



XII SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE

ANÁLISE SOBRE PREENCHIMENTO E EXTENSÃO DE SÉRIES NA DEFINIÇÃO DE VAZÕES CARACTERÍSTICAS PARA FINS DE DISPONIBILIDADE HÍDRICA NA BACIA DO RIO GRANDE

Alexandre Abdalla Araujo¹ ; Saulo Aires de Souza¹ ; Teresa Luisa Lima de Carvalho¹ & Marcos Irineu Pufal¹

RESUMO – O escoamento superficial é um processo complexo influenciado por muitos fatores como topografia, cobertura vegetal, tipo de solo, escoamento subterrâneo, distribuição da precipitação, entre outros. O projeto de sistemas de recursos hídricos e a análise do impacto ambiental requerem muitas vezes a estimativa de vazões e de suas propriedades estatísticas de forma fidedigna. As séries fluviométricas no Brasil, disponibilizadas no sistema HIDRO da ANA, em geral apresentam inúmeras falhas. A aplicação de técnicas estatísticas para preenchimento de falhas e para extensão das séries históricas pode ser uma ferramenta bastante útil nos estudos de recursos hídricos, facilitando o conhecimento do comportamento hidrológico, permitindo assim, um aproveitamento consciente dos recursos hídricos. Os efeitos de preenchimento e extensão foram avaliados em termos de vazões características para fins de disponibilidade hídrica na bacia do rio Grande, localizada entre os estados de SP e MG. A metodologia proposta seguiu o princípio de consideração espaço-temporal e de valorização máxima da informação disponível na bacia. Os resultados obtidos foram satisfatórios, atendendo aos objetivos pretendidos de valorização da informação, e considerando aspectos espaciais e temporais. Destaca-se que foram incorporados às séries alguns eventos extremos significativos que ocorreram no passado e só estavam registrados em poucas estações.

ABSTRACT– Runoff is a complex process influenced by many factors such as topography, vegetation cover, soil type, groundwater flow, rainfall distribution, among others. The design of water resources systems and environmental impact analysis often require the estimation of flow rates and their statistical properties in a reliable manner. The streamflow series in Brazil, available in ANA databases, generally have numerous gaps. The application of statistical techniques for gap filling and extension of time series can be a useful tool in the study of water resources management, facilitating knowledge of the hydrological behavior and thus allowing a conscious use of water resources. Fill effects and extent were evaluated in terms of flow characteristics for purposes of water availability in the Rio Grande basin. The methodology proposed fill and extension followed the principle of time and space considerations and maximum value of the information available in the basin. The results were satisfactory in view of the intended goals of recovery information, and considering spatial and temporal aspect. It is noteworthy that were incorporated into the series some significant extreme events that occurred in the past and were only recorded in a few gauge stations.

Palavras-Chave – Séries Hidrológicas; Preenchimento de Falhas; Bacia do Rio Grande.

1) Agência Nacional de Águas - ANA: Setor Policial, área 5, Quadra 3, Blocos "B", "L", "M" e "T". Brasília-DF CEP: 70610-200, PABX: (61) 2109-5400, (61) 2109-5559. E-mails: alexandre.araujo@ana.gov.br; saulo.souza@ana.gov.br; teresa.carvalho@ana.gov.br; marcos.pufal@ana.gov.br.

1 - INTRODUÇÃO

O escoamento superficial é um processo complexo influenciado por muitos fatores como: topografia, cobertura vegetal, tipo de solo, características do canal, escoamento subterrâneo, distribuição da precipitação entre outros. O projeto de sistemas de recursos hídricos e a análise do impacto ambiental que estes sistemas podem causar requerem muitas vezes a estimativa de vazões e suas propriedades estatísticas de forma fidedigna.

As séries fluviométricas disponibilizadas no Brasil, em geral a partir do sistema de informações hidrológicas HIDRO da Agência Nacional de Águas (ANA), apresentam inúmeras falhas diárias, mensais e anuais, muitas vezes inviabilizando a utilização dessas séries (Oliveira *et al.*, 2010). A existência de falhas nas séries históricas se deve, basicamente, à ausência de observador, falhas nos mecanismos de registro, perda das anotações ou das transcrições dos registros pelos operadores e encerramento das observações e por mudanças de dirigentes políticos do poder Executivo e das políticas de gestão de recursos hídricos, nacionais e estaduais.

Entretanto, como existe a necessidade de se trabalhar com séries contínuas, essas falhas necessitam ser preenchidas (Streck *et al.*, 2009; Bertoni & Tucci, 2007).

