

Sistema de Suporte à Decisão para Análise, Previsão e Controle de Inundações

Roberta Guedes Alcoforado e José Almir Cirilo

Departamento de Engenharia Civil – CTG – UFPE - Av. Acadêmico Hélio Ramos, s/n – Cid. Universitária
50670-901 Recife, PE - almir.cirilo@terra.com.br

Recebido: 27/06/01 - revisão: 24/07/01 - aceito: 09/08/01

RESUMO

O presente trabalho apresenta um sistema de suporte à decisão em tempo real, para a previsão e o controle de cheias, utilizando modelo de simulação hidrodinâmica do escoamento fluvial associado a técnicas de geoprocessamento e de redes neurais.

A bacia do rio Capibaribe, em Pernambuco, é utilizada como estudo de caso.

O sistema tem como base os softwares de geoprocessamento ArcView e extensões ArcView 3D Analyst, ArcView Spatial Analyst e AVRas, sendo esta última responsável pela comunicação entre o ArcView e o modelo de simulação hidrodinâmica HEC - RAS.

O sistema prevê dois tipos de análise: de planejamento e de operação em tempo real. As análises de planejamento podem ser feitas a partir de dados de vazão conhecidos, ou ainda se utilizando modelos de simulação chuva-vazão. Para a previsão em tempo real o sistema possui um programa de previsão a partir da metodologia de redes neurais. O resultado desta análise é a vazão afluente à entrada da RMR – Região Metropolitana do Recife; a partir daí o sistema dispõe de um módulo de simulação hidrodinâmica, para avaliação do escoamento na calha fluvial e planície de inundação considerando os níveis de maré previstos. O SIG permite avaliação automática das áreas a serem inundadas e lança estas áreas sobre mapas da cidade e sobre imagens de satélite SPOT e LANDSAT, possibilitando um rápido diagnóstico e definição das ações a serem implementadas.

Palavras-chave: *previsão; geoprocessamento; redes neurais.*

INTRODUÇÃO

As cheias, de uma forma geral, constituem-se em um dos mais severos fenômenos naturais. Provocam destruições, perdas de vidas humanas, danos das mais variadas espécies. A problemática das inundações é agravada se áreas densamente ocupadas são atingidas. Dentre os principais fatores que provocam as inundações podem ser destacados a falta de planejamento urbano, resultante da especulação imobiliária e a ocupação das várzeas dos rios.

Ostrowsky (2000) cita um trecho do trabalho de Uehara (1989): “As várzeas foram criadas pela natureza para servir de depósito de sedimentos e caminho natural de ondas de cheias. O que não é natural é sua ocupação indevida, para fins de urbanização. Se for ocupada por necessidade, os ribeirinhos deverão conviver com a vida própria da várzea, principalmente com as inundações, pois em qualquer período de chuvas poderão ocorrer en-

chentes superiores às adotadas no projeto de obras de melhoramentos”.

Na prática, no entanto, não é isso que ocorre. Basta um período um pouco mais longo de estiagem e a urbanização desenfreada já se apodera das várzeas, os níveis registrados pelas últimas enchentes são esquecidos e ultrapassados. A impermeabilização decorrente da urbanização e a redução da cobertura vegetal reduzem o processo natural de infiltração da água no solo, aumentando assim o escoamento superficial.

Na realidade, as cheias agredem em resposta à ação antrópica, que lhe rouba as planícies naturais de inundação e priva os rios, seus caminhos, das suas calhas plenas, assoreadas pelo uso incorreto dos solos na bacia hidrográfica. Quando há harmonia de convivência as cheias podem trazer benefícios. Um exemplo notável a história registra: a fertilidade das margens do rio Nilo gerada com séculos de extravasamentos.

Neste trabalho será estudada, como exemplo de aplicação do sistema desenvolvido, a Região



Figura 1. Rio Capibaribe, próximo à foz.

Metropolitana do Recife - RMR, cuja população ribeirinha ainda está sujeita a ter suas casas invadidas pelas águas dos diversos rios que cortam a cidade, sendo o principal desses rios o Capibaribe, que se estende desde o interior do Estado até o Oceano Atlântico.

