

## **Simulação hidrodinâmica integrada rio-planície em ambiente SIG: aplicação ao Rio Aquidauana**

Adriano Rolim da Paz  
Walter Collischonn  
Carlos Eduardo Morelli Tucci

Instituto de Pesquisas Hidráulicas – IPH/UFRGS  
Av. Bento Gonçalves, 9500 - Caixa Postal 15029  
91501-970 - Porto Alegre - RS, Brasil  
adrianorpaz@yahoo.com.br  
{collischonn, tucci}@iph.ufrgs.br

**Resumo.** O comportamento hidrológico-hidrodinâmico constitui um dos principais fatores governantes do funcionamento de vários ecossistemas e, portanto, sua representação matemática é fundamental para diversos estudos ecológicos, além do gerenciamento e planejamento dos recursos hídricos. Diversas metodologias têm sido empregadas para simular o escoamento em rios. Entretanto, rios com extensas planícies de inundação demandam por uma metodologia de representação matemática mais específica, devido à ocorrência de importantes trocas de água entre rio e planície e ao surgimento de fluxos secundários na planície. Os rios da bacia do Alto Paraguai, na região do Pantanal, apresentam esse tipo de comportamento. Este artigo apresenta uma metodologia de modelagem integrada rio-planície constituída pela combinação de um modelo hidrodinâmico unidimensional aplicado à calha principal do rio e um modelo tipo raster aplicado à planície. Tal metodologia foi aplicada ao Rio Aquidauana, entre os postos fluviométricos de Aquidauana e Porto Ciríaco. Foi simulado o período de dezembro de 1999 a maio de 2000, sendo obtidos resultados interessantes, como o abatimento do hidrograma de montante para jusante da ordem aproximada do observado e a permanência do hidrograma em Porto Ciríaco em um determinado patamar. A propagação da mancha de inundação ao longo da planície, representando fluxos secundários ao escoamento principal, foi simulada com o modelo raster.

**Palavras-chave:** planície de inundação, modelagem hidrodinâmica, modelagem hidrológica, perdas laterais.

**Abstract.** The hydrology and hydrodynamics constitute some of the main governing factors of ecosystem functioning and thus its mathematical representation plays a key role to ecological studies and to water resources planning and management. Several methodologies have been applied to streamflow simulation. However, rivers with large floodplains need a more specific mathematical methodology to represent them, owing to occurrence of huge volumes of water exchanged between main channel and floodplain and appearance of secondary fluxes in the floodplain. Rivers in the Upper Paraguay River Basin, in the Pantanal region, present such hydrologic pattern. This paper presents a methodology to integrated modeling of main channel and floodplain. The proposed methodology consists of combining a one-dimensional hydrodynamic model applied to the main channel and a raster-based model applied to the floodplain. Such methodology was applied to Aquidauana River, in the river reach between the river gauging stations of Aquidauana and Porto Ciriaco. The time period from december/1999 to may/2000 was simulated and interesting results were achieved, such as the hydrograph falling from upstream to downstream closely to the observed values and the occurrence of a kind of maximum discharge in the hydrograph at Porto Ciriaco river section. Flood extent propagation along the floodplain was simulated by the raster-based model, representing the secondary fluxes independently of the main river flux.

**Key-words:** floodplain, hydrodynamic modeling, hydrologic modeling, lateral exchanges.

## 1. Introdução

Em rios com extensas planícies de inundação, o regime hidrológico-hidrodinâmico constitui um dos principais fatores governantes do funcionamento de todo o ecossistema, influenciando processos ecológicos, biológicos, químicos e físicos. O transporte de sedimentos, a deposição de nutrientes nas planícies após a passagem da cheia, a criação de áreas alagadas na planície onde algumas espécies de peixes depositam seus ovos e o transporte de sementes de espécies da flora são apenas alguns exemplos de como o comportamento hidrológico pode afetar o ecossistema (Postel e Richter, 2003). Por isso, representar e simular matematicamente o regime hidrológico e a hidrodinâmica do rio e planície de inundação têm grande valia para conhecer e representar todo o funcionamento do ecossistema e dos processos envolvidos.

Diversas metodologias têm sido empregadas para representar matematicamente o escoamento em rios com planícies de inundação. A abordagem mais simples é a simulação do com algum método unidimensional (1D) representando a planície através de áreas de armazenamento ou adotando seções compostas (Cunge, 1980). A alternativa mais complexa pode ser considerada como a aplicação de métodos hidrodinâmicos bi ou tridimensionais (2D ou 3D). Dependendo dos objetivos do estudo e das características do sistema modelado, as trocas de volume de água entre a calha principal e as planícies demandam por uma abordagem que represente adequadamente esse processo. Enquanto métodos 1D não representam tais trocas, a aplicação de modelos hidrodinâmicos 2D ou 3D ao sistema rio-planície pode ser problemática devido à complexidade da topografia da planície, profundidades muito rasas e problemas de secagem/inundação (Werner, 2004; Gillan et al., 2005; Bates et al., 2005; Bates e De Roo, 2000).

