

# INTEGRAÇÃO DE MODELOS CHUVA-VAZÃO E HIDRODINÂMICO PARA SIMULAÇÃO DE CHEIAS

A. Ribeiro Neto<sup>1</sup>, J.A. Cirilo<sup>1</sup>, C.E.O Dantas<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil, alfredoribeiro@ufpe.br

<sup>2</sup>Serviço Geológico do Brasil, Recife, Brasil

## Abstract

High impact floods have occurred in Brazil in the last years due to high intensity storms. This kind of event is characterized by the large volume of precipitation falling in a short period of time. In addition, the topography of these areas contributes for the high speed of the water in the river channel, resulting in a flash flood event. The objective of this study is to evaluate the integration of the rainfall-runoff model HEC-HMS with the hydrodynamic model HEC-RAS. The integration permits a better understanding of the processes involved: runoff generation and flow routing. The study area is Una River basin (6,740.0 km<sup>2</sup>) located in Pernambuco State-Brazil. Several cities located on the banks of Una River were affected after strong storms on June 2010. The results showed that the integration of models can be useful for flood modeling and flood management in the cities threatened by these natural disasters.

Palavras-Chave: Modelagem Hidrológica, Modelagem Hidrodinâmica, Cheias Ribeirinhas.

## INTRODUÇÃO

As inundações ribeirinhas caracterizam-se pela tomada da planície de inundação pela água das cheias. Várias cidades do Brasil foram criadas ou expandidas para as áreas da planície de inundação dos rios. O resultado da falta de planejamento é a ocorrência de grandes prejuízos para a população durante os eventos de cheias que extravasam a calha principal do rio. Diversas cidades da Zona da Mata dos Estados de Pernambuco e Alagoas têm sofrido com enchentes frequentes ocorridas na última década com essa característica. O enfrentamento desse problema deve passar pelo estudo das enchentes por meio de simulação matemática de modo a permitir o planejamento das intervenções como, por exemplo, zoneamento da ocupação do solo, previsão de cheias e análise do impacto da construção de reservatórios de controle de cheias. A combinação de modelos chuva-vazão e hidrodinâmico permitem avaliar, por exemplo, a magnitude da redução da vazão após a construção de um reservatório de controle de cheias (Gül *et al.*, 2010) e delineamento de área inundada para eventos ocorridos e para eventos projetados com diferentes tempos de retorno (Lastra *et al.*, 2008, Knebl *et al.*, 2005).

O objetivo do artigo é avaliar a integração dos modelos chuva-vazão HEC-HMS com o modelo hidrodinâmico HEC-RAS para serem aplicados nas bacias dos rios da Mata Sul de Pernambuco atingidos pelos grandes eventos de cheias dos últimos anos. A avaliação foi realizada no curso principal do rio Una no trecho que atravessa as cidades de Palmares, Água Preta e Barreiros, que totalizam uma população de 132.790 habitantes.

## METODOLOGIA

### Área de Estudo

A bacia do rio Una, com área de 6.704,0 km<sup>2</sup> está localizada na região da Mata Sul e Agreste do Estado de Pernambuco-Brasil. O Alto curso do rio Una está localizado na região do Agreste e caracteriza-se por uma precipitação média anual de 700 mm com escoamento intermitente. À medida que o rio se desloca para o litoral, a precipitação média anual se eleva para 1.500 mm no curso médio e 2.000 mm no curso inferior (Figura 1).

A região da bacia tem se caracterizado por uma elevada frequência de eventos de cheias que atingem as populações das cidades localizadas nas margens do rio Una e seus principais afluentes. Nos últimos 50 anos, foram registradas cheias com os seguintes valores de vazão média diária na cidade de Palmares (mostrada na Figura 1):

- 2010: 1.800,0 m<sup>3</sup>/s;
- 2000: 1.134,0 m<sup>3</sup>/s;
- 1988: 459,0 m<sup>3</sup>/s;
- 1975: 940,0 m<sup>3</sup>/s;

As principais características da bacia relacionadas à ocorrência de grandes cheias são as grandes declividades observadas e a baixa capacidade de retenção de escoamentos superficiais resultante de solos com baixa permeabilidade e cobertura vegetal composta basicamente por cultura de cana na porção leste e vegetação característica do semi-árido na porção oeste da bacia. Isso resulta em tempos de concentração baixos, não ultrapassando, em alguns locais, mais que 10 horas (Pernambuco, 2002).

Os eventos de junho de 2010 podem ser considerados os mais severos já ocorridos na bacia do rio Una. Entre os dias 16 e 18 de junho daquele ano, foram registrados valores de precipitação que variaram entre 110 e 350 mm, que corresponde a cerca de 50% acima da média histórica do mês de junho. Uma conjunção de fatores contribuíram para a ocorrência desses valores elevados. Um distúrbio ondulatório de leste foi intensificado por um sistema frontal localizado sobre o Oceano Atlântico Sul, que se encontrava com a temperatura da água elevada (Pernambuco, 2010).



Figura 1 – Bacia do rio Una.