O rio Capibaribe possui uma extensão de estuário de aproximadamente 22 km, cortando parte do centro da cidade. Este rio, ao atravessar a planície costeira, onde está edificada a cidade do Recife, forma um estuário em cuja desembocadura se encontra o porto da cidade.

A Figura 1 apresenta foto mostrando vista aérea do rio Capibaribe num trecho bem próximo à sua foz.

A previsão e o controle de cheias são imprescindíveis em regiões urbanas, devido à quantidade de vidas envolvidas no processo, edificações, bens materiais, saneamento e infra-estrutura. Essa questão vem ganhando destaque progressivo em várias partes do mundo. Os pesquisadores da área vêm trabalhando de forma a alcançar resultados mais precisos nos processos de planejamento e previsão e, graças ao avanço tecnológico, significativa evolução tem ocorrido.

DESCRIÇÃO DO SISTEMA

O sistema de apoio à decisão, que será apresentado aqui, foi estruturado para funcionar

como uma ferramenta computacional de suporte ao monitoramento em tempo real e à tomada de decisão para acompanhamento das vazões do rio Capibaribe e seus reservatórios por ocasião de chuvas intensas, bem como poderá dar suporte à Defesa Civil do Estado para proteção da população contra inundações.

Esse sistema deverá ser alimentado com os dados da rede telemétrica em instalação na bacia. Uma vez processados esses dados, o sistema possibilita a utilização de modelos de simulação hidrológica ou modelo de redes neurais, conforme o objetivo da análise. O resultado desses modelos é a vazão simulada $Q(t)$ em São Lourenço da Mata, na entrada da RMR, que funciona como seção de controle a montante. A partir das vazões neste posto, o sistema dispõe de um módulo de simulação hidrodinâmica, para avaliação do comportamento do escoamento mediante uma dada condição de maré. O SIG permite a estimativa automática das planícies de inundação lançadas sobre mapas da cidade e sobre imagens de satélite, possibilitando um rápido diagnóstico e a definição das ações a serem adotadas, como operação de comportas e mesmo retirada da população nas áreas que serão alagadas.

O sistema prevê dois tipos de análise: de planejamento e de operação em tempo real. As análises de planejamento são feitas a partir de dados conhecidos, com os quais podem ser realizadas simulações e a partir daí avaliados os impactos de interferências na bacia, como por exemplo na calha fluvial e no planejamento da operação dos reservatórios. Essa etapa do estudo proporciona uma boa definição para as regras operativas. Para esse caso, podem ser utilizados para definição das vazões de chegada na RMR modelos de simulação chuva-vazão.

No que se refere à previsão em tempo real das vazões afluentes à RMR e dos efeitos de prováveis inundações, o sistema possui um programa de previsão a partir da metodologia de redes neurais. Trata-se de uma metodologia moderna e eficiente, com bons resultados para a previsão de vazões (Valença, 1999).

A Figura 2 apresenta o fluxograma de funcionamento do sistema.

MONITORAMENTO DO RIO CAPIBARIBE

Uma das medidas não estruturais de atenuação dos efeitos de enchentes é a montagem de um sistema de previsão de cheias a partir do moni-

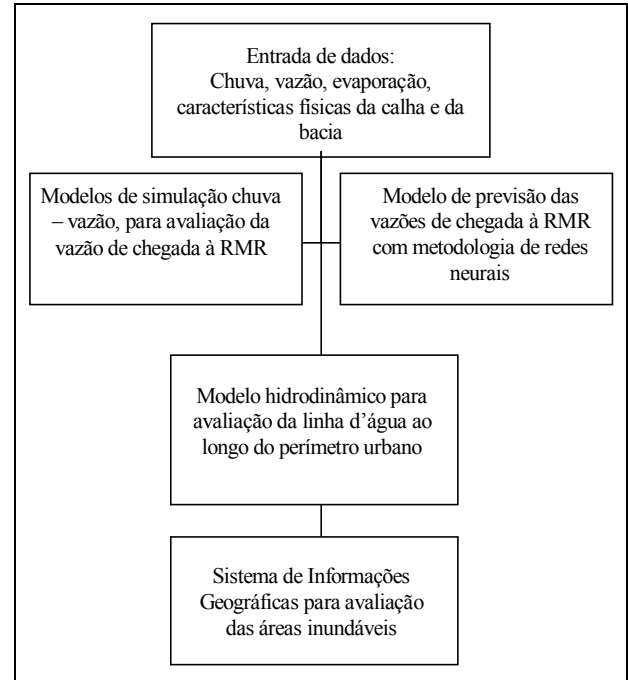


Figura 2. Fluxograma de funcionamento do sistema.

toramento de estações da rede fluviométrica básica de uma bacia. No Estado de Pernambuco foi considerado prioritário o monitoramento do rio Capibaribe e dos seus afluentes Goitá e Tapacurá (SECTMA, 1998).