A aplicação de técnicas estatísticas no preenchimento de falhas pode ser uma ferramenta útil nos estudos de gestão de recursos hídricos, facilitando o conhecimento do comportamento hidrológico e, permitindo, assim, um aproveitamento consciente dos recursos hídricos (Barnetche & Kobiyama, 2006). Outro ponto a destacar está na representatividade da série, pois a representatividade hidrológica depende principalmente do tamanho da série de vazões disponível, de modo que, em geral, apenas poucas estações dentro de uma bacia apresentam dados relativamente longos que permitam realizar inferências estatísticas confiáveis. Assim, a extensão de séries apresenta inúmeras vantagens, visto que valoriza a informação disponível de modo que sejam incorporados nas análises cenários hidrológicos mais fidedignos e representativos do real comportamento hidrológico da bacia analisada.

A bacia hidrográfica do rio Grande possui razoável cobertura por rede de monitoramento (228 estações fluviométricas com dados), com séries históricas diárias de vazões relativamente longas (superiores a 30 anos). No entanto, observa-se a ausência de alguns períodos, decorrentes da inexistência ou perda de equipamentos e/ou falta de operação dos equipamentos existentes. Os processos de tomada de decisão quanto à regulação dos usos múltiplos dos recursos hídricos pressupõem um bom conhecimento das séries históricas, uma vez que estas possibilitam a determinação de valores críticos de retirada, disponibilidade hídrica sazonal, vazões máximas para obras de controle e vazões ecológicas para manutenção de ecossistemas, segundo estudos estatísticos.

O objetivo deste artigo é avaliar o efeito do preenchimento e da extensão em termos de vazões características para fins de disponibilidade hídrica na bacia do rio Grande. O efeito considerado nas análises corresponderão às diferenças nas principais estatísticas entre as séries originais (com falhas e incompletas) e séries preenchidas/estendidas, como também às magnitudes dos valores obtidos para as vazões características com permanência de 95% (Q95) e vazões mínimas com 7 dias de duração e 10 anos de tempo de retorno (Q7,10), além de se verificar eventuais perdas de variabilidade estatísticas inerente nos processos de reconstituição de séries hidrológicas.

2 – METODOLOGIA

A técnica básica utilizada neste trabalho para preenchimento e extensão das séries de vazões diárias foi a da análise de regressão. Existe um conjunto de métodos estatísticos que visam estudar a associação entre duas ou mais variáveis aleatórias. Dentre tais métodos, a teoria da regressão e correlação ocupa um lugar de destaque por ser a de uso mais difundido.

Para o preenchimento das falhas nas séries históricas, Bertoni e Tucci (2007) recomendam a seleção das estações da mesma região ecoclimática e altitude semelhante, caracterizando-a como hidrológicamente homogênea. Recomendam também que para o preenchimento de falhas nas séries temporais das vazões diárias e das precipitações devem-se escolher, em cada execução, pares de pontos com correlação máxima, definindo uma regressão linear entre os conjuntos de dados, permitindo assim, preencher a falha empregando-se o modelo ajustado.

Na análise de regressão o primeiro objetivo é o de analisar o comportamento simultâneo das variáveis, tomadas duas a duas, verificando se a variação positiva (ou negativa) de uma delas está associada a uma variação positiva (ou negativa) da outra, ou mesmo, se não há nenhuma forma de dependência entre elas.

Uma das dificuldades encontradas para solucionar os problemas de estimativas de séries hidrológicas, consiste em determinar uma função “robusta” que represente, com boa aproximação, o comportamento da série histórica disponível. A escolha de um determinado modelo, como os modelos de regressão, para representação da série hidrológica torna-se difícil, pois esta série representa apenas a realização de um processo que possui componentes estocásticos, caracterizando uma aleatoriedade das afluências. De um modo geral, recomenda-se testar diferentes modelos e, a partir de uma métrica pré-determinada selecionar o modelo mais adequado.

Na metodologia utilizada na seleção do modelo de regressão são considerados aspectos espaços-temporais, cujo desempenho é avaliado de acordo com a parcela da variabilidade explicada pelo modelo testado. Os processos hidrológicos evoluem no tempo e no espaço simultaneamente, de modo que é essencial considerar na modelagem esse comportamento a partir das informações disponíveis. Assim, a metodologia de preenchimento e extensão segue este princípio de análise

espaço-temporal e de valorização máxima da informação disponível, sendo melhor detalhada a partir das seguintes etapas:

