

Impacto da Incerteza na Representatividade da Repartição Espacial da Precipitação sobre os Hidrogramas e as Curvas de Permanência Obtidos de um Modelo Chuva-Vazão Distribuído

Alain Marie Bernard Passerat de Silans, Cristiano das Neves Almeida, Renato de Queiroz Porto

Centro de Tecnologia – Laboratório de Recursos Hídricos e Engenharia Ambiental - UFPB

alainsilans@yahoo.com.br, almeida74br@yahoo.com.br, renatodequeiroz@yahoo.com.br

Recebido: 02/06/08 – revisado: 08/08/08 – aceito: 12/05/09

RESUMO

Após avanços na área de modelagem de recursos hídricos, pesquisadores vêm despertando para a determinação dos erros e incertezas associados à estrutura do modelo utilizado e aos dados de entrada, entre outros fatores. Este trabalho utiliza um modelo hidrológico distribuído, o AÇUMOD, para estudo da influência da repartição espacial da precipitação nas vazões calculadas por esse modelo assim como sobre as curvas de permanência de vazões mensais obtidas a partir das saídas do modelo. Para a realização do estudo, utilizou-se uma bacia localizada na região litorânea do Nordeste do Brasil, a bacia hidrográfica do Rio Gramame, que é bastante representativa das bacias hidrográficas do litoral nordestino. Essa bacia, num passado recente, contou com uma densa rede de monitoramento pluviométrico. Esses postos foram utilizados para gerar conjuntos de vazões mensais, para diversas densidades de postos pluviométricos, excluindo-se de 1 a 7 postos pluviométricos. A análise da incerteza devida à representatividade da repartição espacial da chuva foi feita a partir de três abordagens complementares: i) estudo do efeito da densidade dos postos pluviométricos sobre a saída do modelo, ii) estudo da sensibilidade intradensidade do modelo devido à variabilidade espacial da precipitação, e iii) estudo da sensibilidade da curva de permanência das vazões mensais à representatividade da repartição espacial da precipitação. Mostrou-se que a informação gerada pelo modelo se degrada para densidades inferiores a um posto pluviométrico para cada 65 km², situação esta que se observa na maioria das bacias do litoral do Nordeste. Mostrou-se também que a sensibilidade do modelo e das curvas de permanência varia no espaço, dependendo de como se distribuem espacialmente os postos pluviométricos. Os resultados mostram uma sensibilidade diferente quando se observa o hidrograma mensal, ou a curva de permanência. Nas sub-bacias dos rios Mamuaba e Mumbaba, o erro máximo sobre a Q90 sempre foi inferior a 20%, mas apresentou-se bem superior a 100% na bacia do rio Gramame a montante do reservatório que abastece a cidade de João Pessoa. Porém, ao observar os hidrogramas mensais, a menor sensibilidade à repartição espacial da precipitação foi justamente observada na bacia do rio Gramame e a maior na bacia do rio Mumbaba.

Palavras-chave: distribuição espacial, precipitação, modelo chuva-vazão distribuído.

INTRODUÇÃO

A análise das incertezas associadas à utilização de modelos hidrológicos tem suscitado inúmeros trabalhos nestes últimos vinte anos (Pappenberger & Beven, 2006). No entanto, segundo esses autores, a comunidade dos usuários desses modelos, aqueles que desenvolvem os pacotes informáticos e os que aplicam estes pacotes a problemas da engenharia, relutam em incorporar os estudos das incertezas à modelagem. Eles apontam sete razões ou argumentos que são normalmente utilizados como justificativas. Entre outros, chamam atenção argumentos tais como: uma análise da incerteza é sempre muito subjetiva, e, a análise da incerteza é muito

difícil para promover resultados que possam ser entendidos pelos usuários, que são geralmente os responsáveis pelas decisões tomadas a partir das informações geradas pelo modelo.

Lei e Schilling (1998) já haviam sugerido a incorporação da análise da incerteza no que chamaram de Sistema de Modelagem, que consiste em um conjunto de procedimentos formado por hipóteses que procuram descrever como o sistema físico se comporta; métodos numéricos que aproximam o sistema físico por meio de sistemas de equações matemáticas, e, um processo de calibração – validação dos parâmetros. Quando o modelo é aplicado em bacias hidrográficas onde existem séries históricas de dados observados, as saídas do modelo (os resultados) jamais serão idênticas às observações.

Quando o modelo é aplicado em bacias hidrográficas onde não existem séries históricas de dados observados, as saídas do modelo (resultados) jamais serão idênticas aos valores reais. Isto porque há sempre erros devidos à estrutura do modelo; aos parâmetros do modelo; aos atributos do modelo (área da bacia ou sub-bacias, declividade, etc.); aos dados de entrada do modelo; aos dados observados utilizados no processo de calibração-validação; às condições iniciais e à solução numérica adotada. O erro associado ao resultado do modelo é definido como a diferença entre o valor simulado pelo modelo e o valor real. O erro nunca é conhecido, pois o valor real nunca é conhecido. Caso fosse possível realizar N experimentos para medir o valor real, encontrar-se-iam N valores diferentes. O erro na literatura é então tratado como um valor aleatório, teoricamente, com uma média nula e uma variância constante (Kuczera e Williams, 1992). Lei e Schilling (1994) definiram a incerteza sobre os resultados de modelos hidrológicos como sendo uma descrição estatística do erro caracterizada pela probabilidade do valor real do erro se encontrar num determinado intervalo, ou seja, ao valor estimado do resultado do modelo se associa um intervalo com determinado nível de confiança.

O processo mais importante na aplicação de um modelo hidrológico é, segundo Kuczera e Williams (op. cit.), o conjunto de operações formado pela calibração e a validação do modelo que precede a inferência de séries pseudo-históricas. Este processo consiste em determinar os parâmetros do modelo ou famílias de parâmetros do modelo, que conduzem à melhor comparação entre os valores simulados pelo modelo e os observados. Se os dados de entrada do modelo e os dados observados utilizados para a calibração e a validação do modelo são confiáveis e bastante representativos do regime hidrológico da bacia em estudo, o processo de validação dos parâmetros do modelo, caso bem sucedido, confere aos resultados do mesmo um certo grau de qualidade. Em outras palavras, admitem-se que as incertezas associadas aos resultados são suficientemente pequenas para serem desprezadas.

Na faixa oriental do litoral do Nordeste brasileiro, as precipitações, na estação chuvosa, a qual se estende de Abril a Agosto, são devidas principalmente às ondas de leste (OL). A brisa marítima, que tem a sua origem na diferença de temperatura entre a superfície terrestre e a superfície do mar, provoca, de madrugada, forte movimento ascendente, o qual favorece a formação de cumulus na linha de costa, com a umidade trazida pelas OL. São precipitações convectivas que podem apresentar curta duração e

forte intensidade. As precipitações, mesmo acumuladas sobre períodos diários, mensais ou anuais, nesta região, apresentam grande variabilidade espacial. Esta foi quantificada e estudada detalhadamente por Rodrigues e Passerat de Silans (2003) no litoral do estado da Paraíba.

Diversos autores estudaram o efeito da variabilidade espacial de precipitações convectivas sobre a geração do escoamento superficial (Goodrich et al., 1990, Faures et al., 1995, Lopes, 1996, Medeiros et al., 2007). Todos eles, em pequenas bacias hidrográficas de regiões semi-áridas, mostram que a incerteza sobre a modelagem do escoamento superficial está associada à distribuição espacial dos postos pluviométricos e sua relação com o campo da precipitação. Goodrich et al. (1990) mostram que a incerteza cresce com a diminuição do número de postos pluviométricos considerados na simulação. Esses autores afirmam que, em bacias hidrográficas médias e grandes, a importância da variabilidade espacial da precipitação sobre a geração do escoamento superficial é reconhecida. No entanto, em pequenas bacias, ou em sub-bacias, geralmente se considera uma precipitação uniforme estimada a partir de um único posto pluviométrico. Os seus estudos mostram que em caso de precipitações convectivas, mesmo em pequenas sub-bacias de um modelo hidrológico distribuído, a variabilidade espacial da precipitação deve ser levada em conta a partir de um processo adequado de interpolação.

