



DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA OPERACIONAL DE PREVISÃO DE CHEIAS NA BACIA DO TAQUARI-ANTAS / RS

Vinícius Alencar Siqueira^{1} & Ayan Santos Fleischmann² & Walter Collischonn³ & Fernando Mainardi Fan⁴*

Resumo – A previsão hidrológica é uma importante ferramenta para a antecipação de eventos de cheia. O acoplamento de chuva prevista na modelagem hidrológica contribui para a obtenção de maiores antecedências para estes eventos, embora normalmente sejam ampliadas as incertezas associadas ao processo de previsão. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema de previsão de cheias experimental na bacia do Taquari-Antas até a cidade de Encantado/RS, baseado no modelo hidrológico MGB-IPH, bem como um exemplo de sua aplicação. As informações são obtidas em tempo real a partir de estações telemétricas instaladas na bacia, além de dados de precipitação prevista do modelo atmosférico CPTEC / ETA com horizonte de até 7 dias. Apesar de maiores dificuldades em prever a magnitude e tempo de ocorrência de um evento, o sistema apresenta potencial para fornecer uma informação complementar ao sistema de alerta contra enchentes no local.

Palavras-Chave – Previsão de cheias, MGB-IPH, Taquari-Antas.

DEVELOPMENT OF AN OPERATIONAL FLOOD FORECASTING SYSTEM IN TAQUARI-ANTAS BASIN

Abstract – Hydrological forecasting plays an important role for anticipation of flood events. Also, coupling quantitative precipitation forecasts into a hydrological model can be useful in order to extend lead time on such events, although increasing the uncertainty on flood forecasting process. This work presents a development of a flood forecasting system in Taquari-Antas basin up to the city of Encantado/RS, based on MGB-IPH hydrological model, as well as an example of its application. Real time data is obtained directly from telemetric network, including a 7-day precipitation forecast from ETA / CPTEC weather prediction model. Although some difficulties on prediction of peak timing and magnitude of a flood event, the developed system shows some potential to be used as a complementary information for a local flood warning system.

Keywords – Flood Forecasting, MGB-IPH, Taquari-Antas.

INTRODUÇÃO

Dentre os desastres naturais verificados em nível mundial, as inundações surgem como o de maior potencial de impacto na população (UN/ISDR, 2004), sendo responsável por mais de 50% dos eventos ocasionados e por cerca de 5% do número total de mortes (IFRC, 2011). No cenário brasileiro destaca-se a recente criação do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN), operando desde dezembro de 2011 com o objetivo de monitorar o território brasileiro e emitir alertas sobre desastres naturais, com atenção especial para municípios de maior vulnerabilidade a eventos críticos de característica hidrológica (Soler *et al.*, 2013). Nesse sentido,

¹ Instituto de Pesquisas Hidráulicas - IPH/UFRGS. vinisiquera@gmail.com

² Instituto de Pesquisas Hidráulicas - IPH/UFRGS. ayan.fleischmann@gmail.com

³ Instituto de Pesquisas Hidráulicas - IPH/UFRGS. collischonn@iph.ufrgs.br

⁴ Instituto de Pesquisas Hidráulicas - IPH/UFRGS. fernando.fan@bol.com.br

*Autor correspondente: vinisiquera@gmail.com



Sistemas de Alerta contra Cheias (SAC) têm recebido um grande enfoque como mecanismos indispensáveis para a preparação de entidades como a Defesa Civil, uma vez que a identificação antecipada dos eventos permite que medidas vinculadas a planos de emergência possam ser tomadas em tempo adequado.

Um dos elementos que desempenha um papel importante para a emissão dos alertas é a previsão hidrológica. Esta previsão possibilita que informações como o nível ou a vazão do rio sejam conhecidas com certa antecedência ao evento de cheia, o que pode ser feito a partir de medições em pontos situados a montante do local de interesse. Quando o tempo de viagem da onda de cheia é longo entre os locais de medição e de previsão, esta técnica pode fornecer uma boa antecedência ao evento - de alguns dias ou até semanas - simplesmente com base no monitoramento a montante dos níveis do rio. Entretanto, em bacias de característica montanhosa, com relevos acentuados e declividades elevadas, o tempo de deslocamento da cheia pode acabar sendo relativamente curto, o que torna necessária a utilização de um modelo hidrológico acoplado à chuva observada ou até mesmo a previsões quantitativas de precipitação (QPF) para que seja possível estender a antecedência ao evento de cheia.