1. Selecionam-se as “**n**” estações fluviométricas contidas na bacia que apresentem um tamanho mínimo de dados sem falhas na amostra;
2. Seleciona-se uma estação “**i**” (das **n** estações selecionadas na etapa 1) e avalia-se quais estações “**j**” apresentam um tamanho mínimo de dados comuns. Esta análise, considerando outras estações com diferentes tamanhos, é essencial para consideração espaço-temporal proposta;
3. Para as “**j**” estações que atenderam aos critérios predefinidos de tamanho mínimo da série e tamanho mínimo comum com a estação “**i**” são testados 10 modelos de regressão. Estes modelos estão apresentados na tabela 1, para o ajuste das funções do tipo TOTAL utiliza-se o conjunto total de dados comuns entre a estação que se quer preencher e a estação preenchedora. Já para o ajuste das funções tipo SAZONAL são efetuados o ajuste para cada mês do ano civil que tenha dados comuns entre a estação que se quer preencher e a estação preenchedora. Maiores detalhes da formulação e das técnicas de ajuste podem ser consultados em Naghettini e Pinto (2007);
4. Verifica-se para todas as “**k**” combinações de estações e modelos, $k=j \times p$, onde “**p**” é o número de modelos de regressão, aqueles que atenderam ao critério mínimo de desempenho, critério este expresso por um coeficiente de determinação (r^2) mínimo admissível para aceitação de uma determinada combinação estação-modelo;
5. Ordenam-se as “**k**” combinações de modo decrescente de valores de r^2 , de modo que a primeira combinação seja a que tenha apresentado o melhor ajuste, a segunda combinação seja aquela que tenha apresentado o segundo melhor ajuste e assim sucessivamente;
6. Para cada data diária que se deseja estender ou preencher uma falha da estação “**i**” em análise verifica-se, dentre todas as “**k**” combinações ordenadas, se alguma ou quais delas apresentam valores existentes nessa data e, caso exista pelo menos uma possibilidade, a combinação com melhor desempenho será utilizada na extensão ou no preenchimento do valor para essa data;
7. Repete-se a etapa 2 para todas as outras estações selecionadas para fins de extensão e preenchimento;

Para efetuar as etapas descritas anteriormente foram implementadas diversas rotinas em linguagem de programação JAVA, de modo a que fosse possível automatizar todos os procedimentos necessários. Ressalta-se que essas rotinas ainda estão em desenvolvimento, para que no futuro, possam ser utilizadas pelo usuário a partir de uma interface gráfica amigável.

Tabela 1 – Tipos de Modelos de regressão considerados na metodologia utilizada para preenchimento e extensão de séries diárias de vazões.

MODELOS DE REGRESSÃO
LINEAR TOTAL/SAZONAL
LOGARÍTMICA TOTAL/SAZONAL
EXPONENCIAL TOTAL/SAZONAL
POTENCIAL TOTAL/SAZONAL

3 – RESULTADOS

As informações utilizadas foram obtidas nos bancos de dados da ANA (Hidro) e DAEE-SP. Inicialmente foram consideradas as estações fluviométricas com séries de vazões diárias, totalizando 228 estações na bacia do rio Grande, sendo 166 oriundas da ANA e 62 oriundas do DAEE-SP. A seguir, com base na disponibilidade de dados, conforme pode ser visto na figura 1, foram selecionadas 93 estações a serem preenchidas, sendo 73 estações do Hidro (com no mínimo 30 anos de dados) e 20 estações do DAEE-SP (com no mínimo 20 anos de dados). Essas 93 séries foram preenchidas e estendidas no período de 1930 a 2013 (conforme figura 2) segundo os seguintes critérios:

- Estações do banco ANA: estações preenchedoras com no mínimo 15 anos de dados; no mínimo 15 anos dados comuns sem falha entre a estação a ser preenchida e a estação preenchedora (tanto nos modelos totais quanto nos sazonais) e ajustes com r^2 maior ou igual a 0,5;
- Estações do banco DAEE-SP: estações preenchedoras com no mínimo 15 anos de dados; no mínimo 10 anos dados comuns sem falha entre a estação a ser preenchida e a estação preenchedora (tanto nos modelos totais quanto nos sazonais) e ajustes com r^2 maior ou igual a 0,5.

Observa-se na figura 1a que há um gradiente na disponibilidade de dados no sentido menor quantidade na direção da foz da Bacia do rio Grande. Quando efetuado o preenchimento ocorreu uma homogeneização da disponibilidade de dados de modo que foi possível realizar as análises em uma base comum temporal de dados, conforme ilustrado na figura 1b. Ressalta-se que toda a espacialização apresentada no trabalho, foi realizada por meio de interpolação utilizando a técnica do inverso do quadrado da distância (IDW).