### Dados Disponíveis

Para a simulação hidrológica-hidrodinâmica, são necessárias séries de precipitação na bacia e vazão no rio Una e principais afluentes. A Figura 2 mostra a distribuição espacial de 49 postos pluviométricos pertencentes às redes hidrometeorológicas do Laboratório de Meteorologia de Pernambuco (LAMEPE) e Agência Nacional de Águas (ANA). A Figura 3 apresenta as estações fluviométricas e plataformas de coleta de dados com pluviógrafos disponíveis. As PCD's são úteis para simulações com

passo de tempo menor que o diário, particularmente importante para a bacia do rio Una, que possui pequeno tempo de resposta entre o evento de chuva e a chegada da onda de cheia nas cidades.

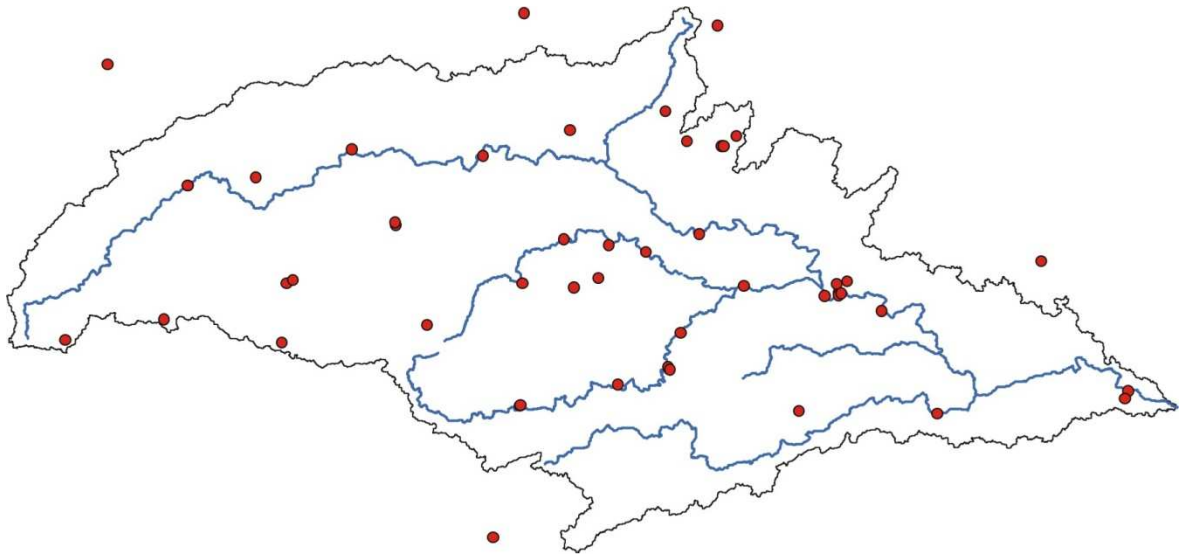


Figura 2 – Estações pluviométricas.

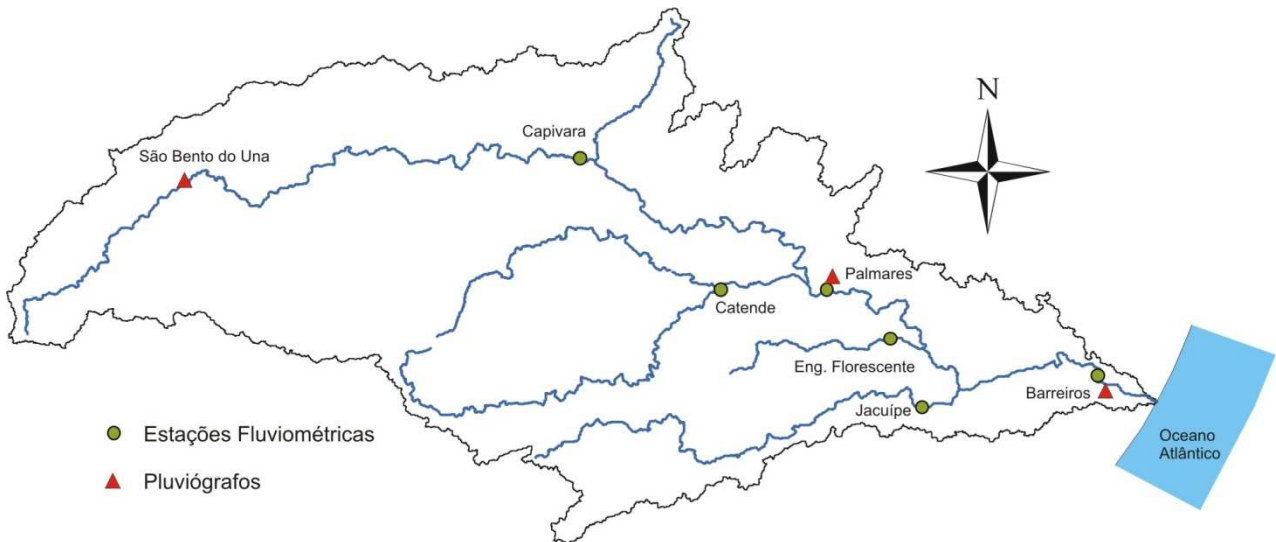


Figura 3 – Estações fluviométricas e pluviógrafos.

