pixel. Within urban areas all rainfall infiltrates into permeable terrain and runoff is generated only from impervious areas. In suburban areas the model uses a single infiltration capacity (like a  $\phi$  index). The model has only three parameters: pixel-to-pixel translation surface flow velocity, reservoir constant from the linear reservoir transfer, and suburban infiltration capacity. The distributed model was applied to the urbanized Dilúvio creek basin (Porto Alegre, Brazil) and performed well in the simulation of frequent flood events with limited duration. The parameters displayed a pseudo-linear character varying with characteristics of the precipitation. The non-linear time-area histogram was significant for good hydrographs reproduction.*