Analisando o desempenho dos ajustes das funções de regressão utilizados no preenchimento/extensão, conforme mostrados na figura 2a, para a média, e 2b, para mediana, do r^2 , verifica-se que em grande parte da bacia os valores de r^2 ficaram acima de 0,8, apresentando poucos locais com desempenho menor 0,7.

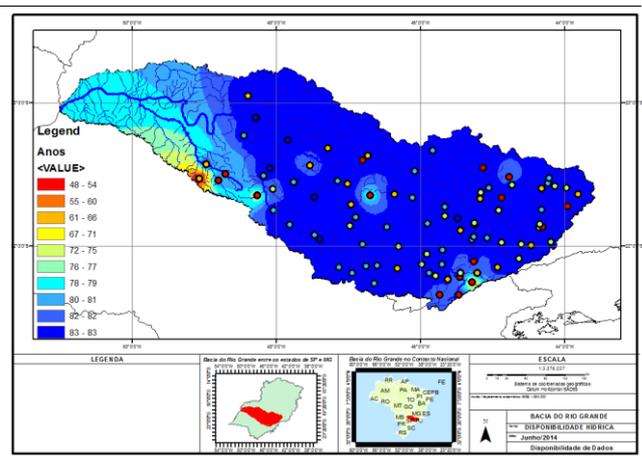
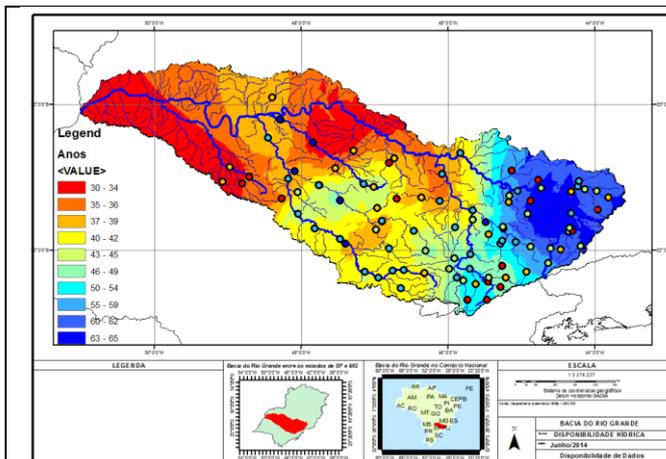


Figura 1a – Disponibilidade de dados (em número de anos) das séries originais.

Figura 1b – Disponibilidade de dados (em número de anos) das preenchidas/estendidas.

Analisando os valores absolutos da q95 específica, figura 3a e 3b, e da q7,10 específica, figura 4a e 4b, verifica-se que de um modo geral os resultados apresentados com a série preenchida/estendida foi similar aos resultado apresentado na série original para as duas vazões características. No entanto, quando avaliados algumas regiões específicas na bacia como por exemplo sua parte central, observa-se algumas diferenças pontuais sugerindo uma maior suavização nos resultados , indicando que o preenchimento/extensão filtra alguns ruídos oriundo de séries com diferentes tamanhos.

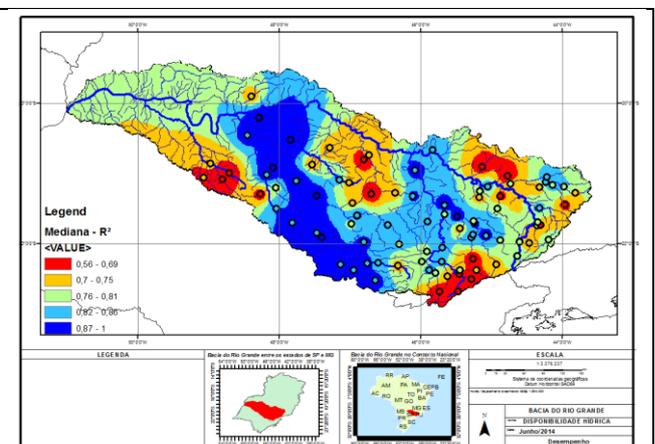
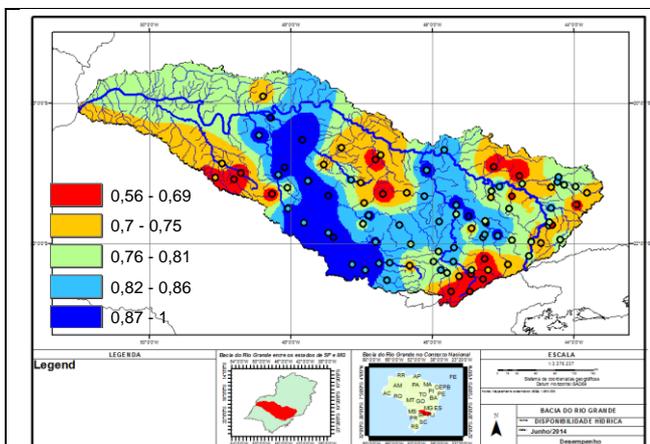


Figura 2a – Média dos R² obtidos dos ajustes das regressões utilizadas no Preenchimento/Extensão.