Rios onde ocorrem extravasamentos laterais durante as cheias e retorno parcial do volume de água para o canal constituem um exemplo de situação onde a abordagem 1D pode não ser satisfatória. Os rios da bacia do Alto Paraguai, na região do Pantanal, apresentam esse comportamento. Bravo et al. (in press) estimaram para os trechos de rio no Pantanal trocas de água entre a calha principal e a planície envolvendo volumes consideráveis. Por exemplo, no caso do rio Paraguai entre Amolar e São Francisco os volumes trocados entre rio e planície podem equivaler a um aporte de até  $1.000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ .

Uma abordagem alternativa consiste no emprego de modelos de células (ou celas), os quais representam a planície por células interconectadas formando uma rede bidimensional no plano horizontal (Cunge, 1980; Villanueva, 1998; Miguez e Mascarenhas, 1999). A limitação dessa metodologia consiste principalmente em não representar os fluxos secundários que podem surgir na planície e que são independentes do fluxo principal no canal. Aproveitando-

se do intenso desenvolvimento das técnicas e ferramentas de geoprocessamento e dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG), bem como da crescente disponibilidade de dados obtidos via sensoriamento remoto, foram desenvolvidos modelos que utilizam uma grade retangular para representar toda a planície. São os modelos tipo raster (Bates e De Roo, 2000; Hunter et al., 2005; Bates et al., 2005), que basicamente podem ser considerados como uma ampliação e generalização do modelo de células. Os elementos da planície se comunicam com o canal principal do rio, que é por sua vez simulado por algum método 1D. A abordagem raster permite uma melhor representação da variabilidade espacial das características da planície, como topografia e coeficiente de resistência ao escoamento, e produz resultados de grande aplicabilidade, como mapas de inundação da planície (Horritt e Bates, 2001), sendo facilmente integráveis a um ambiente SIG.

Neste artigo, é descrita a aplicação de um modelo hidrodinâmico 1D acoplado a um modelo hidrológico de planície tipo raster ao trecho do Rio Aquidauana entre os postos fluviométricos de Aquidauana e Porto Ciríaco.

## 2. Objetivo

O objetivo da pesquisa descrita neste artigo é a representação do comportamento hidrológico do Rio Aquidauana entre Aquidauana e Porto Ciríaco, incluindo a inundação da planície, usando integração de modelo hidrodinâmico 1D para a calha principal e modelo tipo raster para a planície, em um ambiente de SIG.

## 3. Material e Métodos

### 3.1 Modelo hidrodinâmico unidimensional IPH4

A simulação do escoamento na calha principal do rio foi realizada com o modelo hidrodinâmico unidimensional IPH4, desenvolvido no Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH-UFRGS) (Tucci, 1978, 1998). Tal modelo resolve as equações completas de Saint Venant (**Equações 1 e 2**) usando um método de diferenças finitas, com um esquema implícito resolvido por um processo de eliminação de Gauss modificado.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{b} \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial h}{\partial x} + gA(S_f - S_0) = 0 \quad (2)$$

onde:  $h$  é o nível da água;  $t$  é o tempo de cálculo;  $Q$  é a vazão;  $x$  é a distância ao longo do comprimento longitudinal do rio;  $b$  é a largura da seção transversal;  $A$  é a área da seção transversal;  $g$  é a aceleração da gravidade;  $S_f$  é a declividade da linha de energia;  $S_0$  a declividade do fundo do canal; e  $q$  representa o somatório das vazões trocadas com a planície no trecho.

O modelo hidrodinâmico é aplicado apenas ao escoamento principal que segue na calha principal do rio e, portanto, a largura  $b$  e a área  $A$  se referem à seção transversal tomando apenas a calha principal do rio.

### 3.2 Modelagem tipo raster

Enquanto modelos de células identificam áreas específicas a serem representadas individualmente por células (**Figura 1-a**), modelos de planície de inundação que utilizam uma abordagem raster dividem toda a planície em elementos retangulares (**Figura 1-b**). Tais

elementos são interconectados, havendo troca de volumes de água entre elementos vizinhos e entre elementos da planície e trechos da calha principal. O rio é simulado pelo modelo 1D descrito no item anterior e não ocupa elementos do raster da planície, seguindo abordagem proposta por Horritt e Bates (2001). Assume-se um nível de água horizontal em cada elemento, cuja variação de volume é função do balanço de vazões trocadas (Bates e De Roo, 2000). O balanço de volume pode ser alterado para incluir outras entradas e saídas de água, tais como precipitação, evapotranspiração e infiltração no solo. Nesta pesquisa, um elemento da planície pode trocar vazões com seus quatro vizinhos e com o rio (calha principal, simulada com modelo 1D), de forma que a equação da continuidade é dada por:

$$\frac{\partial V}{\partial t} = Q_{\text{topo}} + Q_{\text{bai}} + Q_{\text{esq}} + Q_{\text{dir}} + Q_{\text{rio-plan}}, \quad (3)$$

onde:  $V$  é o volume de água;  $t$  é o tempo;  $Q_{\text{topo}}$ ,  $Q_{\text{bai}}$ ,  $Q_{\text{esq}}$  e  $Q_{\text{dir}}$  são as vazões trocadas com os elementos vizinhos situados acima, abaixo, à esquerda e à direita, respectivamente, do elemento analisado;  $Q_{\text{rio-plan}}$  é a vazão trocada com o rio.