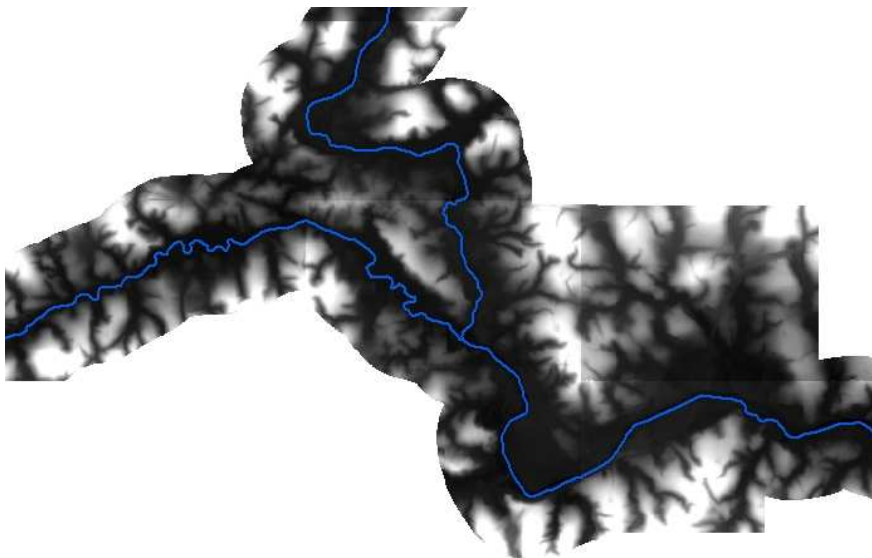


Figura 4 – Modelo numérico do terreno LIDAR na confluência dos dos rios Una e Piranji.

A representação da geometria do rio Una foi feita por meio de levantamento com técnica LIDAR (Light Detection and Ranging), que utiliza feixes de laser emitidos a partir uma aeronave para escanear a área do rio e adjacências (aproximadamente 1 km de cada lado do rio) (Figura 4). O modelo numérico do terreno resultante possui resolução espacial de 0,5 m e precisão altimétrica de 15 cm.

A modelagem hidrodinâmica necessita de entrada de uma condição de contorno a jusante do sistema. No presente caso, o limite de jusante será a foz do rio Una no oceano Atlântico. A alternativa para representar a condição de contorno de jusante foi a determinação da maré por meio do uso de constantes harmônicas da região próxima à foz do rio.

## Modelos Utilizados

O HEC-HMS (*Hydrologic Modeling System*) é um modelo distribuído por sub-bacias desenvolvido pelo *Hydrologic Engineering Center* pertencente ao *US Army Corps of Engineers*, dos Estados Unidos. O modelo tem sido aplicado na solução de diversos problemas em uma grande variedade de bacias com diferentes características.

O HEC-HMS é capaz de realizar simulações de eventos (de poucas horas ou dias) ou simulação contínua de longo período de modo que englobe períodos de cheia e de estiagem. Essa característica só é possível devido a um conjunto de modelos, formulações e equações que podem ser escolhidas para representar cada parte da fase terrestre do ciclo hidrológico (HEC-HMS, 2000): i) balanço hídrico na interface solo-vegetação; ii) propagação do escoamento superficial; iii) propagação do escoamento subterrâneo; iv) propagação do escoamento na calha dos rios e reservatórios. O esquema de simulação dos processos hidrológicos no HEC-HMS é apresentado na Figura 5.

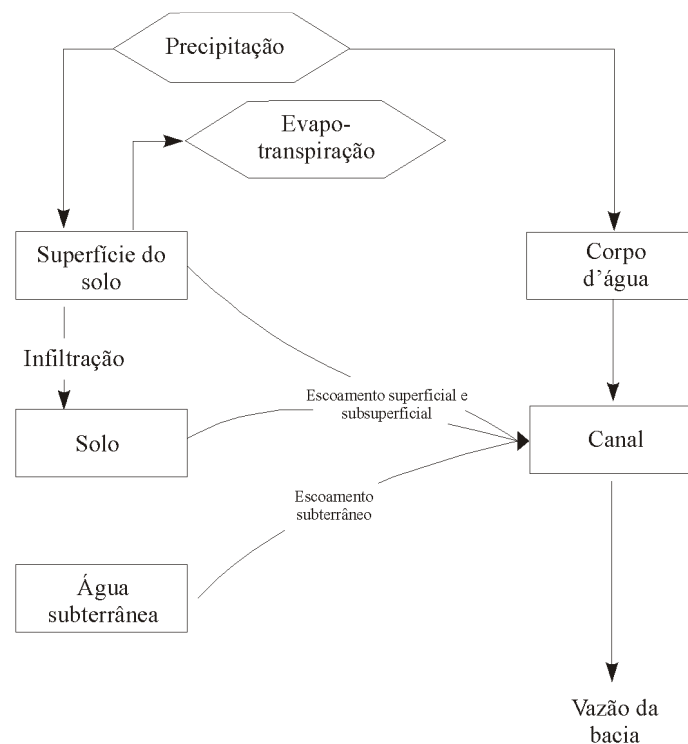


Figura 5 – Esquema de representação do escoamento na bacia no HEC-HMS (HEC-HMS, 2000).