Figura 2b – Mediana dos R² obtidos dos ajustes das regressões utilizadas no Preenchimento/Extensão.

De modo a caracterizar numericamente as diferenças entre as duas séries, original e a preenchida/estendida, a figura 5 ilustra um diagrama de barras no qual indica para cada estação considerada a diferença percentual entre as q7,10 definida a partir da série original e a definida a partir da série preenchida/estendida. Valores positivos indicam que o preenchimento/extensão aumentou o valor q7,10, ao contrário valores negativos representam uma diminuição da q7,10. Os resultados não apontam nenhuma tendência para super ou sub estimativa, de um modo geral os valores das diferenças ficaram na ordem de $\pm 10\%$.

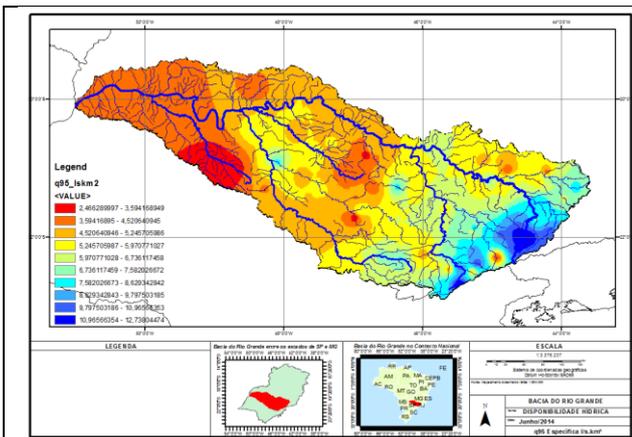


Figura 3a – Vazão específica q95 original

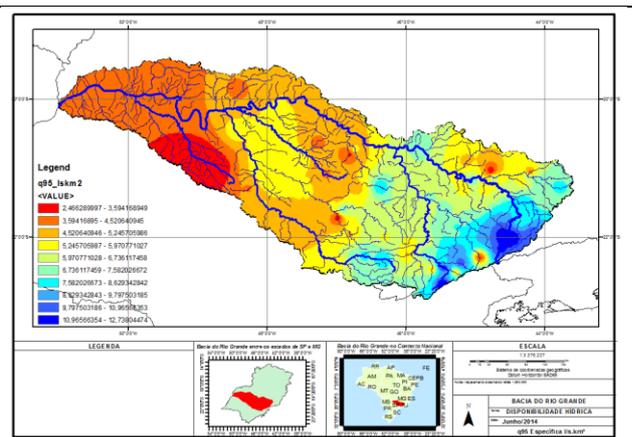


Figura 3b – Vazão específica q95 preenchida/estendida

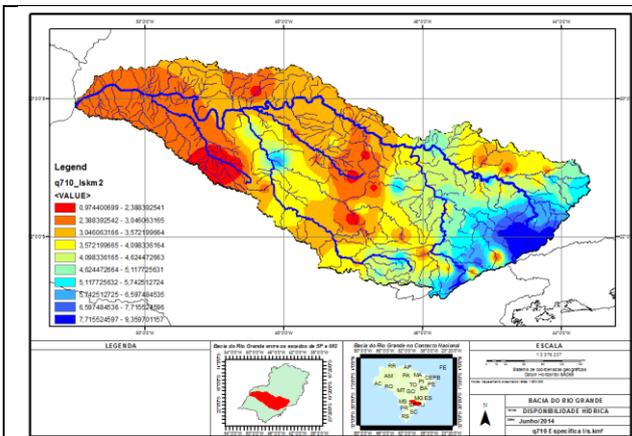


Figura 4a – vazão específica q7_10 original (em l/s/km²).