Andreolli et al. (2006) realizaram estudo a fim de verificar a influência da rede de monitoramento pluviométrico na previsão de vazão em tempo real na bacia do Rio Uruguai. Nesse estudo, foram confrontados diversos cenários, com ou sem a rede convencional e com retirada semi-aleatória de postos convencionais. Para análise dos resultados foram utilizados 2 parâmetros estatísticos, que mostraram que a diferença entre as vazões previstas e as observadas pode ficar em torno de 15%.

Xavier et al. (2006) desenvolveram uma metodologia baseada na krigagem Bayesiana e na metodologia GLUE (Generalized Likelihood Uncertainty Estimative) proposta por Beven & Freer (2001) para estimar a incerteza na modelagem hidrológica devido à representação da precipitação. O método proposto é baseado numa análise geoestatística do campo de chuva dado pela rede de estações pluviométricas (hard data) e a análise geoestatística de imagens de radar (soft data). No estudo de caso apresentado, foi mostrado que as descargas aumentaram à medida que a representação do campo de precipitação piorava.

A bacia hidrográfica do rio Gramame, no estado da Paraíba, distingue-se das demais bacias litorâneas do Nordeste Brasileiro por ter possuído durante 17 anos, uma cobertura razoável de postos pluviométricos. Fato raro nesta região, pois a SUDENE, responsável pelo monitoramento dos dados hidrometeorológicos no Nordeste até o início da década de 90, concentrou os seus esforços na região semi-árida em detrimento da área úmida localizada no litoral do Nordeste.

O objetivo deste trabalho é de analisar o efeito da representatividade espacial do campo de precipitação sobre os valores de vazão gerados pelo modelo hidrológico AÇUMOD (Passerat de Silans et al., 2000) na bacia hidrográfica do rio Gramame e as conseqüentes incertezas sobre as curvas de permanência em diversos pontos de cálculo (PC's) da bacia. Essas são utilizadas para o processo de outorga e para os estudos de planejamento dos recursos hídricos na bacia (Silva et al., 2002). Portanto, considerar a alta variabilidade espacial da precipitação, uma estimativa do intervalo de confiança sobre valores característicos da curva de permanência, é de grande valia para a gestão dos recursos hídricos na bacia.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de Estudo

A bacia do rio Gramame na área litorânea do estado da Paraíba encontra-se localizada entre os paralelos de 7º 11' e 7º 23' (Sul) e os meridianos de 34º 48' e 35º 10' (Oeste) (Figura 1). Tem uma área de drenagem de 589 km², onde escoam três rios principais: Gramame, Mumbaba e Mamuaba. Nela localiza-se o açude Gramame-Mamuaba, com 56 milhões de m³, o qual é responsável pelo abastecimento de cerca de 24% da população do Estado da Paraíba, ou seja, 850 mil habitantes segundo o censo demográfico do IBGE publicado em 2000. Nesta região estão instaladas as principais indústrias do Estado. Desta forma, esta bacia tem uma importância fundamental para o desenvolvimento socioeconômico da Paraíba.

Do ponto de vista climatológico, observa-se que o período chuvoso concentra-se em 5 meses, compreendidos entre abril e agosto, tendo uma precipitação anual média de aproximadamente 1.600 mm. Segundo a classificação de Köppen (1948), quase toda a região envolvida neste estudo localiza-se em clima tropical chuvoso. A evaporação, medida em tanque classe A na estação climatológica

de Marés, apresenta um valor médio de 1.300 mm/ano. Uma característica importante dessa bacia é a existência de um forte gradiente nos índices pluviométricos no sentido leste-oeste, esse gradiente é, no centro da bacia hidrográfica do rio Gramame, de 30 mm/km.

O modelo chuva-vazão utilizado

O modelo AÇUMOD (Passerat de Silans et al., 2000) é um modelo distribuído conceitual que simula o processo de transformação da chuva em vazão. Uma característica singular deste modelo é que o mesmo realiza o balanço hídrico dos elementos hidráulicos (açudes, captações d'água, etc.) existentes na rede de drenagem. Estes elementos modificam o regime de escoamento de uma bacia hidrográfica.

Em simulações com o AÇUMOD, a bacia hidrográfica e suas sub-bacias são discretizadas por quadrículas. São desenhadas na bacia hidrográfica, zonas hidrológicas homogêneas (ZHH's). As ZHH's são áreas que estando a uma mesma condição inicial de umidade e ocorrendo sobre estas uma precipitação de igual intensidade, será gerada uma mesma lâmina de escoamento. Elas são definidas a partir da superposição de mapas de usos do solo, vegetação, pedologia, etc. O modelo realiza então, em cada quadrícula e em cada ZHH, um balanço hídrico diário, a fim de determinar as lâminas evaporadas, infiltradas, armazenadas no solo, percoladas e escoadas superficialmente e sub-superficialmente. Para isto a chuva é repartida espacialmente através da técnica dos polígonos de Thiessen. A conceitualização do ciclo hidrológico é feita através de um conjunto de quatro reservatórios, para os quais são determinadas estas lâminas. Neste modelo a transferência dos escoamentos superficiais é feita pelo método das isócronas. Em cada quadrícula é calculada, em dias, a zona isócrona na qual a mesma se encontra. Isto é feito considerando o tempo de concentração da bacia hidrográfica. Maiores detalhes sobre a estrutura do AÇUMOD podem ser encontrados em Passerat de Silans et al. (2000) e Almeida (2006).

Metodologia

O modelo distribuído AÇUMOD (Passerat de Silans et al., 2000) foi aplicado à bacia hidrográfica do rio Gramame por Silva et al. (2002). Na sua calibração e validação foram utilizados dados de vazões mensais de 3 postos fluviométricos monitora-

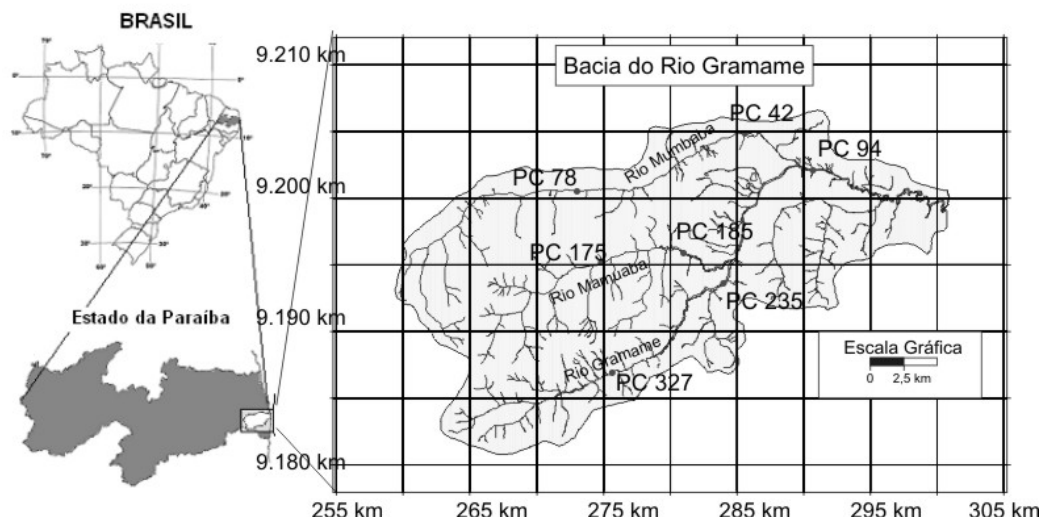


Figura 1 - Localização da bacia hidrográfica do rio Gramame e dos pontos de cálculo