Para possibilitar o acompanhamento da evolução do nível d'água foram instaladas Plataformas de Comunicação de Dados - PCDs ao longo do rio, junto aos postos fluviométricos de Toritama, Limoeiro, Paudalho e São Lourenço da Mata, bem como nas barragens Tapacurá, Carpina e Goitá (ver Figura 5). As informações eram transmitidas de forma automática aos computadores da SECTMA - Secretaria de Ciência, Tecnologia e Meio Ambiente, em intervalos programados de meia hora. Em função de problemas de comunicação, a rede está sendo reformulada e ampliada pela atual Secretaria de Recursos Hídricos do Estado.

MODELOS HIDROLÓGICOS - FASE DE PLANEJAMENTO

Na engenharia de recursos hídricos os modelos de simulação se constituem numa ferramenta de fundamental importância. Os modelos de simulação do processo chuva x vazão, por exemplo, permitem reconstituir séries de vazões, realizar previsões e simular situações especiais, procurando representar o comportamento da bacia hidrográfica.

No sistema descrito neste trabalho, a simulação da fase terrestre do ciclo hidrológico, na fase de planejamento das ações, é feita por meio do Sistema de Gerenciamento de Informações Hidrológicas - SGI, sistema especialista desenvolvido na UFPE - Universidade Federal de Pernambuco, e aprimorado na SECTMA (Asfora et al., 1996; Cirilo et al., 1997). Esse sistema incorpora automaticamente dados hidrometeorológicos georreferenciados e por meio de modelos chuva-vazão avalia o escoamento superficial e simula a operação de reservatórios a partir de regras estabelecidas.

PREVISÃO DE VAZÕES EM TEMPO REAL

Para que o processo de previsão de vazões seja efetivo, nas circunstâncias de formação muito rápida de cheias como ocorre na bacia do Capibari-be, é necessário que o acompanhamento e a previsão dos efeitos das inundações possam ser feitos em muito pouco tempo. Dessa forma, as técnicas usadas na previsão precisam ser de processamento rápido e com a melhor precisão possível.

Entre os instrumentos computacionais cuja aplicabilidade vem crescendo para previsão de séries temporais encontram-se os métodos de redes neurais. Tais métodos têm como princípio lógico o funcionamento dos neurônios do cérebro humano, daí a sua denominação.

Uma rede neural artificial pode ser definida como um sistema constituído por elementos de processamento interconectados, chamados de neurônios, os quais são dispostos em camadas e são responsáveis pela não-linearidade da rede, através do processamento interno de certas funções matemáticas (Valença e Ludermir, 1999). Uma rede neural é composta por um conjunto de elementos de processamento (EPs), chamados de neurônios, por apresentarem semelhança em seu funcionamento com a neurotransmissão ocorrida nas células nervosas.

Para a construção de um modelo de rede neural devem ser obedecidas as seguintes etapas:

1. Análise preliminar e identificação do modelo – definição da topologia da rede, escolha do número de camadas escondidas e do número de neurônios. Não existe fórmula preestabelecida para esta etapa. Deve-se treinar várias arquiteturas antes de encontrar a melhor. A rede é constituída de dife-

rentes camadas, cada uma composta por uma série de neurônios. Os neurônios da primeira camada são as variáveis de entrada do sistema (por exemplo, vazões em seções anteriores do rio ou na própria seção de saída em instantes anteriores, precipitação em diferentes pontos da bacia, ou até informações sobre o relevo, como altitude do posto hidrométrico).