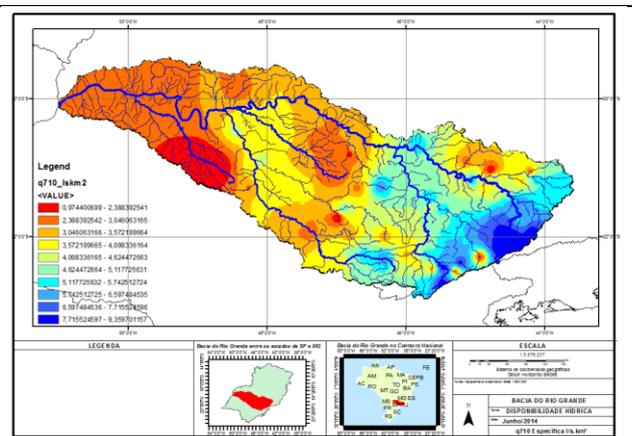


Figura 4b – vazão específica q7_10 preenchida/estendida (em l/s/km²).

As figuras 6a e 6b ilustram uma espacialização das diferenças da q95 e q7,10, respectivamente. Observa-se nas figuras que as diferenças positivas (correspondentes a aumento de vazão na série preenchida/estendida) situam-se nas partes alta e central da bacia, sendo que a parte central apresentou os maiores aumentos. Já na parte mais baixa da bacia, verifica-se uma tendência nos resultados de diminuição das vazões características quando efetuado o preenchimento/extensão em relação a serie original.

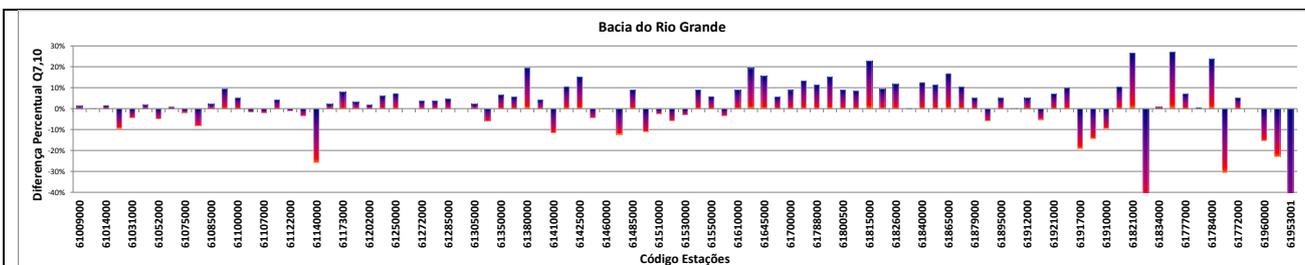


Figura 5 – Diagrama de barras da diferença percentual da q7,10 obtida utilizando a série original e o obtido utilizando a série preenchida/estendida.

Para avaliar a significância estatística das diferenças acima apresentadas foram realizados testes de hipótese estatísticos na média e na variância. Para avaliar as diferenças na média foram

utilizados o teste t de *student* e o teste não paramétrico de Mann-Whitney. Para as diferenças na variância foi utilizado o teste paramétrico F. Para todos os testes a hipótese nula é a de igualdade na média e variância. O nível de significância adotado foi de 1%. Maiores detalhes dos testes realizado podem ser encontrados em Naghettini e Pinto (2007), Aires de Souza (2012, 2013).

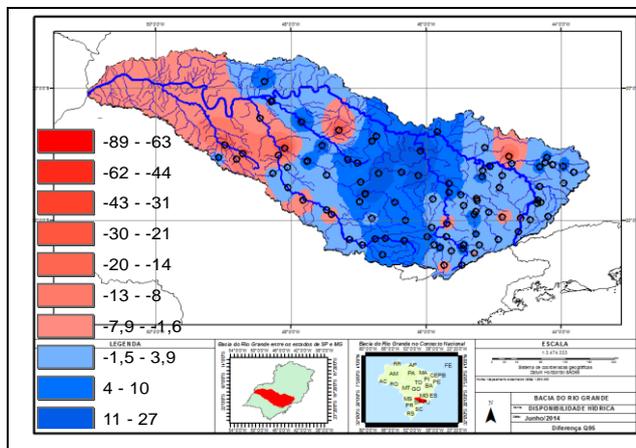


Figura 6a – Espacialização da diferença percentual entre as q95 obtidas utilizando as séries preenchidas/estendidas e as q95 obtidas utilizando as séries originais.