Foi utilizada uma discretização numérica explícita no tempo e do tipo progressiva no espaço, onde o nível da água em cada elemento é representado no seu centro e as vazões trocadas com os elementos vizinhos são referidas às correspondentes interfaces (**Figura 1-c**):

$$\frac{{}^{t+\Delta t}h^{i,j} - {}^th^{i,j}}{\Delta t} = \frac{{}^tQ_x^{i-1,j} - {}^tQ_x^{i,j} + {}^tQ_y^{i,j-1} - {}^tQ_y^{i,j}}{\Delta x \Delta y}, \quad (4)$$

onde  ${}^th^{i,j}$  é a profundidade do nível da água no elemento  $(i,j)$  no instante  $t$ ;  $Q_x^{i,j}$  é a vazão trocada na direção  $x$  entre o elemento  $(i,j)$  e o elemento  $(i+1,j)$ ;  $Q_y^{i,j}$  é a vazão trocada na direção  $y$  entre o elemento  $(i,j)$  e o elemento  $(i, j+1)$ ;  $\Delta t$  é o passo de tempo de cálculo;  $\Delta x$  e  $\Delta y$  são os espaçamentos nas direções  $x$  e  $y$ , respectivamente.

A vazão trocada entre dois elementos pode ser calculada empregando equações de resistência ao escoamento, como Chèzy e Manning, ou equações de vertedor ou de orifício, por exemplo. Neste trabalho empregou-se a equação de Manning, com uma discretização numérica no tempo e no espaço da seguinte forma:

$${}^tQ_x^{i,j} = \pm \frac{{}^th_{\text{fluxo}}^{5/3}}{n^{i,j}} \left( \frac{|{}^th^{i,j} - {}^th^{i+1,j}|}{\Delta x} \right)^{1/2} \cdot \Delta y, \quad (5)$$

onde  $n^{i,j}$  é o coeficiente de Manning no elemento  $(i,j)$  e  ${}^th_{\text{fluxo}}$  é a profundidade disponível para escoamento entre os elementos  $(i,j)$  e  $(i+1,j)$  no instante  $t$ , entre os quais a vazão  $Q_x^{i,j}$  está sendo calculada. A profundidade  $h_{\text{fluxo}}$  é definida como sendo a diferença entre o maior dos níveis d'água dos dois elementos e a maior elevação do fundo (**Figura 1-d**). As vazões na direção  $y$  são calculadas de forma análoga às vazões na direção  $x$ .

Para este estudo, empregou-se um modelo tipo raster desenvolvido em linguagem Visual Fortran, o qual permite uma fácil integração com os planos de informação de entrada (MNT, coeficiente de Manning, nível de água inicial) em um ambiente SIG. Além de gerar resultados na forma raster contendo níveis da água e vazões calculados em cada elemento ao final da simulação, foi inserido um módulo no modelo que permite a visualização durante a simulação da evolução da mancha de inundação na planície e do nível d'água no rio (**Figura 2**).

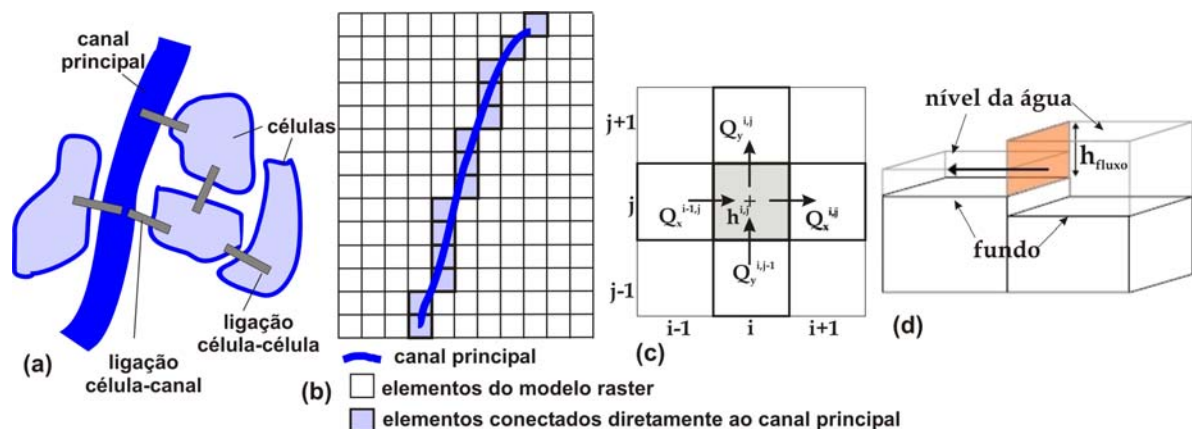


Figura 1 – Esquema da integração de modelo 1D para rio com modelo de células (a) e modelo tipo raster (b) para a planície de inundação; (c) representação das vazões de entrada e saída do elemento (i,j) do modelo de planície tipo raster; (d) representação da profundidade disponível para escoamento ( $h_{fluxo}$ ) entre dois elementos (Fonte: item d = adaptado de Bates et al., 2005).