dos pela Companhia de Água e Esgotos do Estado da Paraíba (CAGEPA), que foram desativados em torno de 1980. Neste trabalho os parâmetros calibrados por esses autores são utilizados. Silva et al. (op. cit.) utilizaram dados diários de precipitação de 11 postos pluviométricos com registros de boa qualidade entre 1972 e 1989 e que têm influência direta na bacia hidrográfica quando se usam os polígonos de Thiessen,. Isto representa uma densidade de aproximadamente um posto pluviométrico a cada 54,5 km², enquanto em média na região litorânea do Nordeste a densidade é de aproximadamente 1 posto a cada 250 km². Aplicando o modelo AÇU-MOD neste período, foram geradas séries de 17 anos de vazões mensais (de 1972 a 1989) em cada PC (ver figura 1). Utilizando o modelo estocástico de Thomas-Fiering com as devidas correções para considerar a assimetria das séries de vazões mensais, geraram séries sintéticas de 200 anos com as quais determinaram as curvas de permanência. Neste trabalho, os mesmos procedimentos são utilizados, variando tão somente a representatividade espacial da precipitação.

A abordagem metodológica para avaliar e interpretar as incertezas sobre as curvas de permanência consiste em duas fases. Na primeira, analisa-se a sensibilidade do modelo à representatividade espacial da chuva, seguindo-se as etapas:

- i. São escolhidos sete pontos de cálculo (PC's) na bacia hidrográfica do rio Gramame, estrategicamente dispostos em função da importância dos cursos de água e da impor-

tância das demandas em água pelos irrigantes. Estes são destacados na figura 1.

- ii. São eliminados, seqüencialmente, conjuntos formados por 1 a 7 postos pluviométricos (PP's) do total dos postos pluviométricos utilizados em Silva et al., (op. cit.). São sorteadas então, aleatoriamente, combinações de postos pluviométricos (PP's) para efetuar as simulações para cada densidade de PP's. Isto é, para cada densidade de PP's considerada, dispõe-se de N_i combinações de PP's sorteadas, as quais permitem uma ampla variação da representatividade espacial da chuva. Na tabela 1, constam os números de combinações possíveis sorteadas para cada conjunto de PP's eliminados, com os quais se efetuam as simulações:

Tabela 1 - Números de combinações possíveis e sorteadas para cada conjunto de PP's eliminados

Conjuntos de PP's eliminados:	Número de Combinações possíveis.	Número de Combinações sorteadas, N_i .
1 PP	11	10
2 PP	55	20
3 PP	165	91
4 PP	330	199
5 PP	462	232
6 PP	462	258
7 PP	330	185

* PP – Posto Pluviométrico

iii. Para cada uma das 995 simulações são geradas séries históricas de 17 anos de vazões mensais nos sete PC's considerados neste estudo.

A análise de sensibilidade do modelo à representatividade espacial da precipitação é então feita com duas abordagens diferentes:

1) Efetua-se uma análise baseada sobre a densidade de PP's, comparando-se as séries médias geradas para cada conjunto de Ni simulações (i varia de 1 a 7 PP's retirados), com a simulação de referência, que é a simulação de Silva et al. (op. cit.). A comparação é feita observando-se os seguintes indicadores:

A média relativa, MR_i (i=1,7)

$$M_{R,i} = \frac{\mu_i}{\mu_{Ref}} \quad (1)$$

Onde μ_i é a média das vazões mensais para a densidade de PP's correspondendo à retirada de i PP's, e μ_{Ref} é a média das vazões mensais da série de referência;

O coeficiente de correlação, Ri

$$R_i = \frac{Cov(Q_{Med,i}, Q_{Ref})}{\sigma_{Q_{Med,i}} \cdot \sigma_{Q_{Ref}}} \quad (2)$$

calculado como a razão da covariância da série média gerada (Q_{Med,i}) quando i PP's foram retirados e da série de referência (Q_{Ref}), pelo produto dos desvios padrão respectivos;

O erro médio, Pbiasi

$$Pbias_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (Q_{Ref}^j - Q_{Med,i}^j) \quad (3)$$

onde n é o número de meses das séries de 17 anos. Um valor de Pbiasi positivo significa que retirando i PP's em relação à simulação de referência, obtém-se uma série média de vazões mensais subestimada, e;

A raiz quadrada do erro quadrático médio

$$EQM_i = \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^n \sqrt{(Q_{Ref}^j - Q_{Med,i}^j)^2} \quad (4)$$

Para observar espacialmente, no espaço geográfico delimitado pela bacia hidrográfica, a sensi-

bilidade do modelo ao número de PP's excluídos em relação à simulação de referência, traçam-se os mapas de distribuição dos valores de Pbiasi e de EQMi. Esses mapas são desenhados com o programa SURFER (versão 8), utilizando o processo de interpolação baseado sobre o inverso do quadrado da distância.

2) Efetua-se uma análise "intradensidade", comparando-se as séries geradas entre si para um mesmo número de PP's retirados. Essa comparação é feita analisando as curvas de permanência do coeficiente de variação, CV_{i,k}, do valor relativo do erro máximo em relação à média, EMax_{i,k} e do valor relativo do erro mínimo em relação à média EMin_{i,k}.

$$CV_{i,k} = \frac{\sigma_{i,k}}{\mu_{i,k}}, \quad k = 1, \dots, n \text{ (meses)} \quad (5)$$

onde $\mu_{i,k}$ e $\sigma_{i,k}$ representam respectivamente a média e o desvio padrão das vazões mensais do késimo mês das Ni séries de vazões mensais geradas;

$$EMax_{i,k} = \frac{\text{Max}(Q_{i,j,k} - \mu_{i,k})}{\mu_{i,k}} \quad (6)$$

onde Q_{i,j,k} representa a vazão do késimo mês da série j (j=1, Ni), e;

$$EMin_{i,k} = \frac{\text{Min}(Q_{i,j,k} - \mu_{i,k})}{\mu_{i,k}} \quad (7)$$

Na segunda fase, analisa-se o efeito da densidade de postos pluviométricos sobre as curvas de permanências. As curvas de permanência obtidas com os dados dos estudos de Silva et al. (op. cit.), que se encontram no trabalho de Paiva (2001) servem de referência.

Para cada simulação nos sete PC's considerados neste estudo, são geradas as curvas de permanência. São então anotadas as vazões mensais com respectivamente 50%, 90%, 95%, 98% e 99% de probabilidade de ser ultrapassadas, as quais são anotadas Q50, Q90, Q95, Q98, e Q99, respectivamente.

Calculam-se, para cada conjunto de combinações de PP's, a média, o desvio-padrão e os valores mínimos e máximos obtidos para cada QP (P= 50, 90, 95, 98 e 99). Obtém-se desta forma a curva de permanência média das vazões mensais para a qual

se traça o intervalo de confiança a 90%. Portanto, obtém-se como resultado, para cada QP, em cada PC, uma faixa de valores de vazão com 90% de probabilidade de ocorrência para as diversas representatividades espaciais testadas. As curvas de permanência obtidas são comparadas às curvas de permanência da simulação padrão.