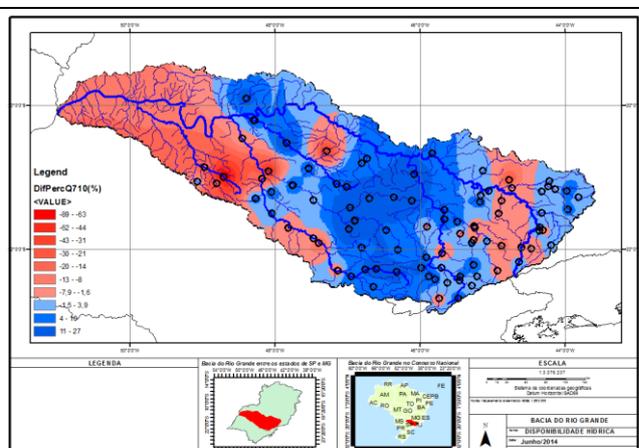


Figura 6b – Espacialização da diferença percentual entre as q7,10 obtidas utilizando as séries preenchidas/estendidas e as q7,10 obtidas utilizando as séries originais.

A tabela 2 apresenta o percentual de resultados não significativos (NS) e significativos (S) para os testes realizados. Com relação às séries que apresentaram mudanças significativas, em 2 das 3 estações no teste t, e em 4 das 5 estações no teste Mann-Whitney, a média das vazões da série preenchida/estendida foi maior que a média da série original. Os resultados sugerem que as mudanças na media e variância de um modo geral são reflexos de flutuações naturais da série, não podendo ser rejeitada a hipótese de que os dois conjuntos de séries (original e preenchida/estendida), sejam oriundos da mesma população.

Tabela 2 – Resultados dos testes de hipótese estatísticos t de student, Mann-Whitney e teste F.			
	Tipo de teste	Não-significativo (NS)	Significativo (S)
	Teste t	96,8% (90 estações)	3,2% (3 estações)
	Mann-Whitney	94,6% (88 estações)	5,4% (5 estações)
	Teste F	93,6% (87 estações)	6,4% (6 estações)

As figuras 7a e 7b ilustram a tendência regional do modelo probabilístico mais adequado para representar as vazões mínimas com 7 dias de duração (Q7). Este mapa foi gerado a partir de interpolação utilizando o inverso do quadrado da distancia (IDW) dos valores categorizados que representavam o tipo de modelo probabilístico escolhido para determinada estação. A seleção dos modelos probabilísticos mais adequados foi obtida por meio de ajuste visual tendo em vista a similaridade encontrada entre os ajustes testados utilizando diferentes distribuições de probabilidade. Ressalta-se que as distribuições consideradas no mapa foram aquelas que não foram

rejeitadas nos testes de aderência Qui-Quadrado (QQ) e Kolmogorv-Smirnov (KS) para todas as estações.

Analisando os resultados das figuras 7a e 7b observa-se que quando são ajustadas as Q7's das séries originais (figura 7a), verifica-se uma diversidade maior de distribuições escolhidas como de melhor ajuste (pelo critério de ajuste visual) do que quando são ajustadas as Q7's utilizando as séries preenchidas/estendidas (figura 7b). Quando o mapa das Q7's das séries originais é comparado ao mapa de disponibilidade de dados das séries originais (apresentado na figura 1a), observa-se que os locais que ocorreram maiores alterações na tipologia das distribuições de probabilidade foram justamente aquelas regiões que apresentavam menores quantidades de dados, notadamente entre as longitudes 46°W e 48°W.

Verifica-se uma forte tendência regional pelas distribuições da família Log-Normal, sugerindo que, num eventual procedimento de regionalização dessas vazões características, essa distribuição possa ser testada como a mais adequada. É importante destacar que os resultados servem mais para avaliar o efeito do preenchimento/extensão em eventuais alterações no comportamento probabilístico das vazões baixas do que propriamente admitir uma curva regional na bacia. É importante destacar que todas as distribuições apresentadas não foram rejeitadas nos testes de aderência aplicados, podendo ser candidatas naturais das Q7's da bacia.