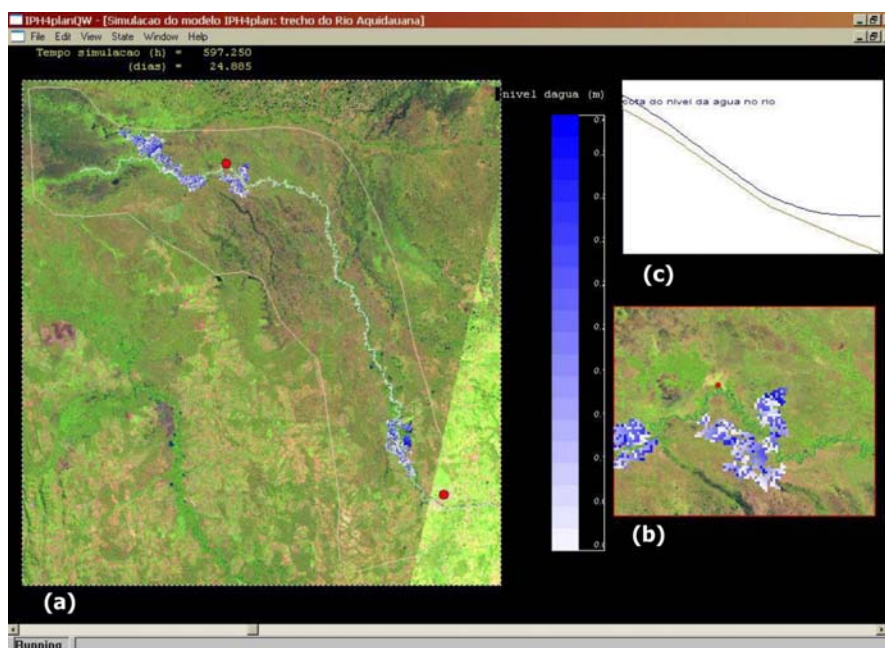


Figura 2 – Tela de saída do sistema acoplado modelo hidrodinâmico IPH4 e modelo de planície, atualizada em tempo real de simulação: (a) composição colorida R3G4B5 do trecho de rio simulado sobre a qual são traçados os elementos da planície com água, na escala de cores apresentada ao lado; (b) zoom da imagem (a); (c) perfil longitudinal do fundo do rio e do nível d'água.

### 3.3 Acoplamento dos modelos de rio (hidrodinâmico) e de planície (raster)

O acoplamento do modelo hidrodinâmico 1D (modelo IPH4) com o modelo tipo raster de planície segue o esquema mostrado na **Figura 3**, sendo constituído por duas etapas principais. A primeira etapa consiste em inicializar os modelos de rio e de planície e caracterizar as ligações entre os sistemas rio e planície. A ligação entre o rio e a planície é caracterizada por: (a) definição do equacionamento matemático e correspondentes parâmetros para o cálculo do volume trocado; (b) identificação dos elementos da planície conectados ao rio.

Considera-se que todos os elementos da malha numérica da planície situados sob o eixo da calha principal do rio têm conexão com este, ou seja, por meio deles poderá ocorrer troca de volume de água entre os dois sistemas. No sistema computacional descrito neste estudo, o procedimento de identificação da ligação entre rio e planície é feito de forma automatizada, utilizando informações georreferenciadas da localização do rio e da planície e com base na discretização espacial de ambos os sistemas. A discretização espacial do rio normalmente é superior à resolução do modelo raster, de modo que conectado a um determinado trecho de rio existirão diversos elementos da planície. Portanto, é necessária a determinação do nível da água no rio em posições intermediárias às seções de cálculo, referentes a cada elemento da planície conectado àquele trecho. Para este estudo, adotou-se uma aproximação linear a partir dos níveis da água nas seções de montante e de jusante.

A integração dos dois modelos é realizada de forma defasada no tempo, sendo essa defasagem igual ao passo de tempo de cálculo do rio ( $dt_{RIO}$ ). Simula-se o escoamento na calha principal com o modelo de rio por  $1 dt_{RIO}$ . Em seguida simula-se o modelo de planície  $np$  vezes até completar  $1 dt_{RIO}$  ( $np = dt_{RIO}/dt_{PLAN}$ ) – por questões de estabilidade numérica, o passo de tempo de cálculo da planície é adotado com um valor bem inferior ao do rio. A existência da defasagem reside no fato de que, em ambos os modelos, são utilizadas as vazões trocadas entre rio e planície calculadas para o instante de tempo anterior ( $t-1$ ). Ao final das simulações do rio e da planície no instante  $t$ , são calculadas as novas vazões de troca entre os dois sistemas.