Na abordagem proposta neste estudo, a hipótese de base para estimar a incerteza devida à representatividade do campo de precipitação, é de que o processo de calibração – validação do modelo foi suficientemente eficaz para que os erros oriundos deste processo sejam insignificantes. São então desconsideradas as incertezas oriundas da estrutura do modelo, dos parâmetros e dos dados de entrada. Por este processo, obtiveram-se famílias de parâmetros representativos das ZHH's. Neste estudo, admite-se implicitamente que estes parâmetros poderiam ser utilizados em outras bacias hidrográficas não instrumentadas ou menos instrumentadas que a bacia do rio Gramame, já que esta é representativa das bacias litorâneas da região estudada.

A abordagem proposta questiona a realidade em termos de postos pluviométricos monitorados na região do litoral do Nordeste oriental. Até 1991, a SUDENE foi encarregada do monitoramento destes dados, e, pela sua função, a SUDENE deu maior atenção à região semi-árida em detrimento da região litorânea. A bacia do rio Gramame é a única onde existiu num período curto, mas razoável para o efeito de modelagem, medições pluviométricas com uma densidade bem superior às demais bacias hidrográficas. Os resultados do estudo fornecerão aos usuários do modelo AÇUMOD nessa região uma estimativa da confiabilidade sobre as curvas de permanência nos pontos de cálculo na bacia hidrográfica estudada. É importante destacar que, a Q90 calculada em diversos PC's por Paiva (Op. citada), serve atualmente de vazão de referência para o processo de outorga na bacia hidrográfica do rio Gramame.

RESULTADOS

Sensibilidade do modelo à densidade dos PP's

As figuras 2 a 4 mostram os gráficos dos indicadores de avaliação da sensibilidade do modelo em função do número de PP's retirados. Percebe-se, em todos os gráficos, uma degradação monótona do indicador à medida que a densidade de postos pluviométricos utilizada para a simulação diminui.

A correlação da série média com a série de referência (não apresentada nos gráficos) segue a mesma tendência, porém com uma variação muito pequena. O menor coeficiente de correlação encontrado foi de 0,984, ou seja, a diminuição do número de PP's não afeta significativamente, em valor médio, a forma do hidrograma.

A média relativa MR_i , representada na Figura 2, permite observar um comportamento de amplitude diferente dependendo do PC considerado. O PC 78, retirando 7 PP's, apresenta um erro médio sobre a vazão média de referência da ordem de 30%, o que é muito significativo. Já os PC's 94, 235 e 327 apresentam valores médios de vazão que variam pouco em relação à simulação de referência, mesmo com o aumento do número de PP's excluídos. Observa-se também nessa figura, que retirando até 3 PP's, os valores médios de vazão simulados se encontram em uma faixa inferior a 10% da vazão média da simulação de referência.

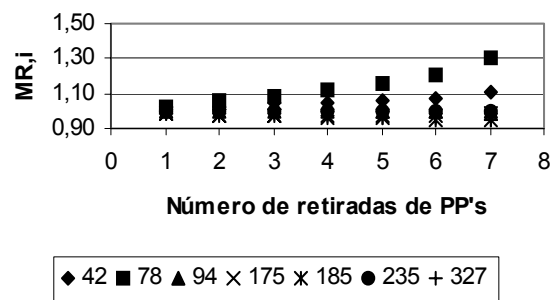


Figura 2 - Média relativa

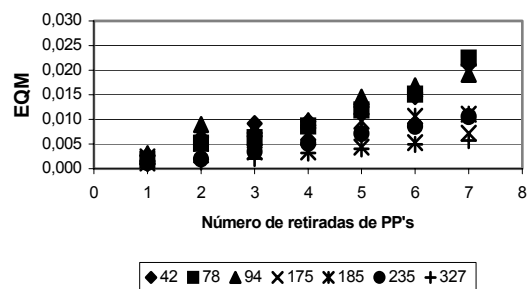


Figura 3 - Erro médio quadrático

A raiz quadrada do erro quadrático médio, EQM, representa a média da distância Euclidiana entre a série média gerada e a série de referência (Figura 3). Desta vez, observa-se que os PC's 78, 42 e 94 apresentam os maiores valores de EQM. Para todos os PC's, o EQM é pequeno com a retirada de

um PP, mas cresce à medida que se retiram mais PP's.

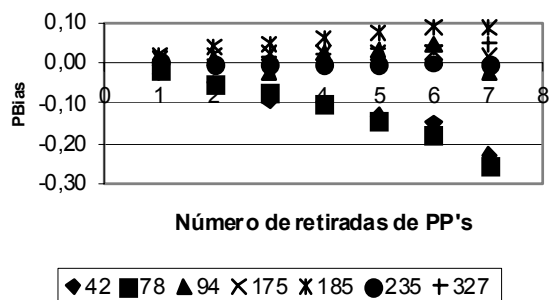


Figura 4 - Pbias

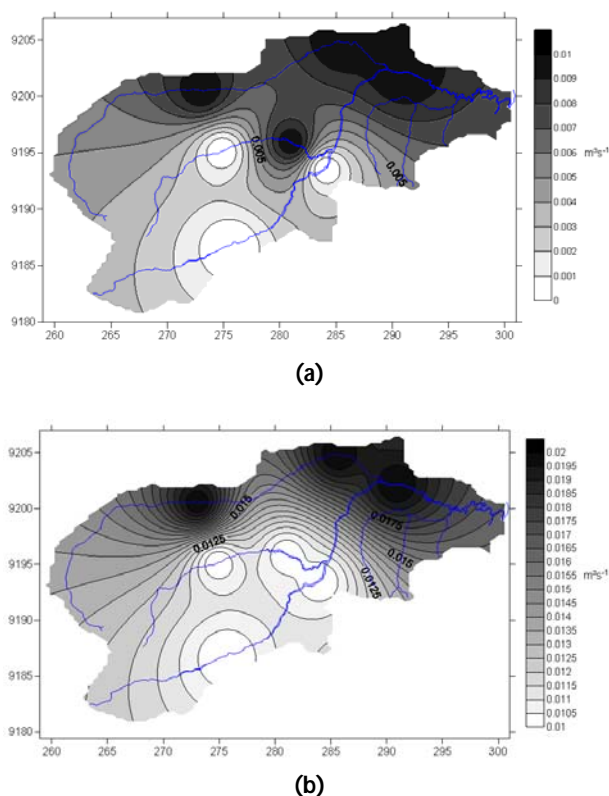


Figura 5 – Mapa distribuição do erro quadrático médio, EQM, para: a) 3 PP's retirados, b) 7 PP's retirados

O erro médio Pbias,i, representado na Figura 4, mostra que em certos PC's (os PC's 42 e 78) a subtração de PP's para a simulação leva a uma superestimação das vazões médias simuladas em relação à vazão de referência. Já nos PC's 175 185 e 327, o oposto ocorre. As séries geradas diminuindo a

densidade dos PP's, subestimam as vazões em relação às vazões da simulação de referência. Quanto ao PC 235, o Pbias permanece próximo a zero. No caso do PC 94, observa-se uma oscilação do valor de Pbias, entre valores positivos e valores negativos. O PC 94 localiza-se no rio Gramame, a jusante a confluência do rio Mumbaba com o rio Gramame e, portanto, reflete o acúmulo dos erros médios dos demais PC's.

Nas figuras 5 (a e b) e 6 (a e b) estão representadas na bacia hidrográfica as distribuições espaciais do EQM e do Pbias, respectivamente. Os resultados são exemplificados para 3 e 7 retiradas de PP's.