Apesar do potencial benefício para sistemas de alerta, o uso de previsões de precipitação em aplicações hidrológicas acaba sendo limitado por erros na posição, tempo de ocorrência e quantidade de chuva (Habets *et al.*, 2004), o que por sua vez exige uma interpretação diferenciada nas estimativas futuras de vazão. Neste sentido, este trabalho tem por objetivo apresentar o desenvolvimento de um sistema de previsão de cheias para a bacia do Taquari-Antas até a cidade de Encantado/RS, a partir do acoplamento de QPF no modelo hidrológico MGB-IPH, incluindo a discussão de alguns resultados obtidos através de sua implementação em caráter pré-operacional.

ÁREA DE ESTUDO

A bacia do rio Taquari-Antas localiza-se na região Sul do Brasil entre as latitudes 28° 10' e 29° 57' S e longitudes 49° 56' e 52° 38' W, integrando a região hidrográfica do Atlântico Sudeste conforme a classificação oficial da ANA. Em dimensões territoriais, a bacia possui uma área de drenagem de 26.415 km², sendo que o seu rio principal - o Taquari - percorre uma extensão total de cerca de 530 km até a foz no rio Jacuí. A área de drenagem até o posto fluviométrico de Encantado possui 19.000 km² (Figura 1), o que corresponde a cerca de 70% da área total.

A precipitação anual média na bacia do Taquari-Antas é relativamente bem distribuída ao longo do ano, com variações na faixa entre 1.600 mm a 1.800 mm. Esta região é caracterizada por escoamentos superficiais rápidos e bruscas variações de vazão, cuja ocorrência é atribuída a fatores como rede de drenagem densa com tendência radial, declividade média elevada, pouca profundidade e baixa permeabilidade dos solos. Tais características acarretam em cheias com situação de inundação desde a confluência dos rios das Antas e Carreiro, no município de São Valentim do Sul, até a foz no rio Jacuí, sendo o trecho mais crítico localizado entre os municípios de Encantado e Bom Retiro do Sul (DRH/SEMA, 2011).

Desde o ano de 2003 a UNIVATES, em parceria com a AHSUL, já vem realizando o monitoramento da bacia e realizando previsões através do SPAE - Sistema de Previsão e Alerta contra Enchentes (Both *et al.*, 2008). Além disso, recentemente foi implementado o Sistema de Alerta Controle de Enchentes - SACE/CPRM (Chagas *et al.*, 2014), para o qual é feito o monitoramento de chuva e nível através da rede telemétrica instalada e o acompanhamento de informações de chuva prevista a partir do CPTEC/INPE. São utilizados modelos de previsão baseados em regressão múltipla e calibrados a partir da velocidade de propagação de cheias históricas e a distância entre diferentes pontos de medição. Além disso, o sistema emite boletins



com os resultados da previsão, com até 24 horas de antecedência, para os agentes envolvidos (CEMADEN, CENAD e ANA) e disponibiliza ao público em geral. A situação dos níveis do rio pode ser acompanhada através do próprio *website* (<<http://www.cprm.gov.br/sace/#>>), indicando limiares de referência para algumas estações.

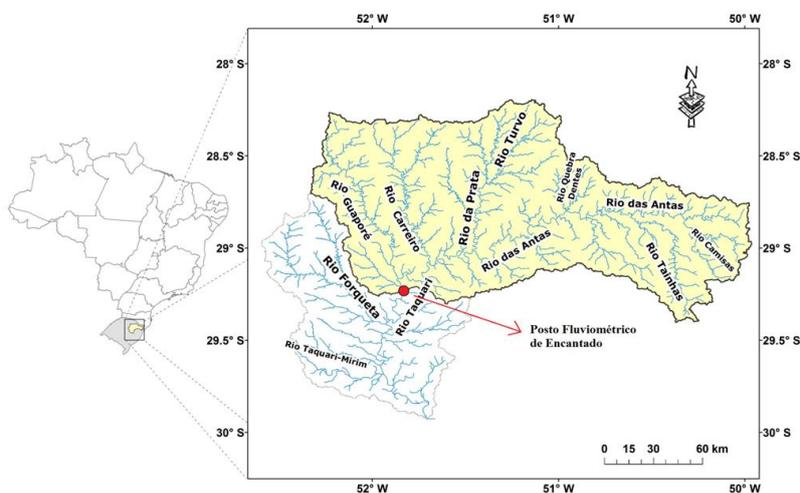


Figura 1. Localização da bacia do Taquari-Antas / RS e o ponto para onde são realizadas as previsões.