As camadas intermediárias, chamadas escondidas, contêm neurônios cujas informações são resultado da aplicação de uma função de transferência sobre a camada anterior. Essa função de transferência, responsável pela intensidade do sinal a ser transmitido pelas conexões para os neurônios das camadas adjacentes, pode ser uma função polinomial, funções especiais como a gaussiana, hiperbólicas, etc. Nas redes propostas a seguir, após diversos testes, foi utilizada como função de transferência a sigmóide: $1/[1+\exp(-x)]$.

O(s) neurônio(s) da última camada corresponde(m) às variáveis de saída do sistema (no caso, a vazão em São Lourenço, controle de montante para o modelo hidrodinâmico, ou a afluência às barragens, em simulações intermediárias).

2. Treinamento da rede – consiste no ajustamento dos pesos. O método consiste na determinação de pesos atribuídos aos diversos neurônios de forma a adequar o neurônio de saída a valores conhecidos, como em processo de calibração de modelo.
3. Verificação da rede ou validação – é feita utilizando-se um conjunto de dados que não foi empregado durante o treinamento. Caso o resultado não seja satisfatório deve-se escolher uma nova topologia e reiniciar o ciclo. Após o treinamento e a verificação, a rede estará pronta para ser utilizada, pois todas as informações da amostra utilizada ficaram armazenadas nos neurônios após o ajuste dos seus pesos sinápticos.

A Figura 3, a seguir, exemplifica a estrutura de uma rede neural com quatro camadas, sendo a primeira formada por oito neurônios, as camadas escondidas por quatro e dois neurônios e a última por um único neurônio. Nesta rede, todos os neurônios estão interconectados, o que não é obrigatório.

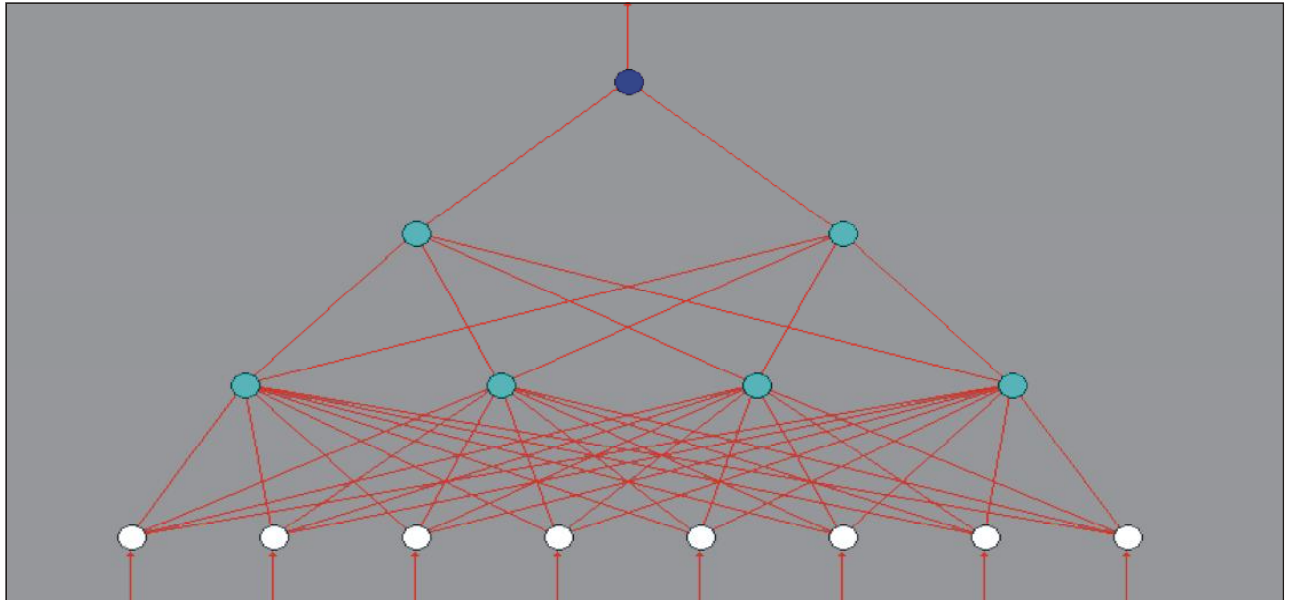


Figura 3. Exemplo de estrutura de rede neural.