Com relação ao EQM3 ou 7 observa-se que na sub-bacia do rio Mumbaba (ver localização na figura 1), tem-se maior sensibilidade à distribuição espacial dos PP's, pois é nesta sub-bacia que se encontram os maiores valores de EQM, tanto com três PP's excluídos como com sete. Já a bacia do rio Gramame, a montante do açude Gramame – Mumbaba, apresenta menor sensibilidade. Todavia, os valores de EQMi(m³/s) são pequenos.

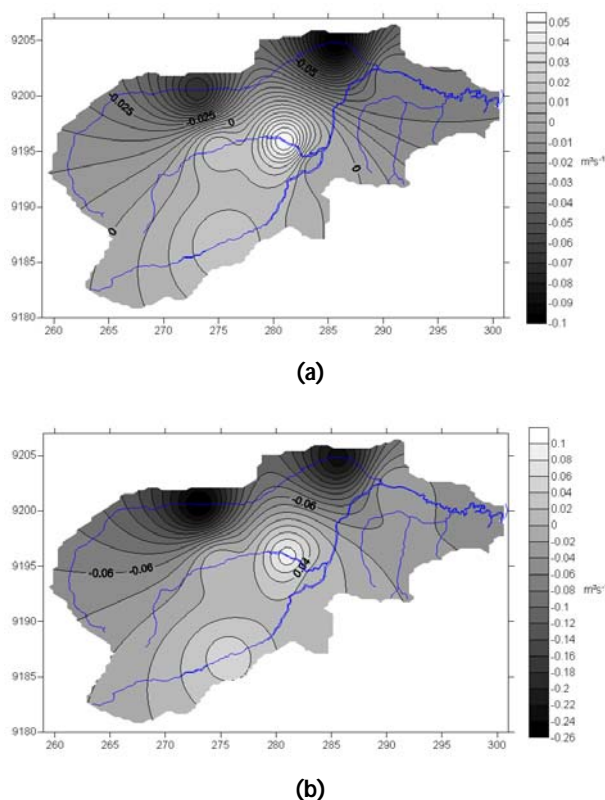


Figura 6– Mapa distribuição do Pbias para: a) 3 PP's retirados, b) 7 PP's retirados

Com relação ao PBias, os valores negativos indicam superestimação dos valores médios das vazões e os valores positivos indicam uma subestimação. Percebe-se que predomina espacialmente a superestimação das vazões médias, na sub-bacia do rio Mumbaba e na porção da bacia do rio Gramame situada a jusante do ponto de confluência do rio Mumbaba com o rio Gramame (PC 94). Uma subestimação das vazões médias ocorre principalmente na bacia do açude Gramame – Mamuaba. Essas observações são válidas tanto para as densidades de PP's que correspondem a três retiradas de PP's como a sete retiradas de PP's.

Os valores de EQMi e de Pbiasi, ambos expressos em m³/s, diferem entre si de uma ordem de grandeza. Ou seja, se os valores de EQMi permanecem sempre pequenos, os valores de Pbiasi já são bastante significativos, principalmente quando se retiram sete PP's. Isso indica que as séries geradas para cada combinação de PP's considerando uma determinada densidade de PP's, devem apresentar variações, ora positivas, ora negativas em relação à série média, justificando a necessidade da análise apresentada a seguir.

Sensibilidade do modelo à variabilidade intradensidade

Na análise da sensibilidade do modelo à variabilidade "intradensidade", observam-se os resultados considerando apenas a densidade oriunda de 3 e 7 retiradas de PP's. Essa escolha é baseada nas análises dos resultados anteriores.

Tabela 2 – Probabilidade de ultrapassar determinada porcentagem do coeficiente de variação, a) para 3 PP's retirados, b) para 7 PP's retirados

<i>(a)</i>							
<i>CV3</i>	<i>PC 42</i>	<i>PC 78</i>	<i>PC 94</i>	<i>PC 175</i>	<i>PC 185</i>	<i>PC 235</i>	<i>PC 327</i>
40%	1%	9%	0%	1%	0%	3%	0%
30%	3%	43%	0%	5%	1%	8%	2%
20%	32%	82%	7%	37%	11%	16%	12%
10%	91%	97%	64%	83%	75%	56%	61%

<i>(b)</i>							
<i>CV7</i>	<i>PC 42</i>	<i>PC 78</i>	<i>PC 94</i>	<i>PC 175</i>	<i>PC 185</i>	<i>PC 235</i>	<i>PC 327</i>
40%	9%	61%	4%	8%	4%	2%	2%
30%	42%	88%	11%	34%	18%	12%	14%
20%	87%	98%	45%	86%	63%	37%	48%
10%	100%	99%	97%	99%	98%	90%	94%

Foram traçadas para as duas densidades de PP's, as curvas de permanência dos parâmetros: CVi,k, EMaxi,k, e EMini,k, expressos em porcentagem. Destas, foram extraídas as probabilidades de ultrapassagem de valores significativos dos parâmetros. São apresentadas nas tabelas 2 (a, b), 3(a, b) e 4(a, b).

Tabela 3 – Probabilidade de ultrapassar determinada porcentagem do erro máximo, a) para 3 PP's retirados, b) para 7 PP's retirados

<i>(a) E.</i>							
<i>Max3</i>	<i>PC 42</i>	<i>PC 78</i>	<i>PC 94</i>	<i>PC 175</i>	<i>PC 185</i>	<i>PC 235</i>	<i>PC 327</i>
100%	1%	41%	0%	5%	0%	1%	0%
80%	5%	60%	0%	14%	0%	3%	1%
60%	25%	82%	1%	33%	5%	6%	1%
40%	72%	97%	12%	56%	26%	19%	12%
20%	99%	99%	81%	83%	80%	55%	46%

<i>(b) E.</i>							
<i>Max7</i>	<i>PC 42</i>	<i>PC 78</i>	<i>PC 94</i>	<i>PC 175</i>	<i>PC 185</i>	<i>PC 235</i>	<i>PC 327</i>
100%	10%	28%	3%	14%	8%	3%	1%
80%	17%	46%	8%	28%	18%	6%	6%
60%	48%	74%	14%	46%	35%	17%	19%
40%	85%	92%	50%	73%	62%	43%	50%
20%	99%	100%	96%	97%	95%	93%	95%

Tabela 4 – Probabilidade de ultrapassar determinada porcentagem do erro mínimo, a) para 3 PP's retirados, b) para 7 PP's retirados

<i>(a) E.</i>							
<i>Min3</i>	<i>PC 42</i>	<i>PC 78</i>	<i>PC 94</i>	<i>PC 175</i>	<i>PC 185</i>	<i>PC 235</i>	<i>PC 327</i>
80%	0%	1%	0%	0%	0%	0%	0%
60%	5%	84%	1%	2%	3%	1%	9%
40%	33%	42%	14%	23%	22%	12%	43%
20%	88%	88%	82%	77%	83%	63%	78%

<i>(b) E.</i>							
<i>Min7</i>	<i>PC 42</i>	<i>PC 78</i>	<i>PC 94</i>	<i>PC 175</i>	<i>PC 185</i>	<i>PC 235</i>	<i>PC 327</i>
80%	0%	27%	0%	2%	1%	0%	1%
60%	38%	66%	8%	51%	32%	14%	20%
40%	84%	90%	60%	93%	78%	51%	80%
20%	99%	99%	98%	99%	99%	97%	98%

Gomes (1985) classifica a variabilidade relativa representada pelo CV como baixa quando o CV é inferior a 10% e alta quando o CV é superior a