No presente estudo, a cidade de Encantado foi selecionada para a previsão devido a esta ser a localidade mais a jusante com existência de dados de vazão, uma vez que após a confluência entre os rios Taquari e Forqueta há uma influência da barragem-eclusa de Bom Retiro do Sul. Além disso, a antecedência que pode ser obtida para esta cidade com base no monitoramento dos níveis a montante é curta (em torno de 6 horas), o que pode dificultar ações de emergência por parte da Defesa Civil local.

DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE PREVISÃO

Modelo Hidrológico MGB-IPH

Para o desenvolvimento do sistema experimental de previsão de cheias foi selecionado o Modelo de Grandes Bacias - MGB-IPH (Collischonn e Tucci, 2001), um modelo hidrológico conceitual distribuído e composto de módulos específicos que representam matematicamente os processos físicos que ocorrem na bacia hidrográfica. Este modelo, amplamente aplicado nos estudos envolvendo bacias na região da América do Sul incluindo a própria bacia do Taquari-Antas (Collischonn e Tucci, 2001; Larentis *et al.*, 2008), tem sido utilizado em trabalhos relacionados à previsão de vazões afluentes a reservatórios no contexto hidrelétrico brasileiro (e.g. Fan *et al.*, 2012), o que motivou sua adaptação para a previsão especificamente de eventos de cheia.

O tratamento da variabilidade espacial das características físicas da bacia dentro do modelo é feito através de uma discretização na forma de minibacias e determinação de áreas com comportamento hidrológico similar, denominadas Unidades de Resposta Hidrológica (URHs). O modelo faz o uso de reservatórios conceituais lineares para representar o balanço vertical no interior de cada minibacia e a propagação nos trechos de rio ocorre através do método de Muskingum-Cunge (Tucci, 1998), cujos parâmetros são calculados com base nos dados de comprimento, declividade, rugosidade e largura média da seção transversal.

A calibração do modelo pode ser efetuada de forma manual ou automática, sendo os índices de avaliação de desempenho geralmente dados pelo coeficiente de Nash-Sutcliffe, o Logaritmo de



Nash-Sutcliffe e o Erro de Volume. Detalhes adicionais sobre o MGB-IPH podem ser encontrados no trabalho de Collischonn e Tucci (2001).

Previsões Quantitativas de Precipitação - Modelo ETA / CPTEC

As previsões de precipitação utilizadas para acoplamento no MGB-IPH são provenientes do modelo atmosférico ETA. Este modelo, de grade regular, possui um domínio que cobre toda a América do Sul (escala regional) e uma de suas principais características é a representação das equações primitivas através de uma coordenada vertical, a qual exerce uma influência importante em regiões de orografia complexa a exemplo da Cordilheira dos Andes (Chou *et al.*, 2005). A versão operacional do modelo ETA utilizada no presente estudo possui resolução horizontal de 15 km (versão SISMADEEN), a qual fornece previsões com horizonte de até 168 horas (7 dias) e frequência a cada 12 horas (00 e 12 UTC). Usualmente, as condições iniciais são obtidas a partir da análise proveniente do NCEP, enquanto que as condições de contorno laterais são fornecidas pelo modelo global CPTEC, atualizadas a cada 6 horas. Além disso, a resolução temporal do modelo é de 3 horas, ou seja, a precipitação é fornecida de forma acumulada de 3 em 3 horas.