O modelo HEC-RAS (*Hydrologic Engineering Center-River Analysis System*) é capaz de simular escoamento unidimensional em regime permanente, regime transitório, transporte de sedimentos, leito móvel e modelagem da temperatura da água. Para a simulação em regime transitório, o modelo utiliza as equações completas de Saint Venant e o esquema de diferenças finitas implícito de quatro pontos (HEC-RAS, 2010). Uma importante ferramenta disponível no modelo é a possibilidade de utilizar o Sistema de Informações Geográficas ArcGIS/ESRI para operações de pré e pós processamento dos dados de entrada e saída. O pré-processamento, a partir do uso de um modelo numérico do terreno com informação do relevo, realiza a extração das seções transversais do rio e prepara um arquivo em formato compatível para ser importado pelo HEC-RAS. No sentido inverso, com os resultados da simulação hidrodinâmica, é possível realizar o mapeamento da planície de inundação no ArcGIS e, dessa forma, avaliar que partes das cidades são atingidas pelas cheias de diferentes magnitudes.

## Simulação Hidrológica

Uma vez que o objetivo principal do artigo foi avaliar uma estratégia de integração entre os modelos RAS e HMS, optou-se pela calibração apenas do evento de julho/agosto de 2000. Em virtude da rápida resposta da bacia diante de eventos de chuva, verificou-se a necessidade de passo de tempo horário nas simulações. No ano de 2000, havia apenas um pluviômetro em funcionamento na bacia (São Bento do Una conforme mostrado na Figura 3). Por esse motivo, a precipitação média na bacia foi calculada, primeiramente, com passo de tempo diário utilizando-se os postos pluviométricos disponíveis (Figura 2). Em seguida, fez-se a desagregação da precipitação diária para horária utilizando-se a distribuição temporal da chuva medida no pluviômetro em São Bento do Una.

Utilizaram-se os valores de vazão das estações fluviométricas de Capivara, Catende e Jacuípe para calibrar os parâmetros do modelo HEC-HMS. As áreas de drenagem de cada estação são destacadas na Figura 6 e as características apresentadas na Tabela 1.

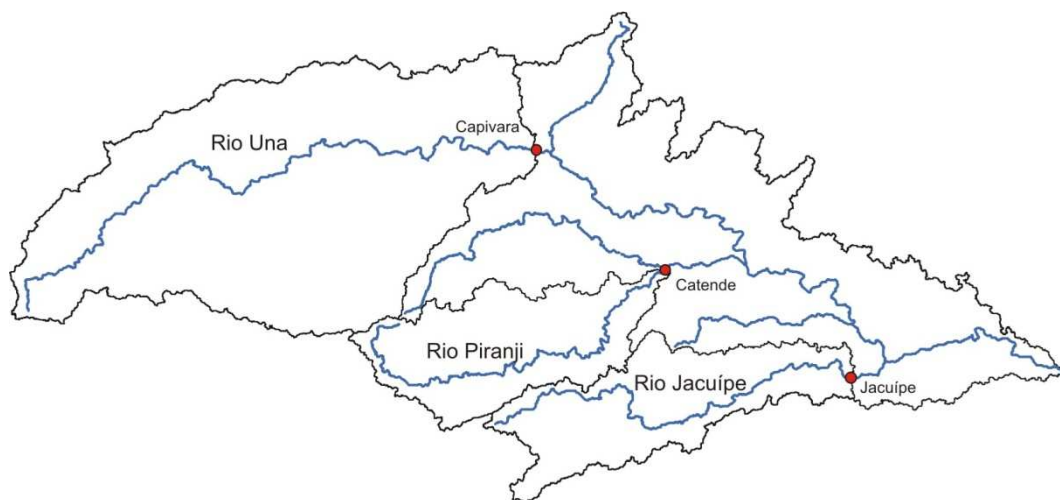


Figura 6 – Áreas de drenagem das estações fluviométricas utilizadas na calibração do modelo HEC-HMS.

Tabela 1 – Características das estações fluviométricas utilizadas na calibração do modelo HEC-HMS.

Estação	Rio	Área de Drenagem (km <sup>2</sup> )	R2	$\Delta V$ (%)	Q <sub>máx.</sub> -obs.(m3/s)	Q <sub>máx.</sub> -calc.(m3/s)
Capivara	Una	2.611,5	0,44	13,45	403,76	272,05
Catende	Piranji	736,3	0,69	41,74	297,23	284,70
Jacuípe	Jacuípe	756,5	0,48	23,11	256,03	287,04

A formulação do modelo HEC-HMS adotada utilizou para o cálculo do balanço hídrico no solo o método *Soil Moisture Accounting* (SMA), para a propagação do escoamento na superfície da bacia o modelo do Hidrograma Unitário SCS e para a propagação do escoamento subterrâneo o reservatório linear. O modelo SMA utiliza reservatórios para representar o armazenamento e o movimento da água na camada superficial do solo, na camada superior da zona saturada e na camada inferior da zona saturada.

Apesar das simulações terem sido realizadas com passo de tempo horário, a comparação com os valores observados teve que ser feito com intervalo diário. A Figura 7 mostra os hidrogramas observado e calculado na estação de Capivara no rio Una no período de 25 de julho a 15 de agosto de 2000. A Tabela 1 mostra um resumo dos principais critérios de avaliação dos hidrogramas gerados nas três estações fluviométricas. Utilizaram-se para a avaliação dos resultados os seguintes critérios:

- Coeficiente de Nash-Sutcliff  $R^2=1-\frac{\sum(Q_{obs}-Q_{calc})^2}{\sum(Q_{obs}-\overline{Q_{obs}})^2}$ , onde  $Q_{obs}$  é a vazão observada e  $Q_{calc}$  é a vazão calculada;
- Erro do volume  $\Delta V(\%)=(Q_{obs}-Q_{calc})/Q_{obs} \cdot 100$ ;
- Vazão máxima;
- Dia de ocorrência da vazão máxima.