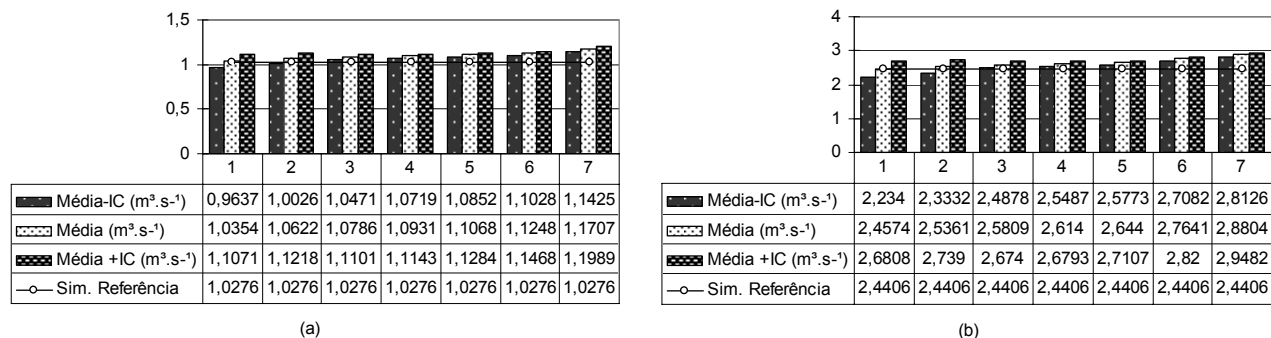


Figura 5 - Q90 e intervalo de confiança retirando-se N postos pluviométricos (N=1...7), para os PC's 042(a) e 094 (b)

30%. Observam-se nas tabelas 2 (a e b) que o coeficiente de variação, CV, apresenta uma probabilidade muito elevada de ultrapassar os 10%, principalmente no caso de simulações com a retirada de 7 PP's. Observam-se, como era esperado, maiores probabilidades de ultrapassar os valores escolhidos (10%, 20%, 30% e 40%) no caso da retirada de 7 PP's. No entanto, para os PC's localizados na bacia do rio Mumbaba (78 e 42) e para o PC 175, localizado no médio curso do rio Mamuaba, as probabilidades de ultrapassar também os valores de 20% (com 3 PP's retirados) e 30% e mesmo 40% (principalmente para o PC 78 com 7 PP's retirados) são também elevadas. A sensibilidade do modelo AÇUMOD à representatividade espacial do campo das precipitações mensais é, portanto, de média a elevada. Já para os PC's com menores bacias de drenagem, a sensibilidade do modelo à representatividade espacial da precipitação é alta, quando se analisam os resultados sob o aspecto do coeficiente de variação.

O erro máximo representa a maior variação relativa positiva em relação ao valor médio. Observam-se nas tabelas 3 (a e b) que, de modo geral, com exceção dos PC's 94, 235 e 327, em mais de 20% dos meses simulados, o valor do Emaxi é superior a 40% no caso de simulações com 3 PP's retirados e superior a 60% no caso de 7 PP's retirados.

Quanto ao erro mínimo, os resultados são similares. O erro mínimo representa a maior variação relativa negativa em relação ao valor médio.

A análise intradensidade feita permite mostrar que a repartição espacial dos postos pluviométricos afeta significativamente os resultados do modelo, porém de forma diferenciada no espaço. Os pontos de cálculo PC's localizados nas porções mais altas da rede de drenagem são muito mais sensíveis à repartição espacial dos postos pluviométricos. Destes, observa-se maior sensibilidade para os pontos

localizados na bacia do rio Mumbaba. Já na bacia do rio Gramame, a sensibilidade é bem menor.

Sensibilidade das curvas de permanência de vazões mensais à representatividade espacial da precipitação

Para cada PC's foram traçados gráficos representando o valor médio do QP (P= 50, 90, 95, 98 e 99) da curva de permanência, associado ao intervalo de confiança com 90% de probabilidade. Nos gráficos, indica-se também sob a forma de uma linha horizontal, o valor de QP para a simulação de referência. Na figura 5, como ilustração, representamos os gráficos dos valores de Q90 para os PC's 042 e 094, porém a análise foi feita sobre todos os gráficos gerados.

O intervalo de confiança é relativamente mais largo para as retiradas de 1 ou 2 PP's, pois o número de combinações possíveis para se efetuar as simulações (ver tabela 1) é bem inferior aos demais casos de retiradas. De forma geral, observa-se que os valores de QP gerados pela simulação de referência se encontram com mais frequência dentro do intervalo de confiança, quanto menor é o valor de P, em outros termos, para Q50 do que para os outros QP. O número de retiradas de PP's a partir do qual, o QP calculado a partir da simulação de referência se encontra fora do intervalo de confiança varia de um PC para o outro, como se vê na tabela 5.

Tabela 5 – Ni - Número de retiradas de PP's a partir do qual, o QP calculado a partir da simulação de referência se encontra fora do intervalo de confiança. (N?Ni)

	Pontos de cálculo – PC's						
	42	78	94	175	185	235	327
Q ₅₀	3	5	6	1	2	6	4
Q ₉₀	3	7	3	2	2	3	2
Q ₉₈	3	7	3	2	1	3	2

Observa-se desta tabela, que é na bacia do rio Mamuaba (PC 175 e PC 185), que se tem maior sensibilidade, pois em todos os casos, retirando-se aleatoriamente dois ou mais PP's, os valores de QP da simulação de referência se encontram fora do intervalo de confiança gerado pelas simulações.

Os valores médios obtidos para QP, retirando i (i = 1,...,7) PP's apresentam-se ora maiores (PC's 42, 94, 235, 327), ora menores (Pc's 175, 185) que o valor homólogo de QP da simulação de referência.

Tabela 6 – Erros percentuais em relação à simulação de referência

Q _p	Número de retiradas de Postos Pluviométricos, N						
	1	2	3	4	5	6	7
Ponto de cálculo 42							
Q ₅₀	0,1	1,9	3,4	3,9	5,1	6,2	10,0
Q ₉₀	0,8	3,4	5,0	6,4	7,7	9,5	13,9
Q ₉₈	0,2	3,2	4,5	5,8	6,7	8,4	12,8
Ponto de cálculo 78							
Q ₅₀	-1,2	1,3	1,5	2,8	6,4	8,8	17,4
Q ₉₀	-1,9	-0,7	-1,7	-1,5	1,2	2,2	11,2
Q ₉₈	-2,4	-2,3	-4,0	-4,4	-2,1	-1,4	7,9
Ponto de cálculo 94							
Q ₅₀	-0,3	1,3	1,1	1,3	1,3	2,8	5,1
Q ₉₀	0,7	3,9	5,7	7,1	8,3	13,3	18,0
Q ₉₈	0,5	6,0	7,9	9,8	11,0	16,7	22,2
Ponto de cálculo 175							
Q ₅₀	-4,0	-6,5	-8,1	-8,3	-9,6	-10,5	-10,1
Q ₉₀	-3,4	-7,3	-9,9	-10,8	-12,5	-14,8	-14,7
Q ₉₈	-4,2	-9,5	-13,0	-14,0	-16,3	-18,7	-18,9
Ponto de cálculo 185							
Q ₅₀	-1,1	-2,6	-3,6	-5,2	-6,7	-8,6	-9,1
Q ₉₀	-1,9	-3,0	-4,7	-7,1	-9,0	-11,9	-13,2
Q ₉₈	-2,3	-4,0	-5,7	-9,0	-11,5	-14,8	-16,3
Ponto de cálculo 235							
Q ₅₀	-0,3	-0,2	0,1	1,2	1,7	3,8	7,0
Q ₉₀	13,8	26,7	35,6	52,2	64,8	82,1	104,0
Q ₉₈	19,4	38,3	52,0	75,7	92,0	115,6	144,0
Ponto de cálculo 327							
Q ₅₀	-1,6	3,6	4,7	11	14,8	19,8	23,3
Q ₉₀	9,1	37,9	47,2	74,0	96,1	118,1	136,8
Q ₉₈	15,1	56,4	68,3	106,0	135,8	163,7	185,3

Os erros percentuais em relação à simulação de referência foram calculados. São, geralmente, maiores para as retiradas de 7 PP's do que para

retiradas de números inferiores de PP's. Chama a atenção também o fato de que, para os PC's 42 e 78, que são situados na bacia do rio Mumbaba, os erros são proporcionalmente maiores para Q90 do que para Q98, o contrário ocorrendo nos outros pontos de cálculo. Os erros percentuais em relação à simulação de referência apresentam valores bastante diferentes no espaço, como se constata da tabela 6.