Estrutura para aquisição e processamento de informações

O sistema experimental de previsão de cheias foi estruturado de maneira similar ao sistema apresentado por Fan *et al.* (2012), sendo a interface gráfica integrada a um Sistema de Informações Geográficas (SIG) denominado *MapWindow GIS* (Ames *et al.*, 2008). Neste sistema de previsão, o modelo MGB-IPH é configurado para trabalhar com informações em intervalo de tempo horário, uma vez que os hidrogramas de cheia na bacia do Taquari-Antas podem ocorrer de maneira rápida e não ser adequadamente representados em intervalo de tempo diário.

Através de uma operação interativa na própria interface gráfica, as informações hidrológicas em intervalo de tempo horário são obtidas a partir de instituições que efetuam monitoramento em tempo real na bacia do Taquari-Antas, sendo estas a CPRM, para dados de precipitação e níveis do rio Taquari, UNIVATES e INMET, apenas para precipitação, e CERAN (Companhia Energética do Rio das Antas), para dados de vazão defluente nas usinas hidrelétricas. Estas informações são rearranjadas em um formato padrão e acopladas a uma base de dados existente, a qual é particularmente importante para fornecer ao modelo MGB-IPH uma condição inicial do volume de água armazenado na bacia no momento imediatamente anterior à previsão.

No sistema de previsão experimental, a condição inicial é fornecida através de uma simulação ou "aquecimento" inicial do modelo realizada para um período de 6 meses anterior à previsão. Para tanto, os dados de chuva observada oriundos da base de dados existente são espacializados (Figura 2) para os centróides de cada unidade elementar do modelo (minibacia) através de um procedimento de interpolação dos postos, o qual é dado pelo método do inverso da distância ao quadrado. Além disso, os dados de vazão observados na defluência das usinas hidrelétricas 14 de Julho, Monte Claro e Castro Alves são utilizados durante a simulação para substituição da vazão calculada nestes locais, cuja finalidade é a redução de erros ocasionados por incertezas associadas aos dados de entrada e ao processo de simulação hidrológica.

Os dados de nível obtidos da rede telemétrica da CPRM são convertidos para vazão a partir das curvas-chave correspondentes, o que permite a avaliação preliminar da vazão simulada com o modelo hidrológico. As informações de precipitação prevista do modelo ETA são obtidas em formato de grade diretamente via *download* do *ftp* do CPTEC, sendo posteriormente compatibilizadas no tempo e no espaço e finalmente acopladas ao modelo MGB-IPH. O procedimento de interpolação ocorre da mesma forma que a chuva observada, fazendo-se o uso do

método do inverso ao quadrado da distância em relação a pontos da grade próximos ao centróide da minibacia. Em função da resolução temporal de 3 horas do modelo ETA, é assumido que a chuva acumulada ocorre de maneira uniforme durante este intervalo, ou seja, 1/3 do total para cada hora de forma adequar-se ao passo de tempo utilizado no modelo hidrológico.

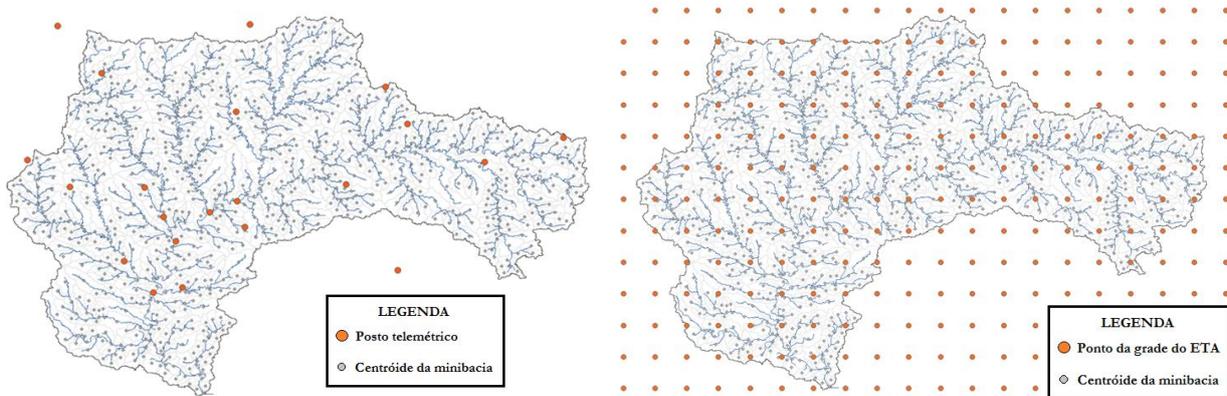


Figura 2. Espacialização das informações de precipitação da rede telemétrica (à esquerda) e da grade da chuva prevista do modelo ETA (à direita) para a bacia do Taquari-Antas.