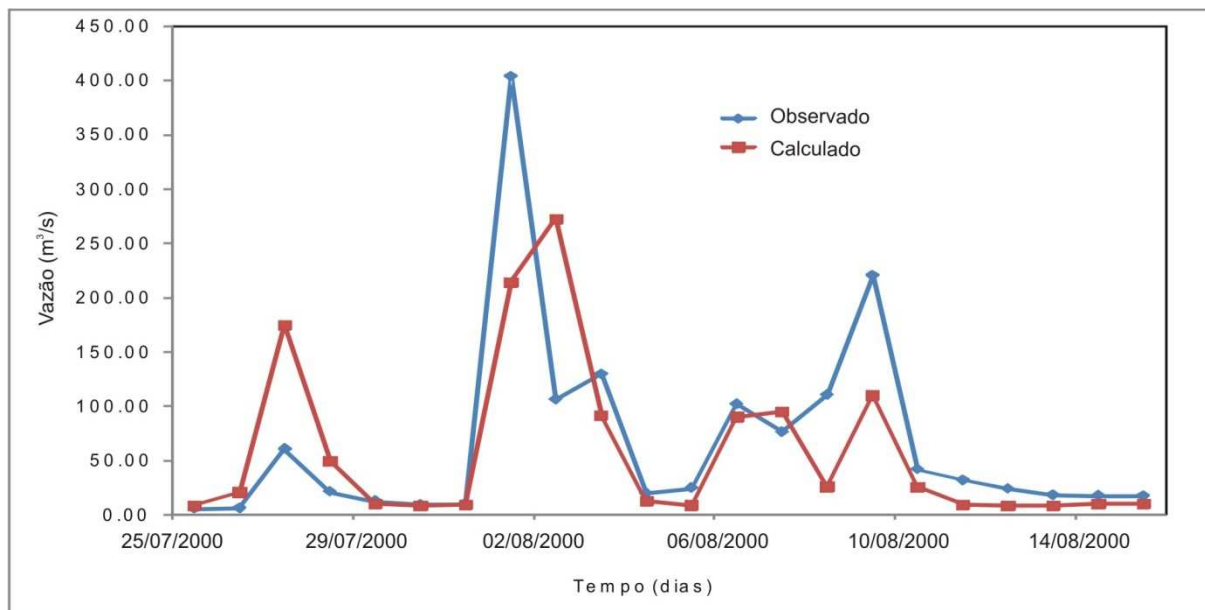


Figura 7 – Hidrogramas observado e calculado pelo modelo HEC-HMS em Capivara.

Os resultados da calibração do modelo HEC-HMS mostraram que, na maior parte do tempo da simulação, a vazão calculada acompanhou os picos de vazão medidos. A deficiência ficou por parte da não coincidência dos tempos de ocorrência da vazão máxima nas estações de Capivara e Jacuípe. Os demais critérios como coeficiente de Nash e erro de volume apresentaram resultados de qualidade apenas mediana. Vale ressaltar que, apesar da qualidade dos resultados obtidos, pode-se considerar que a calibração dos parâmetros do modelo é satisfatória para essa fase da pesquisa, que visa a integração dos modelos chuva-vazão e hidrodinâmico.

Com os valores dos parâmetros obtidos na calibração, realizou-se a simulação dos principais afluentes do rio Una para a cheia de 2000. O objetivo é obter a vazão para as condições de contorno do modelo hidrodinâmico. A vazão em Capivara funciona como condição de contorno de montante e os demais afluentes como vazão de contribuição lateral. Os afluentes simulados são mostrados na Figura 8 e as respectivas características apresentadas na Tabela 2.