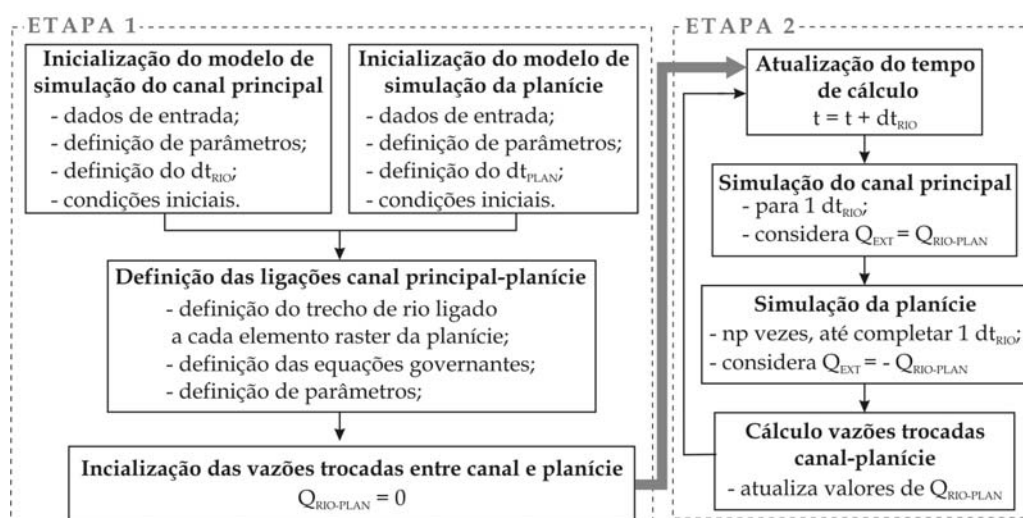


Figura 3 – Fluxograma da simulação integrada dos modelos de rio e de planície.

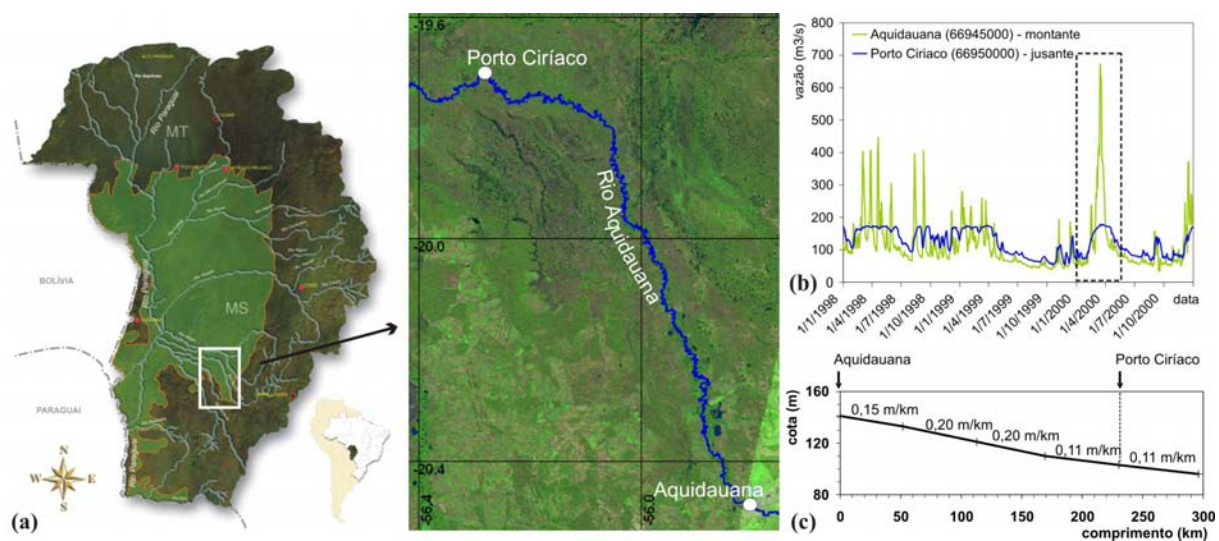
### 3.4 Estudo de caso: Rio Aquidauana

O modelo hidrodinâmico IPH4 acoplado ao modelo raster de planície foi aplicado ao Rio Aquidauana, no trecho compreendido entre os postos fluviométricos de Aquidauana (código 66945000 na ANA) e Porto Ciríaco (66950000) (Figura 4-a), cuja extensão é de cerca de 230 km. As seções transversais em tais postos foram obtidas da Hidroweb/ANA, e as cotas ajustadas inicialmente seguindo referencial recomendado em ANA/GEF/PNUMA/OEA (2005). O trecho entre os postos de Aquidauana e Porto Ciríaco foi discretizado em 49 sub-trechos de aproximadamente 4.700 m cada, sendo as seções intermediárias interpoladas linearmente a partir das seções de montante e jusante. Para evitar efeito de contorno de jusante, o trecho do Rio Aquidauana simulado foi estendido cerca de 66 km além do posto Porto Ciríaco, usando a mesma discretização espacial. A seção correspondente ao posto Aquidauana foi tomada como condição de contorno de montante, sendo fornecidos os

dados de vazão observada ao modelo hidrodinâmico. Como condição de contorno de jusante foi adotada uma relação entre nível d'água e vazão na forma da equação de Manning.