Após o pré-processamento dos dados de chuva e vazão, estes são acoplados ao MGB-IPH para realização da previsão propriamente dita. A precipitação prevista para 7 dias à frente é combinada à precipitação observada, gerando a estimativa futura de vazão para este mesmo horizonte de tempo. Os resultados da previsão podem ser verificados através de gráficos diretamente na interface do *MapWindow GIS*, conforme mostrado na Figura 3. A seguir, estão apresentados os resultados da calibração e verificação do modelo hidrológico na bacia do Taquari-Antas, além de um resultado obtido durante a sua operação experimental.

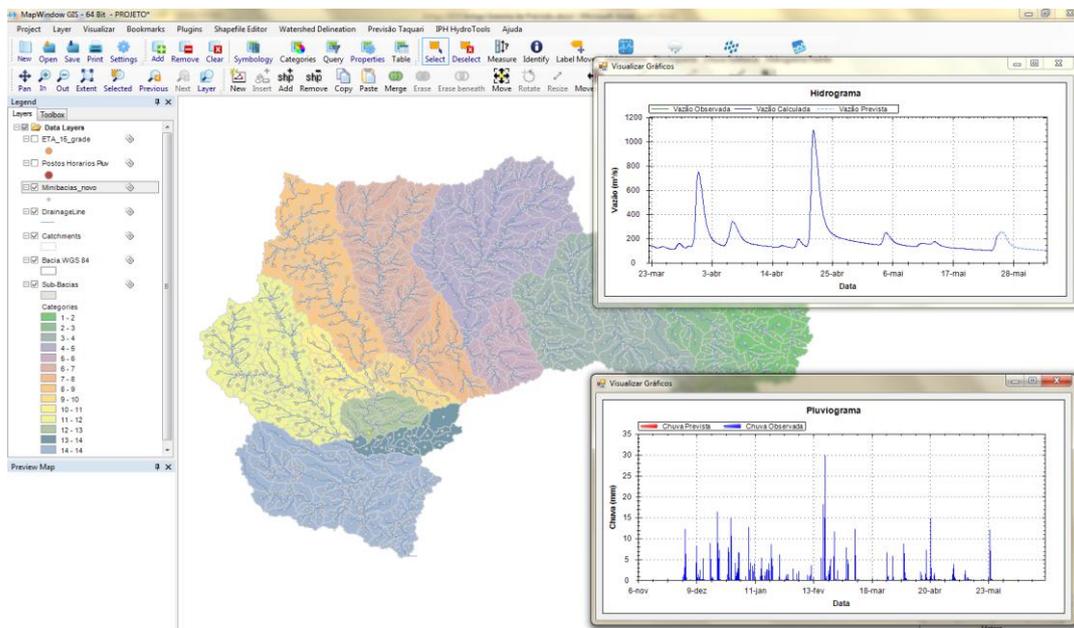


Figura 3. Interface gráfica do sistema de previsão experimental para a bacia do Taquari-Antas / RS.

RESULTADOS PRELIMINARES



O período de calibração do MGB-IPH ocorreu entre Jun/2009 a Dez/2011, enquanto que a verificação do modelo ocorreu entre Jan/2012 e Dez/2013. De uma maneira geral, os índices de desempenho tiveram um bom resultado na bacia do Taquari-Antas durante a calibração. Apesar do erro de volume ter sido razoável, variando entre 9 a 15%, os coeficientes de Nash-Sutcliffe podem ser considerados bons para o período, os quais foram em sua grande maioria superiores a 0,85. Quanto ao período adotado para a verificação do modelo, entre Jan/2012 e Dez/2013, as medidas estatísticas foram de uma maneira geral melhores em relação ao erro de volume, porém um pouco piores em relação aos índices NS e NSLog. De qualquer forma, os valores destes índices de desempenho ainda permaneceram bons para Encantado, ficando muito próximo ou acima de 0,8.