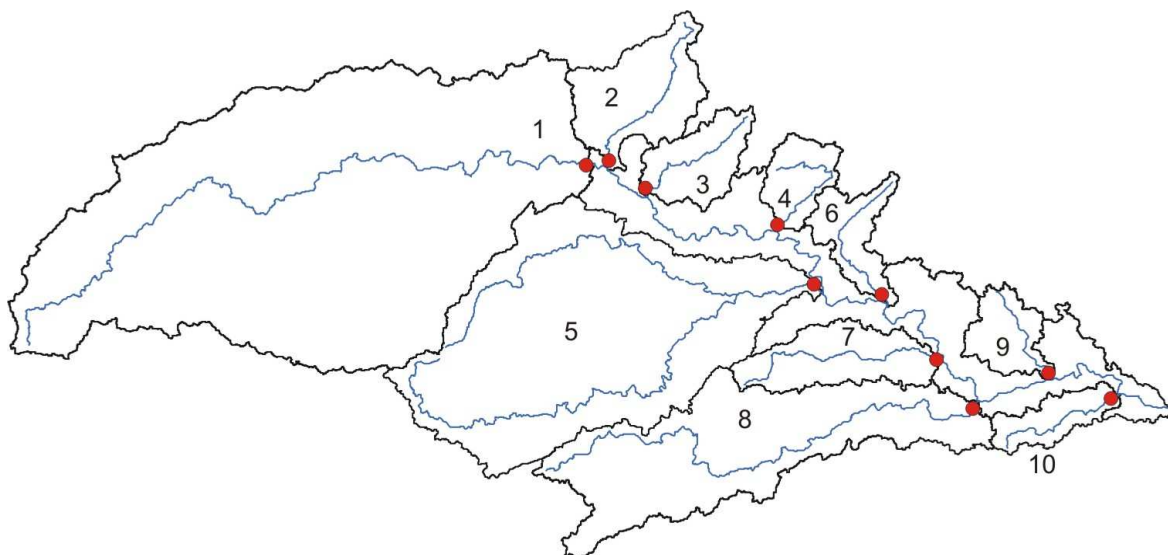


Figura 8 – Discretização adotada para a simulação da vazão nos afluentes do rio Una.

Tabela 2 – Afluentes do rio Una simulados.

Sub-Bacia	Rio	Área (km <sup>2</sup> )
1	Una	2.611,50
2	Maracajá	266,46
3	Prata	153,84
4	Camevô	110,80
5	Piranji	1.401,82
6	Preto	127,28
7	Santo Antônio	218,59
8	Jacuípe	809,89
9	Canoa Grande	115,72
10	Carimã	100,76

### Simulação Hidrodinâmica

O trecho simulado com o modelo HEC-RAS estende-se da estação fluviométrica Capivara até a foz do rio no oceano Atlântico (Figura 3). Todo o processo de pré-processamento da geometria do rio Una foi realizado com o uso da extensão HEC-GeoRAS, que funciona em ambiente ArcGIS/ESRI. Nessa etapa, constroem-se as linhas que representarão o eixo do rio, as margens e as seções transversais de onde se retiram os valores característicos de área, perímetro, raio hidráulico e declividade para a resolução das equações de Saint Venant. A Figura 9 mostra um trecho do rio Una com os elementos geométricos representativos do sistema modelado. O espaçamento entre seções foi de 1 km nas áreas fora das cidades e 100 metros nas cidades para permitir um melhor detalhamento dos resultados e, conseqüentemente, do mapeamento das áreas de inundação.

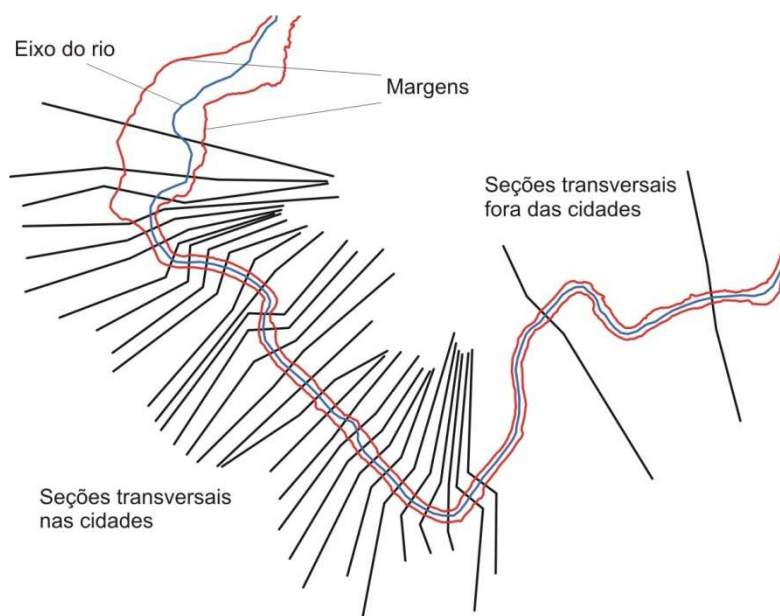


Figura 9 – Elementos geométricos representativos do sistema modelado.

Uma dificuldade encontrada diz respeito à representação deficiente do leito em algumas seções do rio. Isso ocorre porque o feixe de laser do levantamento LIDAR não consegue detectar o fundo do rio quando o mesmo está submerso. O resultado é o aparecimento de instabilidades numéricas na resolução das equações de Saint Venant quando o nível da água está muito baixo. A solução desse problema foi a criação de um canal artificial no leito do rio por meio da ferramenta “Pilot Channel” do HEC-RAS. As dimensões do canal artificial foram largura de 1 metro e profundidade de 3 metros (Figura 10). Com isso, garante-se que sempre haverá uma lâmina d’água no fundo do rio, que permitirá a resolução das equações sem instabilidades numéricas.

O modelo HEC-RAS permite que se representem áreas de armazenamento localizadas ao longo das margens do rio. Essa opção de representação foi utilizada em todo o percurso simulado do rio Una (Figura 10). Nas áreas de armazenamento, admite-se que não há escoamento da água, o que significa, em outras palavras, que se aplica apenas a equação da continuidade. Na área central, que representa o leito do rio, aplicam-se as equações da continuidade e dinâmica. Os valores do coeficiente de Manning adotados foram 0,035 para o canal principal e 0,050 para a planície de inundação adjacente ao rio conforme mostrado na Figura 10.