Pela metodologia proposta, o modelo hidrodinâmico 1D propaga o escoamento no rio tomando como seção transversal apenas a calha principal do rio. A planície é representada no modelo raster, sendo empregado MNT obtido pelo sensor *Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM-90), cuja resolução espacial é de 90 m para a região da América do Sul e disponibilizado gratuitamente através do *CGIAR-CSI GeoPortal* (CGIAR-CSI, 2005). O MNT do SRTM-90 foi reamostrado para a resolução de 200 m (0,002°), sendo essa a discretização espacial adotada para o modelo de planície. Tomando como base o MNT, foram adotadas declividades para os trechos de rio variando de 0,20 m.km<sup>-1</sup> a 0,11 m.km<sup>-1</sup>, estimadas com base no MNT (**Figura 4-c**). O passo de tempo de cálculo para o modelo hidrodinâmico foi de 15 minutos, enquanto no modelo de planície o passo de tempo foi de 2 s. Tal passo de tempo para a planície foi necessariamente pequeno para evitar instabilidades numéricas. Uma abordagem diferente seria a adoção de um passo de tempo adaptativo, a partir da condição de estabilidade numérica de Courant-Freidrichs-Levy (Cunge, 1980), como proposto por Hunter et al. (2005).

Os hidrogramas observados em Aquidauana e Porto Ciriaco no período de jan/1998 a dez/2000 (**Figura 4-b**), obtidos da HidroWeb/ANA, ilustram o quanto ocorre amortecimento nas vazões de cheia propagadas no trecho em questão, devido ao extravasamento da calha principal do rio e inundação da planície. Neste estudo, foi simulado um período de 145 dias, de 28 de dezembro de 1999 a 20 de maio de 2000 (linha pontilhada na **Figura 4-b**).



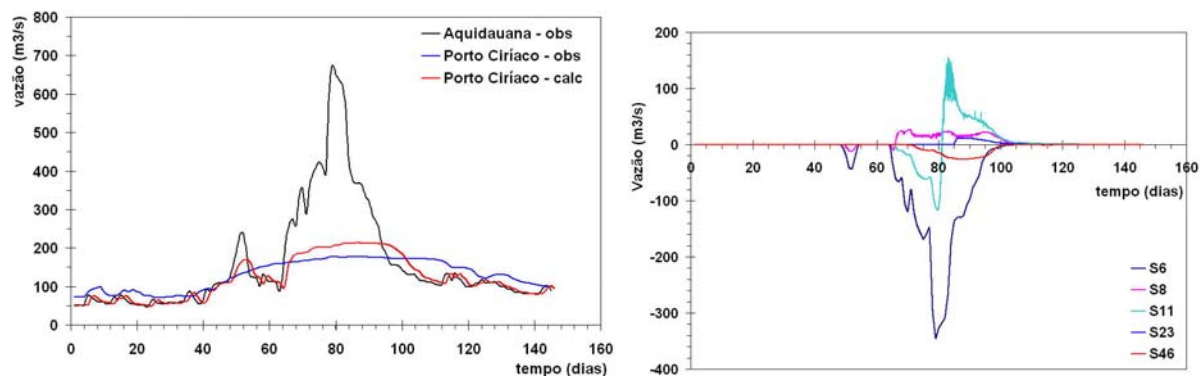
**Figura 4 – (a) Localização do estudo de caso: Rio Aquidauana, entre Aquidauana e Porto Ciriaco (fonte: <http://www.ana.gov.br/gefap>); (b) Vazões observadas em tais postos no período de jan/1998 a dez/2000 (o retângulo pontilhado indica o período usado para simulação); (c) Perfil longitudinal do Rio Aquidauana representado no modelo hidrodinâmico 1D.**

#### 4. Resultados e Discussão

O hidrograma calculado em Porto Ciriaco é apresentado na **Figura 5-a**, bem como o hidrograma observado na mesma seção e no posto Aquidauana, que é a condição de contorno de montante. Embora os hidrogramas calculado e observado não estejam tão próximos entre si como desejado ao simular um trecho de rio qualquer, é importante ressaltar que o comportamento diferenciado do Rio Aquidauana (comum no Pantanal) foi relativamente bem representado. O grande abatimento no hidrograma de montante foi representado, e a vazão

calculada em Porto Ciríaco alcançou um patamar em cerca de  $210 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . No hidrograma observado, tal patamar ocorre em  $180 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Pode-se levantar a hipótese de que se a relação entre as cotas utilizadas para caracterizar as seções transversais do rio e as cotas do MNT da planície fossem melhor ajustadas entre si, seria possível reduzir o patamar das vazões máximas em Porto Ciríaco e o hidrograma calculado teria uma forma mais aproximada do observado.

Na **Figura 5-b** são apresentadas as vazões trocadas entre o rio e a planície, para algumas seções transversais do rio (vazão lateral por unidade de comprimento do rio integrada para vazão total; cada trecho de rio é referido pela seção de montante). Interessante destacar que diferentes comportamentos ocorreram na integração entre o rio e a planície: trechos onde predomina a perda de água do rio para a planície (por exemplo: S6 e S46); trechos onde predomina o ganho de água da planície para o rio (ex.: S8 e S23); e trechos que ora perdem água para a planície ora ganham água (ex.: S11). No trecho a montante da seção 6 (situada cerca de 24 km a montante de Aquidauana) ocorreu a maior perda de água para a planície, atingindo  $340 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .