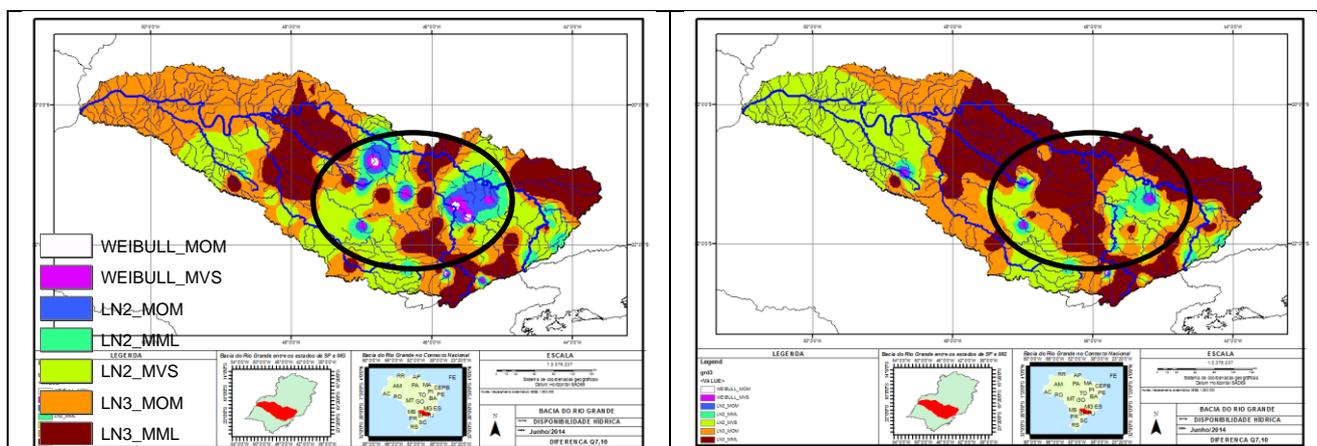


Figura 7a – Mapa das Distribuições de Probabilidade da Q7 do conjunto de séries originais selecionadas por ajuste visual.

Figura 7b – Mapa das Distribuições de Probabilidade da Q7 do conjunto de séries estendidas/preenchidas selecionadas por ajuste visual.

4 – CONCLUSÃO

Os resultados obtidos utilizando a técnica de preenchimento/extensão apresentada foram satisfatórios, principalmente por possibilitar a valorização máxima da informação disponível, considerando aspectos espaciais e temporais. A homogeneização do período possibilitou a extração de vazões características mais robustas, permitindo a obtenção de valores mais consistentes de disponibilidade hídrica, tendo em vista a suavização apresentada nos resultados quando especializados. Outro ponto importante foi a incorporação em grande parte das séries de alguns

eventos extremos significativos que ocorreram no passado e só estavam registrados em poucas estações.

Verificou-se que não houve uma descaracterização do regime probabilístico das vazões baixas em relação a série original, sendo que os resultados tenderam para uma curva regional mais condizente com as características estatísticas mais dominantes na bacia.

Por fim recomenda-se a aplicação da metodologia de preenchimento em outras bacias com carência de informações e um estudo mais detalhado do seu desempenho em relação a outras alternativas, como por exemplo, modelo chuva-vazão. Esta metodologia vem sendo aplicada na bacia do Rio Piranhas-Açu e na bacia do rio Paranapanema.

BIBLIOGRAFIA

Barnetche, D.; Kobiyama, M. 2006. *Aplicação do hycymodel no preenchimento de falhas de monitoramento de vazões*. Geosul, v.21, n.42, p.185-194.

Bertoni J. C.; Tucci, C. E. M. 2007. Precipitação. In: Tucci, C. E. M. *Hidrologia: Ciência e aplicação*. Porto Alegre: UFRGS. p177-241.

Chibana, E.Y.; Flumignan, D.; Mota, R.G.; Vieira, A.S.; Faria, R. T. 2005. *Estimativa de Falhas em Dados Meteorológicos*. In: Congresso Brasileiro de Agroinformática, Londrina. Anais: SBI-AGRO. CD-Rom.

Naghetini, M.; Pinto, E.J.A. 2007. *Hidrologia Estatística*. CPRM (Serviço Geológico do Brasil). Minas Gerais-MG.

Oliveira, L. F. C.; Fioreze, A. P; Medeiros, A. M. M.; Silva, M. A. S 2010. *Comparação de metodologias de preenchimento de falhas de séries históricas de precipitação pluvial anual*. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.14, n.11, p.1186–1192, Campina Grande-PB.

Streck, N. A.; Buriol, G. A.; Heldwein, A. B.; Gabriel, L. F.; Paula, G. M. 2009. *Associação da variabilidade da precipitação pluvial em Santa Maria com a oscilação decadal do Pacífico*. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.44, n.12, p.1553-1561.

Zeilhofer, P.; Lima, E.B.R.; Santos, F. M.; Rigo Júnior, L. O. 2003. *Um ambiente SIG para modelagem integrada da qualidade da água utilizando Qual2e*. Caminhos de Geografia, v.8, n.10, p.107-125.

Aires de Souza, S.; Araujo, A.A.; Tröger, F.H. *Análise de Estacionaridade em séries hidrológicas no local do futuro aproveitamento hidroelétrico São Luiz do Tapajós*. XI Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, 2012.

Aires de Souza, S.; Araujo, A.A.; Tröger, F.H. *Análise de Estacionaridade das séries hidrometeorológicas localizadas na bacia do rio São Francisco*. XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2013.