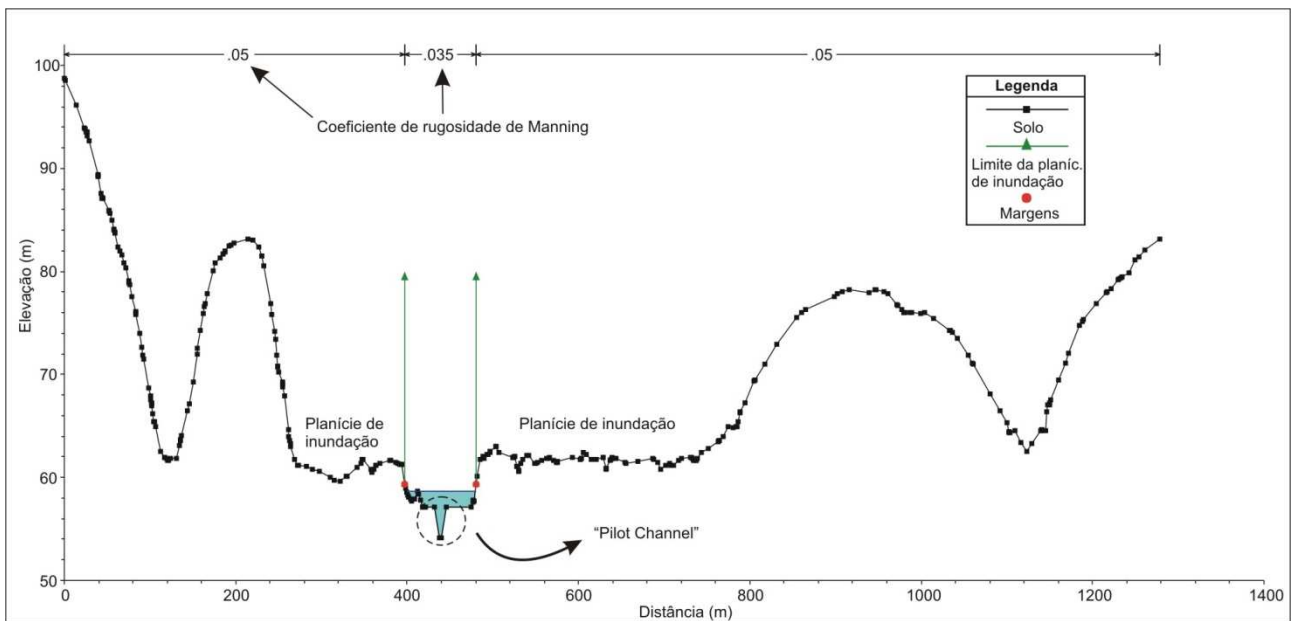


Figura 10 – Detalhes das seções transversais no modelo hidrodinâmico.

A integração dos modelos HEC-HMS e HEC-RAS foi realizada por meio do sistema de armazenamento de dados gerados pelos programas computacionais do HEC. O sistema denominado *Hydrologic Engineering Center Data Storage System* (HEC-DSS) foi concebido para armazenar e recuperar dados científicos tipicamente sequenciais (como as séries de vazão em rios). Dessa forma, a vazão gerada pelo HEC-HMS é armazenada em um arquivo .DSS, que, posteriormente, pode ser lido pelo HEC-RAS para a entrada das mesmas vazões nas condições de contorno do modelo hidrodinâmico.

A simulação hidrodinâmica foi realizada com passo de tempo horário, mas os resultados somente puderam ser comparados com dados de vazão diários na estação fluviométrica de Palmares. A Figura 11 apresenta os valores de vazão calculados pelo modelo e os medidos na estação.

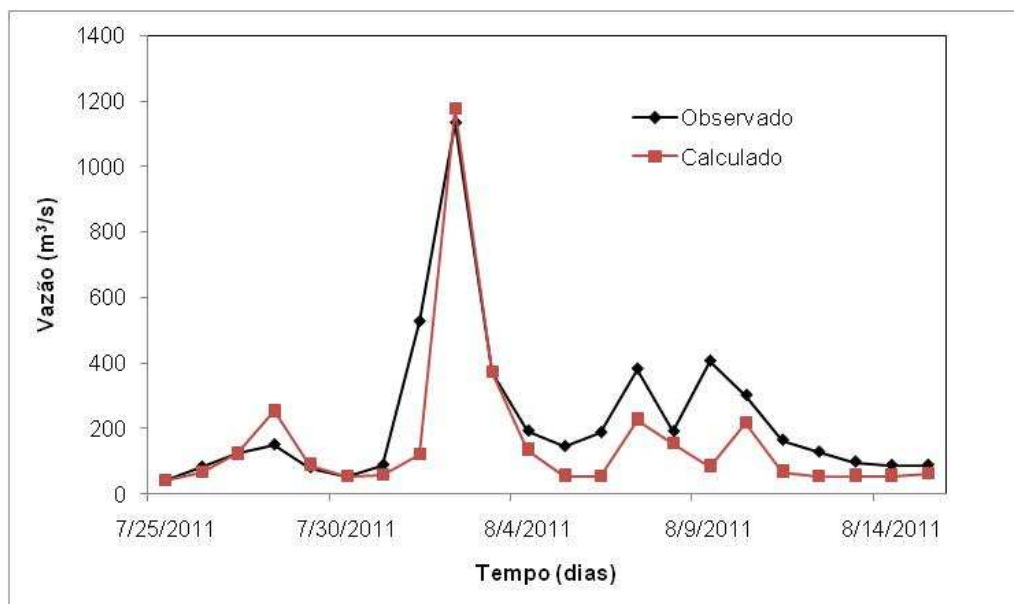


Figura 11 – Hidrogramas observado e calculado pelo modelo HEC-RAS em Palmares.