Os resultados apresentados nesta tabela mostram diversos resultados interessantes: na bacia do rio Mumbaba (PC's 78 e 42, de montante para jusante), o erro relativo em porcentagem é sempre inferior a 10% até a retirada de 6 postos pluviométricos. Os erros positivos indicam também que os valores de QP, diminuindo-se a densidade de postos pluviométricos, são sempre superiores aos valores homólogos da simulação de referência. As curvas de permanência superestimam os valores de vazões de forma crescente quando a densidade de postos pluviométricos decresce, de forma mais acentuada para o PC de montante (PC 078). Na bacia do rio Mamuaba (PC's 175 e 185, de montante para jusante), os erros percentuais permanecem inferiores a 10% até a retirada de 4 postos pluviométricos. Para retiradas maiores o valor aumenta. No caso de Q98, o erro aproxima os 20% quando sete postos pluviométricos são retirados. Os valores dos erros relativos são negativos, indicando que as curvas de permanência subestimam de forma crescente os valores das vazões quando a densidade de postos pluviométricos decresce, de forma mais acentuada também para o PC de montante (PC 175). Na bacia do rio Gramame a montante do reservatório (PC's 327 e 235, de montante para jusante), os erros percentuais sobre Q90 e Q98 são sempre superiores a 10%, qualquer que seja o número de postos pluviométricos retirados. Quando o número de postos pluviométricos excluídos é superior ou igual a 2, os erros percentuais são muito altos. Os erros percentuais positivos indicam que as curvas de permanência superestimam os valores de vazões de forma crescente quando a densidade de postos pluviométricos decresce, isto ocorrendo de forma mais acentuada para o PC de montante (PC 327).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste estudo diversas análises foram efetuadas, a fim de compreender o impacto da representatividade espacial da precipitação sobre curvas de permanência de vazões mensais em diversos pontos distribuídos estrategicamente na bacia hidrográfica

do rio Gramame. A primeira análise consistiu em observar a sensibilidade do modelo à densidade de PP's. Essa análise mostrou que à medida que a densidade diminui, a resposta do modelo em termos dos hidrogramas das vazões mensais, se afasta da simulação de referência. Esse afastamento cresce de forma acentuada para densidades inferiores a um posto para cada 65 km². Esse afastamento também não é uniforme no espaço. Na bacia estudada, a sub-bacia do rio Mumbaba aparece bem mais sensível à representatividade espacial da precipitação do que as demais. Nesta sub-bacia, diminuindo-se seqüencialmente a densidade de postos pluviométricos, superestimam-se as vazões mensais. A bacia do rio Gramame a montante do açude Gramame-Mamuaba, apresenta em média menos erros relativo à simulação de referência. Já na sub-bacia do rio Mamuaba, as vazões mensais são subestimadas em relação à simulação de referência.

Na segunda análise, estudou-se a sensibilidade intradensidade, ou seja, a sensibilidade da resposta do modelo para diversas representatividades espaciais da chuva considerando um mesmo número de postos pluviométricos, ou seja, a mesma densidade de PP's. Essa análise foi feita para as mesmas densidades consideradas no parágrafo anterior, isto é retirando-se seqüencialmente de um até sete PP's em relação à simulação de referência. Através da análise da curva de permanência dos coeficientes de variação, mostrou-se que para todas as densidades a sensibilidade é de média a alta, e que essa sensibilidade cresce à medida que a densidade de postos pluviométricos diminua. No entanto, essa sensibilidade varia no espaço. Mostrou-se que ela é alta nos pontos de cálculo localizados na sub-bacia hidrográfica do rio Mumbaba e no ponto de cálculo localizado no médio curso da sub-bacia do rio Mamuaba. Através da análise do erro relativo ao valor médio espacial, mostrou-se que, na sub-bacia do rio Mumbaba e nos cursos médios dos rios Mamuaba e Gramame, os maiores erros são da ordem de 40% para densidade que corresponde à retirada de três postos pluviométricos e da ordem de 60% para densidade que corresponde à retirada de sete postos pluviométricos. Esses erros máximos ocorrem principalmente nos picos e nos valores mínimos. No entanto, a análise dos coeficientes de correlação de Pearson mostrou que a forma dos hidrogramas se conserva bastante bem em relação à simulação de referência.

A terceira análise foi feita para detectar a sensibilidade da curva de permanência de vazões mensais à repartição espacial da precipitação, já que valores dessa curva de permanência são utilizados

como referência para a outorga do direito de uso dos recursos hídricos. Como era previsto, o estudo mostra que as diferenças em relação à curva de permanência obtida da simulação de referência crescem à medida que a densidade de postos pluviométricos diminui. Observou-se a posição da curva de permanência da simulação de referência em relação ao intervalo de confiança a 90% das curvas de permanência obtidas com as simulações efetuadas variando a densidade de postos pluviométricos através de séries de retiradas aleatórias e seqüenciais de postos pluviométricos. Constatou-se que, sempre, o valor de QP da simulação de referência ficou fora do intervalo de confiança quando se retirou, nas simulações, três ou mais postos pluviométricos. De novo, fica evidente para a bacia do rio Gramame, que a degradação das informações geradas pelo modelo, é grande para uma densidade que corresponde a retiradas acima de dois postos pluviométricos, ou seja, uma densidade de 1 posto pluviométrico para cada 65 km² aproximadamente. Constatou-se também que os valores de QP das simulações efetuadas são subestimados em relação aos valores homólogos da simulação de referência no rio Mamuaba, e superestimados no rio Gramame e no baixo curso do rio Mumbaba. Percebeu-se uma diferença de comportamento das curvas de permanência, em relação ao comportamento dos hidrogramas médios, na bacia do rio Gramame a montante do açude e no alto curso do rio Mumbaba. A análise sobre os erros relativos percentuais das curvas de permanência (acima de 90%) em relação à curva de permanência da simulação de referência mostra que os erros são aceitáveis na sub-bacia do rio Mamuaba, razoáveis na sub-bacia do rio Mumbaba e muito altos na bacia do rio Gramame.

A sensibilidade das curvas de permanência à representatividade da repartição espacial da chuva difere da sensibilidade do modelo hidrológico. Isso se deve provavelmente ao efeito da repartição espacial da precipitação sobre a geração das vazões mais baixas, já que a sensibilidade afeta muito mais as vazões com maiores probabilidades de serem ultrapassadas do que a mediana, por exemplo.