Para a visualização dos resultados do sistema de previsão experimental, foram inicialmente adotados alguns limiares específicos de maneira a estabelecer uma referência para vazões elevadas no rio Taquari. Para estes limiares foram adotadas as cotas de atenção, alerta e inundação do Sistema de Alerta Contra Enchentes (SACE-CPRM) para a cidade de Encantado, devidamente convertidas para valores de vazão através da curva-chave associada ao posto fluviométrico no local (telemetria). Além disso, adotou-se um limiar adicional referente à vazão com TR de 5 anos, cujo nível do rio Taquari já acarreta em inundações na área urbana da cidade.

As Figuras 4 a 6 apresentam os hidrogramas observados (em azul) e previstos (em preto) para a cheia de 20/10/2014, no posto fluviométrico de Encantado. Os níveis de referência estão mostrados nas cores amarelo, laranja, vermelho e violeta, respectivamente para os limiares de atenção (2.010 m³/s), alerta (3.910 m³/s), inundação (4.650 m³/s) e TR de 5 anos (7.950 m³/s). Os resultados compreendem as previsões realizadas entre os dias 14/10 e 17/10, sendo que o pico observado atingiu aproximadamente 6.000 m³/s às 18:00 no dia 19 de outubro, com uma variação de 5.500 m³/s em cerca de 2,5 dias. Em termos de elevação de nível do rio Taquari, este se encontrava na medição 11,3 m na régua do posto fluviométrico de Encantado, em torno de 9 metros acima do nível considerado normal, no instante de ocorrência do pico.

Durante as previsões realizadas, pode-se observar que não houve uma boa previsibilidade tanto em termos de instante de ocorrência como magnitude do evento de cheia, uma vez que existiu uma grande incerteza associada às previsões de precipitação para as estimativas de vazão. Nas previsões dos dias 14/10 às 12h e 15/10 às 00h (Figura 4), nota-se que a vazão prevista para o pico foi muito próxima do valor observado, porém a forma do hidrograma previsto era de um evento de característica mais rápida em relação ao ocorrido, subestimando o volume total da cheia em questão.

Já na previsão iniciada nos dias 15/10 às 12h e 16/10 às 00h (Figura 5), pode ser inicialmente verificada uma forma similar ao hidrograma observado porém com maior atraso na ocorrência do pico, enquanto que posteriormente o formato assumiu novamente uma cheia mais rápida e a vazão acabou sendo superestimada com magnitude superior ao limiar de TR = 5 anos. Por fim, na previsão dos dias 16/10 às 12h e 17/10 às 00h, as vazões previstas acabam diminuindo e no primeiro caso chegaram a tangenciar o limiar de alerta, sendo que na sequência passaram a exceder ligeiramente o limiar de inundação.

De maneira geral, apesar dos erros introduzidos pela incerteza nas previsões meteorológicas sobre a modelagem hidrológica, é possível observar que neste evento houve uma certa concordância entre as consecutivas previsões quanto à superação dos limiares superiores (alerta e inundação), o que em uma situação prática indicaria uma maior confiabilidade em um provável evento de cheia. No que se refere à magnitude, as vazões variaram entre 4.000 e 9.000 m³/s ao longo do horizonte de previsão, sendo em alguns casos bastante próximas à vazão observada no pico. Já em relação à ocorrência do evento, as previsões foram caracterizadas por um atraso no instante de pico, não representando adequadamente a ascensão do hidrograma de cheia.