## DESCOBERTAS E DISCUSSÕES

Os resultados da simulação tiveram qualidade suficiente para encorajar o uso dos modelos do *Hydrologic Engineering Center* na análise das enchentes dos rios da Mata Sul Pernambucana. Entretanto, nas próximas etapas da pesquisa, será necessário melhorar a calibração do modelo HEC-HMS para representar adequadamente os picos das vazões quanto à sua magnitude e momento de ocorrência. Além disso, é necessário o uso de outros eventos de cheia ocorridos na última década para determinar os valores dos parâmetros do modelo de maneira mais segura e permitir, também, a verificação da calibração realizada.



A vazão gerada pelo modelo HEC-HMS foi inserida no modelo HEC-RAS por meio do sistema de armazenamento de dados desenvolvido pelo *Hydrologic Engineering Center*. O sistema DSS mostrou-se capaz de realizar a integração dos dois modelos de forma ágil e eficiente. Toda modificação realizada na simulação do modelo chuva-vazão é automaticamente atualizada nas entradas do modelo hidrodinâmico, dispensando a entrada manual das condições de contorno.

## CONCLUSÕES

O aumento da frequência de eventos extremos na última década nos rios da zona da Mata do Estado de Pernambuco tem causado grandes prejuízos para a população e exige o estudo e desenvolvimento de metodologias que permitam a análise das cheias e a sua previsão. A integração dos modelos HEC-HMS e HEC-RAS permite que, a partir dos dados de precipitação medidos ou previstos, realize-se a propagação da vazão nos principais rios da região. Os resultados obtidos com o modelo chuva-vazão HEC-HMS indicam que a parametrização do modelo é capaz de representar os processos hidrológicos na bacia do rio Una e, assim, fornecer os valores de vazão necessários para a representação das condições de contorno do modelo hidrodinâmico.

Na simulação hidrodinâmica, fez-se uso de dados altimétricos obtidos por meio da técnica de sensoriamento remoto LIDAR. O elevado nível de precisão dessa técnica será útil para o mapeamento da planície de inundação nas cidades atingidas pelas enchentes. Um problema encontrado refere-se à má representação da geometria do leito do rio que pode resultar em instabilidade numérica, principalmente, nos intervalos de tempo em que o nível da água está baixo, ou seja, pequena lâmina d'água. As instabilidades foram sanadas com a inclusão de um pequeno canal no leito do rio utilizando-se ferramenta disponível no próprio HE-RAS.

A comparação da vazão gerada pelo modelo hidrodinâmico com a vazão medida na estação de Palmares mostrou um bom ajuste conforme mostrado na Figura 11. Esse tipo de comparação será mais útil na medida em que os dados das plataformas de coleta de dados, que medem nível da água com intervalo de tempo inferior ao dia, forem disponibilizados. A comparação com nível da água com passo de tempo horário permitirá melhor avaliação do desempenho da simulação das cheias. A avaliação com passo de tempo horário é importante em virtude do pequeno tempo de resposta das cheias da bacia do rio Una. De posse da previsão de chuva na bacia, será possível determinar a vazão, o nível da água e as áreas atingidas nas cidades localizadas nas margens do rio Una, permitindo a mobilização com antecedência para a assistência à população. Além disso, a integração dos modelos permitirá a avaliação de ações propostas para a redução dos impactos das cheias na bacia do rio Una como, por exemplo, construção de reservatórios, obras de dragagem e zoneamento da planície de inundação.

## REFERÊNCIAS

- Gül GO, Harmancioglu N, Gül A. A combined hydrologic and hydraulic modeling approach for testing efficiency of structural flood control measures. **Natural Hazards**, v. 54, p. 245-260, 2010.
- HEC-RAS – River Analysis System. User's Manual. Davis, USA: US Army Corps of Engineers, 2010.
- HEC-HMS - Hydrologic Modeling System. Technical Reference Manual. Davis, USA: US Army Corps of Engineers, 2000.
- Knebl MR, Yanga, ZL, Hutchisonb K, Maidment DR. Regional scale flood modeling using NEXRAD rainfall, GIS, and HEC-HMS/RAS: a case study for the San Antonio River Basin Summer 2002 storm event. **Journal of Environmental Management**, v. 75, p. 325–336, 2005.
- Lastra J, Fernandez E, Diez-Herrero A, Marquinez J. Flood hazard delineation combining geomorphological and hydrological methods: an example in the Northern Iberian Peninsula. **Natural Hazards**, v. 45, p. 277–293, 2008.
- PERNAMBUCO. Relatório Técnico Preliminar (Anteprojeto) de 03 (Três) Barramentos para o Controle de Cheias na Bacia do Rio Una – PE (Síntese). Téchne – Engenheiros Consultores, 2002.

PERNAMBUCO. Chuvas e Enchentes Ocorridas em Junho de 2010 – Nota Técnica. Agência Pernambucana de Água e Clima, 2010.