CONCLUSÕES

Neste artigo, analisou-se o efeito da representatividade espacial da precipitação diária sobre a geração da curva de permanência em diversos pontos de uma bacia hidrográfica do litoral nordestino utilizando o modelo hidrológico distribuído AÇU-

MOD. O estudo foi motivado pela constatação de que nas bacias hidrográficas do litoral do Nordeste, a variabilidade espacial da precipitação é muito alta, e vazões de referência baseadas sobre a curva de permanência são utilizadas para a outorga do direito de uso da água. Mostrou-se que a informação gerada pelo modelo se degrada para densidades inferiores a um posto pluviométrico para cada 65 km², situação esta que se observa na maioria das bacias do litoral do Nordeste. Detectou-se também que a sensibilidade do modelo e das curvas de permanência varia no espaço dependendo de como se distribuem espacialmente os postos pluviométricos. Os resultados mostram uma sensibilidade diferente quando se observa o hidrograma mensal ou a curva de permanência. Nas sub-bacias dos rios Mamuaba e Mumbaba, o erro máximo sobre a Q90 sempre foi inferior a 20%, mas apresentou-se bem superior a 100% na bacia do rio Gramame a montante do reservatório que abastece a cidade de João Pessoa. Porém, ao observar os hidrogramas mensais, a menor sensibilidade à repartição espacial da precipitação foi justamente observada na bacia do rio Gramame e a maior na bacia do rio Mumbaba.

Assim, recomenda-se que se procure com urgência melhorar a representatividade espacial da precipitação na região litoral do Nordeste, através da instalação de novos postos pluviométricos, otimizando a sua distribuição espacial, em número e em posição, considerando, entre outros critérios, o efeito sobre as curvas de permanência em pontos de cálculo estratégicos para o desenvolvimento socioeconômico da bacia.. Faz-se também um alerta aos órgãos gestores dos estados nordestinos quanto à incerteza sobre as vazões de referência para a outorga, que podem atingir valores inadmissíveis.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq e à FINEP pelo suporte dado a projetos que vêm possibilitando o desenvolvimento do trabalho na Universidade Federal da Paraíba.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, C. N. Modelagem integrada de recursos hídricos com apoio de um sistema de informações geográficas. 147 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 2006.
- ANDREOLLI, I., COLLISCHONN, W., TUCCI, C. E. M. Análise da rede de postos de chuva na previsão em tempo real na bacia do Rio Uruguai. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 11 (2), p. 5 – 14, 2006.
- FAURES, J. M., GOODRICH, D. C., WOOLHISER, D.A. & SOROOSHIAN, S.. Impact of small-scale rainfall variability on runoff modeling. *Journal of Hydrology*, 173,p. 309-326, 1995.
- GOODRICH, D.C., WHOOLHISER, D.A. & UNKRICH, C.L.. Rainfall-Sampling Impact on Runoff. *Proceedings of Hydraulics/Hydrology of arid lands Int. Symposium. San Diego California, July 30-Aug 2, p.519-524, 1990.*
- GOMES, F. P. Curso de estatística experimental. Piracicaba. Ed. Nobel, 1995.
- KÖPPEN, W.. *Climatología: con un studio de los climas de la tierra. Fondo de Cultura Econômica. México. 478p., 1948.*
- KUCZERA, G. & WILLIAMS, B.J. Effect of Rainfall Errors on Accuracy of Design Flood Estimates. *Water Res. Research.*, 28(4), p. 1145-1153, 1992.
- LEI, J., AND W. SCHILLING. Parameter Uncertainty propagation Analysis for Urban Rainfall Runoff Modelling. *Water Sci. Technol.*, 29(1-2), p. 145-154, 1994.
- LEI, J., AND W. SCHILLING. Systems modeling revisited – verification, confirmation and the role of uncertainty analysis, *Proceedings 3rd International Conference Hydroinformatics 98, Copenhagen, 24-26 August, Balkema, Rotterdam, 1998*
- LOPES, V.L. On the effect of uncertainty in spatial distribution of rainfall on catchment modeling. *Catena*, 28, p. 107-119, 1996.
- MEDEIROS, V. M. A., MOREIRA, L. F. F. & RIGHETTO, A. M.. Análise do efeito da variabilidade espacial da precipitação na modelagem do escoamento numa bacia experimental. *Revista. Brasileira de Recursos Hídricos*, 12(3), p. 129-139, 2007.
- PAIVA, A. E. D. B. Simulações hidrológicas na bacia do rio Gramame com subsídio ao processo de Outorga. *Dissertação de mestrado. Univ. Fed. Da Paraíba, Campina-Grande Brasil. 132p., 2001.*
- PAPPENBERGER, F. & BEVEN, K.J. Ignorance is bliss: or seven reasons not to use uncertainty analysis. *Water Resour. Res.*, 42: 5302, doi:10.1029/ 2005WR004820, 2006.
- PASSERAT DE SILANS, A. M. B., ALMEIDA, C. N., ALBUQUERQUE, D. J. & PAIVA, A. E. D. B. Uma aplicação do modelo hidrológico distribuído AÇUMOD na bacia hidrográfica do rio do Peixe – Paraíba. *Revista. Brasileira de Recursos Hídricos*, 7(4), p. 5-20, 2000.
- RODRIGUES, A. A. & PASSERAT DE SILANS, A.M.B. Metodologia para otimização de rede de monitoramento

pluviométrica baseada na geoestatística: In XV simpósio brasileiro de recursos hídricos, Curitiba. Anais em CD-ROM, 2003.

SILVA, T.C., PAIVA, A.E.D.B., PASSRAT DE SILANS, A.M.B., BILLIB. M. & BOOCHS, P. Planejamento dos recursos hídricos na bacia hidrográfica do rio Gramame, uma bacia litorânea do Nordeste Brasileiro. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, 7(4), p.121-134, 2002.

XAVIER, L.N.R., MAGALHÃES, A. A. A., ROTUNNO FILHO, O.C. Bayesian kriging and GLUE applied to estimation of uncertainty due to precipitation representation in hydrological modelling. In: Predictions in Ungauged Basins: Promise and Progress. IAHS Publication 303, p. 90-98, 2006.

tion curves varies in space, depending on how the rainfall gauges are spatially distributed. But the results show a different sensitivity for both the outputs of the model and the frequency duration curves. In the Mamuaba and Mumbaba rivers, the uncertainty on Q_{90} was always less than 20%. In the upper and middle course of the Gramame river it was more than 100%. However the sensitivity on the flows generated by the model was lower in the Gramame river than in the Mumbaba river.

Keywords: *spatial distribution, precipitation, distributed rainfall-runoff model.*

Impact of Rainfall Spatial Distribution Uncertainty on the Monthly Hydrograms and Monthly Flow Duration Curves Obtained from a Rainfall Runoff Model

ABSTRACT

Great progress has been made in the last decades in the development of hydrologic rainfall-runoff models. Currently, scientists are focusing on how to assess and treat uncertainties related to hydrologic modelling due to the model structure or to the input data errors. This study aims to assess the uncertainty of monthly flows and their duration frequency curves, due to the weak representation of the spatial variability of the rainfall field with the existing rainfall gauges. The flows are generated by the distributed hydrologic model AÇUMOD. The Gramame basin in the northeastern coastal region of Brazil is used to carry out this study because in the past it was equipped with a good rainfall gauge network. This basin is representative of others in the region where the rainfall gauge density is generally much lower. In the simulations, the rainfall gauge density is diminished by subtracting one to seven rainfall gauges sequentially and randomly from the original network. Three complementary analyses are done to assess uncertainty on the frequency duration curve: i) studying the impact of the rainfall gauge density on model output; ii) studying the intradensity impact of the spatial variability of the rainfall gauges field, and, iii) estimating uncertainty on some points of the frequency duration curves. It is shown that the distance between the outputs of the model and the reference flows increases as the rainfall gauge density decreases from the density threshold of one rainfall gauge in 65 km². This situation is generalized in the coastal north-eastern region of Brazil. It is also shown that the sensitivity of the model and of the frequency dura-