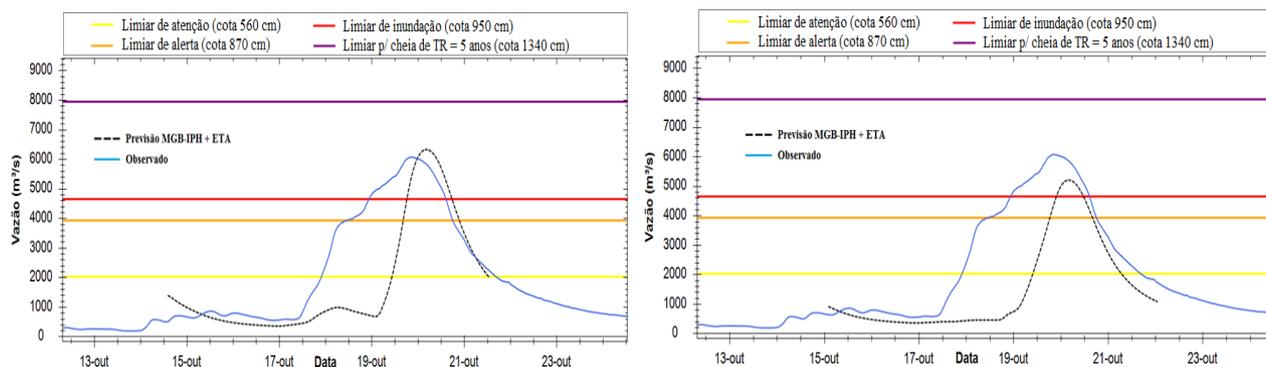


Figura 4. Previsões iniciadas nos dias 14/10 às 12h e 15/10 às 00h, para o evento observado no dia 19/10/2014.

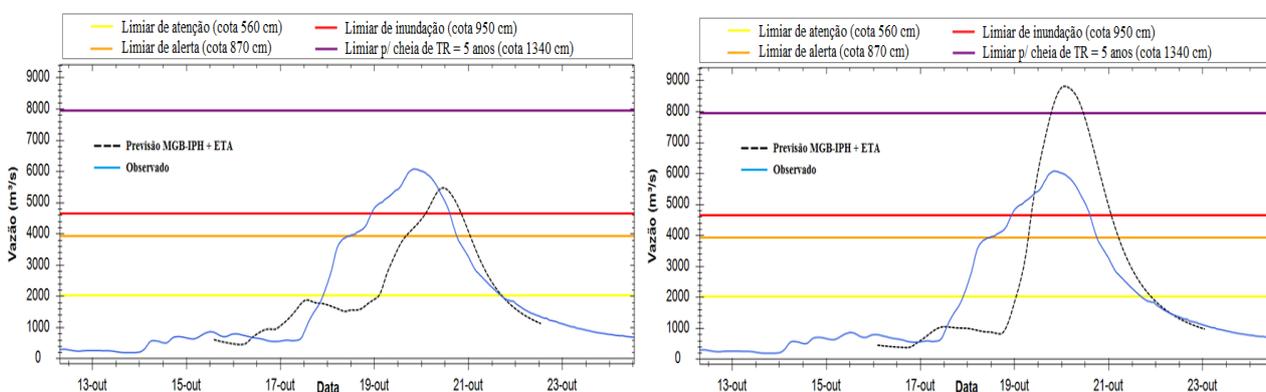


Figura 5. Previsões iniciadas no dia 15/10, às 12h e 16/10 às 00h, para o evento observado no dia 19/10/2014.

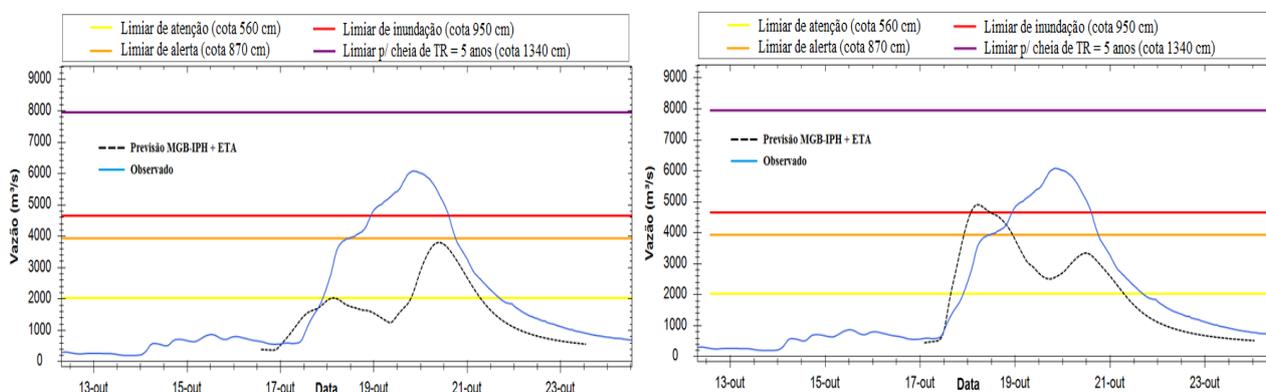


Figura 6. Previsões iniciadas no dia 16/10 às 12h e 17/10 às 00h, para o evento observado no dia 19/10/2014.