**Figura 5 – (a) Hidrogramas calculados e observados; (b) Vazões trocadas entre rio e planície, nos trechos a jusante das seções 6, 8, 11, 23 e 46 do rio.**

A evolução das vazões laterais trocadas entre rio e planície durante a simulação pode ser compreendida observando a propagação da mancha de inundação na planície, ou seja, observando o nível da água nos elementos que compõem o modelo raster. A **Figura 6** apresenta uma sequência de quatro imagens da mancha de inundação na planície em diferentes intervalos de tempo. Observa-se que ocorreu a propagação do escoamento na planície de forma independente do escoamento principal na calha do rio e resultados interessantes podem ser apontados, como aqueles indicados pelas setas amarelas nas imagens da **Figura 6**. Por exemplo, as setas 1 e 2 indicam ocorrência de fluxos predominantes alternativos à calha principal do rio, em que a água perdida em um determinado ponto do rio propagou-se pela planície e retornou para o rio em um ponto a jusante. A seta 3 indica um fluxo de água que sai do Rio Aquidauana para a planície e se propaga nela alcançando o Rio Negro. Esse resultado está coerente, pois a passagem de água extravasada do Rio Aquidauana para o Rio Negro é comentada em DNOS (1974), quando da ocorrência de cheias muito grandes, através de corixos.

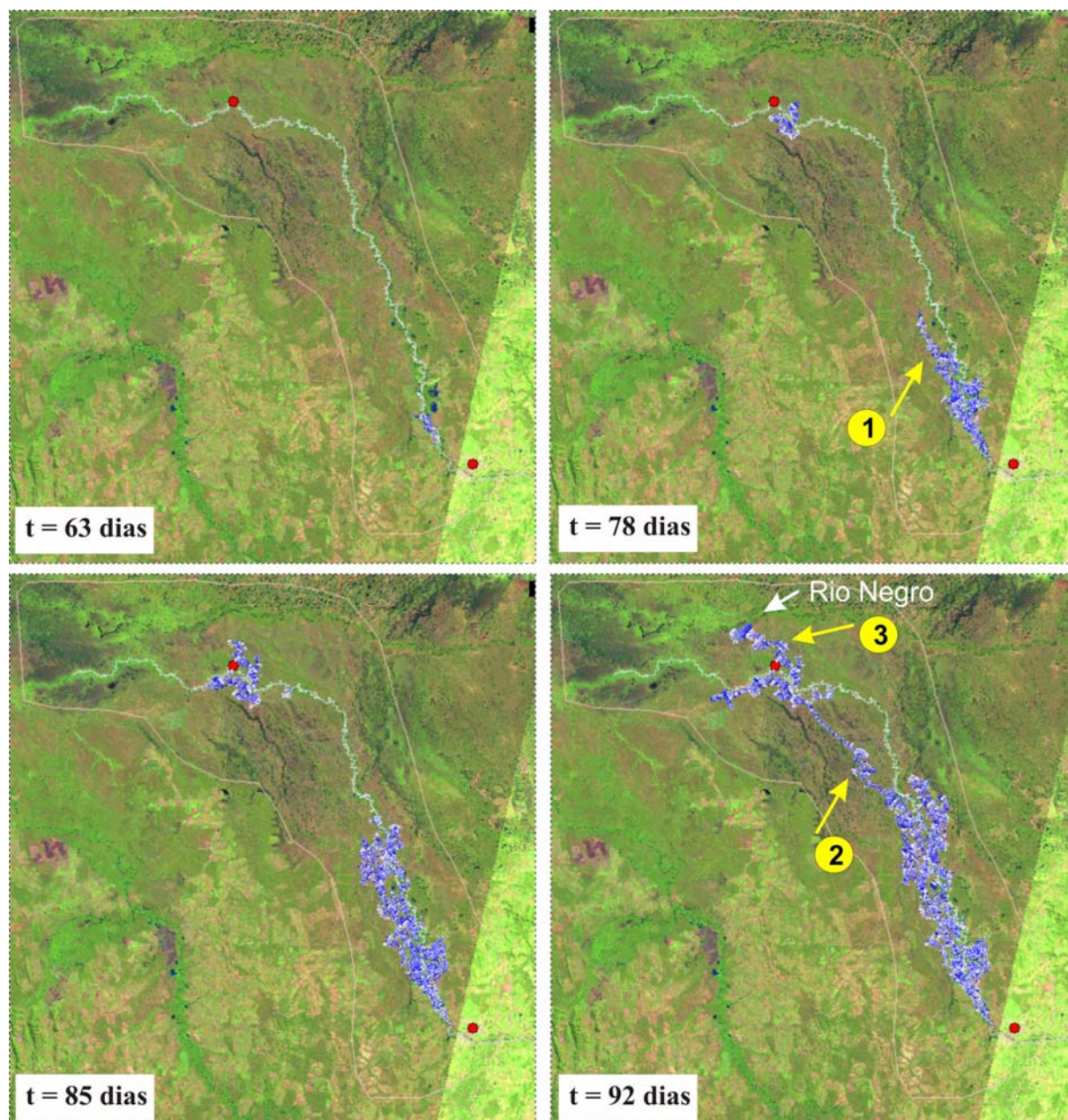
## 5. Conclusões

A metodologia proposta mostrou-se constituir uma interessante forma de modelagem integrada rio-planície, possibilitando simular a propagação do escoamento na planície de inundação de forma independente do escoamento principal na calha do rio. O modelo tipo raster para a



planície, desenvolvido em linguagem Visual Fortran, permite fácil e rápida integração com outros planos de informação em SIG. Ressalta-se ainda que a metodologia empregada apresenta-se com grande potencial para simulação de cenários diversos, tais como alterações de seções transversais dos rios e a construção de diques.