CONCLUSÃO

Neste trabalho foi demonstrado o desenvolvimento de um sistema de previsão de cheias para a bacia do Taquari-Antas / RS além de um exemplo de aplicação em caráter pré-operacional. Apesar de grandes incertezas associadas a maiores antecedências da previsão, principalmente quando a chuva prevista é incorporada em um modelo hidrológico, um aspecto interessante acaba sendo a avaliação de diversas previsões consecutivas, podendo haver uma persistência na superação de um limiar de referência, como por exemplo, de inundação. Esta informação pode servir de forma complementar ao sistema de alerta contra enchentes na bacia, contribuindo para a melhoria da preparação da Defesa Civil e demais agentes envolvidos com o problema de inundações.



AGRADECIMENTOS

Os autores do trabalho agradecem à SEDEC/MI pelo financiamento da pesquisa, além de todas as instituições e profissionais envolvidos da CPRM, UNIVATES, INMET, CERAN e CPTEC/INPE, pela disponibilização de dados necessários para o desenvolvimento e funcionamento do sistema de previsão em caráter experimental.

REFERÊNCIAS

- AMES, D. P., C. MICHAELIS, A. ANSELMO, L. CHEN, AND H. DUNSFORD, 2008. MapWindow GIS. In: *Encyclopedia of GIS*. New York, Sashi Shekhar and Hui Xiong (eds). Springer, p. 633-634.
- BOTH, G. C.; HAETINGER, C.; FERREIRA, E. R.; DIEDRICH, V. L.; AZAMBUJA, J. L. F. (2008). Uso da modelagem matemática para a previsão de enchentes no Vale do Taquari –RS. In: *Anais do VI Simpósio de Engenharia Ambiental*, Serra Negra/SP, 2008
- CHAGAS, A.; CASTILHO, A. S.; PEDROLLO, M.; GERMANO, A.; SOTERIO, P. (2014) The Warning Flood System in Taquari River Basin. In: *6th International Conference on Flood Management*, São Paulo, September, 2014.
- CHOU, S. C.; BUSTAMANTE, J. F.; GOMES, J. L. (2005) Evaluation of Eta Model seasonal precipitation forecasts over South America. *Nonlinear Processes in Geophysics*, Vol. 12, p. 537–555
- COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. (2001). Simulação hidrológica de grandes bacias. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Vol. 6, nº 1, p. 95-118.
- DRH/SEMA (2011). *Plano de Bacia do Taquari-Antas*. Secretaria Estadual do Meio Ambiente. Estado do Rio Grande do Sul.
- FAN, F. M.; PONTES, P. R. M. ; COLLISCHONN, W. ; BELTRAME, L. F. S (2012) Sistema de Previsão de Vazões para as Bacias dos Rios Taquari-Antas e Pelotas. In: *XI Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste*, 2012, João Pessoa PB, 2012.
- HABETS, F.; LEMOIGNE, P.; NOILHAN, J. (2004) On the utility of operational precipitation forecasts to served as input for streamflow forecasting. *Journal of Hydrology*, Vol. 293, p. 270-288.
- IFRC (2011). *World Disasters Report 2010, Focus on urban risk*. International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies, Editor: Denis McClean, Lyons, France, 214 p.
- LARENTIS, D. G.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. (2008). Simulação da Qualidade de Água em Grandes Bacias: Rio Taquari-Antas, RS. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Vol. 13, nº 3, p. 5-22.
- SOLER, L. S. *et al.* (2013). Challenges and perspectives of innovative digital ecosystems designed to monitor and warn natural disasters in Brazil. In: *Proceedings of the Fifth International Conference on Management of Emergent Digital EcoSystems*, p. 254-261.
- TUCCI, C. E. M. (1998). *Modelos Hidrológicos*. 1ª edição. ABRH: Porto Alegre, 669 p.
- UN/ISDR (2004). *Guidelines for Reducing Flood Losses*. Editor: Paul J. Pilon, 79 p.