Na aplicação ao Rio Aquidauana, resultados satisfatórios foram obtidos. Destaca-se que a metodologia proposta permitiu simular a ocorrência de trocas de volume de água entre rio e planície de forma distribuída ao longo do curso do rio e, principalmente, a simulação de fluxos secundários na planície.



**Figura 6 – Manchas de inundação simuladas entre Aquidauana e Porto Ciríaco (pontos vermelhos), em diferentes intervalos de tempo: escala de cores vai do branco até o azul quanto maior o nível da água (nível máximo saturado em 40 cm de profundidade).**

A pesquisa continua em desenvolvimento, e aprimorações da metodologia estão sendo buscadas principalmente no sentido de reduzir o tempo computacional de processamento

(duração de 36 h para simulação do evento de 145 dias) e adotar um passo de tempo adaptativo para o modelo raster de planície como proposto por Hunter et al. (2005).

## 6. Agradecimentos

Ao CNPq, pela concessão de bolsa de Doutorado ao primeiro autor; ao CGIAR-CSI, pela disponibilização de dados do SRTM-90m gratuitamente.

## 7. Referências

ANA/GEF/PNUMA/OEA. Modelo de Simulação Hidrológica do Alto Paraguai. Relatório Final, Subprojeto 5.4 – Modelo Integrado de Gerenciamento Hidrológico da Bacia do Alto Paraguai, **Projeto Implementação de Práticas de Gerenciamento Integrado de Bacia Hidrográfica para o Pantanal e Bacia do Alto Paraguai**. Agência Nacional de Águas, Fundo para o Meio Ambiente Mundial, Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente, Organização dos Estados Americanos, 2005. 554 p.

Bates, P.D.; De Roo, A.P. A simple raster-based model for flood inundation simulation. **Journal of Hydrology**, 236, p. 54-77, 2000.

Bates, P.D.; Dawson, R.J.; Hall, J.W.; Horritt, M.S.; Nicholls, R.J.; Wicks, J.; Hassan, M.A. Simplified two-dimensional numerical modelling of coastal flooding and example applications. **Coastal Engineering**, 52, p. 793-810, 2005.

Bravo, J.M.; Allasia, D.; Collischonn, B.; Collischonn, W.; Villanueva, A.; Tucci, C. Metodologia para a estimativa de trocas de água entre a planície e o canal principal em áreas muito planas. **Submetido à Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, ABRH (in press).

CGIAR-CSI, **Void-filled seamless SRTM data V1 - 2004**, International Centre for Tropical Agriculture (CIAT), The CGIAR Consortium for Spatial Information, <http://srtm.csi.cgiar.org>. Acessado em out/2005.

Cunge, J.A. **Practical aspects of computational river hydraulics**. Pitman Advanced Publishing Program, Boston, 1980. 420 p.

DNOS. Estudos hidrológicos da bacia do Alto Paraguai. **Relatório Técnico UNESCO/PNUD**. Rio de Janeiro. 1974, 284p.

Gillan, P.; Jempson, M.; Rogencamp, G. The importance of combined 2D/1D modelling of complex floodplain – Tatura case study. **Fourth Victorian Flood Management Conference**, Shepparton, Victoria, Austrália, 2005.

Horritt, M.S.; Bates, P.D. Effects on spatial resolution on a raster based model of flood flow. **Journal of Hydrology**, 253, p. 239-249, 2001.

Hunter, N.M., Horritt, M.S., Bates, P.D., Wilson, M.D., Werner, M.G. An adaptative time step solution for raster-based storage cell modelling of floodplain inundation. **Advances in Water Resources**, 28, p. 975-991, 2005.

Miguez, M.G.; Mascarenhas, F.C.B. Modelação matemática de cheias urbanas através de um esquema de células de escoamento. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, ABRH, v. 4, n.1, p. 119-140, 1999.

Postel, S.; Richter, B. **Rivers for life: managing water for people and nature**. Island Press. Washington, 2003. 253 p.

Tucci, C.E.M. **Modelos Hidrológicos**. 2ª edição, Editora da UFRGS, Porto Alegre, 1998.

Tucci, C.E.M. **Hydraulic and Water Quality Model for a River Network**. Tese de Doutorado, Colorado State University, EUA, 1978. 218 p.

Villanueva, A.N. **Simulação de áreas de inundação dinâmicas: canais compostos e wetlands**. Tese de Doutorado, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998. 125 p.

Werner, M.G. A comparison of flood extent modelling approaches through constraining uncertainties on gauge data. **Hydrology and Earth System Sciences**, 8(6), p. 1141-1152, 2004.