SIMULAÇÃO HIDRODINÂMICA

Uma vez identificada a vazão afluyente ao perímetro urbano do Recife, torna-se necessário avaliar os seus efeitos. Um procedimento adequado é a utilização de modelos hidrodinâmicos que considerem o extravasamento da calha fluvial.

A modelação matemática do escoamento consiste em reproduzir, através de equações, as relações existentes entre as variáveis associadas ao processo: vazão ou velocidade, profundidade do escoamento e características físicas da calha fluvial.

A área do estuário do rio Capibaribe apresenta grande variação em função da amplitude das marés, com fluxo extremamente variável em direção e sentido, necessitando assim emprego de um modelo de simulação hidrodinâmico. Estes modelos de simulação buscam através de equações matemáticas representar tais fenômenos. As equações de Saint-Venant completas são indicadas por Cirilo (1991) como a formulação mais apropriada para se obter precisão nas simulações de vazões e níveis em um rio, considerando o escoamento como não-permanente. O regime de escoamento não-permanente e variado considera as suas grandezas variando no tempo e no espaço. É a situação mais comum em rios e canais.

Essas equações se baseiam na conservação da massa e da quantidade de movimento, sendo também conhecidas como equações unidimensio-

nais do escoamento não-permanente gradualmente variado.

MODELO MATEMÁTICO UTILIZADO

Pela caracterização física do problema aqui abordado, em se tratando de análise do escoamento em situações de enchente ocorridas ou previstas em um sistema estuarino, naturalmente a metodologia adequada para a simulação consiste em utilizar equações do escoamento não-permanente bidimensionais ou, de forma mais simplificada, as equações de Saint-Venant para escoamento unidimensional adaptadas para considerar áreas de armazenamento na planície de inundação.

As primeiras tentativas realizadas durante a pesquisa utilizaram os dois tipos de modelo descritos.

Dificuldades surgiram, a saber:

- complexidade dos modelos e a dificuldade natural de torná-los de uso prático com rápida obtenção de resultados, uma das premissas desse trabalho;
- qualidade dos dados, em particular no que diz respeito ao relevo da área inundável, incompatível com refinamento maior da técnica.

Desta forma, foi resolvido implantar e utilizar no sistema um modelo de escoamento permanente, o HEC - RAS já citado. Isso parece razoável considerando que o objetivo é simular sucessivos estados estacionários, “retratos instantâneos” da situação ao longo do rio. A simplificação feita pelos modelos de escoamento permanente é que o tempo seria suficiente para o escoamento atingir o equilíbrio estacionário, o que evidentemente não acontece. No entanto, a imprecisão presente, por exemplo, na geometria da calha e na caracterização das forças de atrito reinantes podem levar a erros maiores que o cometido na formulação matemática do modelo.

Para as simulações hidrodinâmicas, incorporou-se assim ao sistema o programa HEC - RAS (Hydrologic Engineering Center's River Analysis System), versão 2.2 de Agosto de 1998 desenvolvido pelo U. S. Corps of Engineers.

Esse programa foi escolhido devido à sua interface de comunicação com os programas do ESRI - Environmental Systems Research Institute (ArcView e extensões ArcView 3D-Analyst e Spatial Analyst) utilizados como GIS no sistema.

De acordo com o Hydrologic Engineering Center (1997) os cálculos são realizados de uma para outra seção transversal baseando-se na equação unidimensional da conservação da energia, ou equação de Bernoulli:

$$Y_2 + Z_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = Y_1 + Z_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_e \quad (1)$$

onde Y_1 e Y_2 são as profundidades em duas seções adjacentes; Z_1 e Z_2 a elevação do canal principal; V_1 e V_2 as velocidades médias nas seções; α_1 e α_2 os coeficientes de correção da carga cinética, pelo uso da velocidade média da seção; g a aceleração da gravidade e; h_e a perda de carga entre duas seções.

A energia é perdida gradativamente pela fricção ou atrito (representada pela chamada Fórmula de Manning) e pelos fenômenos de contração e expansão.

O HEC - RAS divide as seções transversais em função da variação de sua geometria. As áreas laterais de transbordamento são denominadas de *overbanks*. Uma seção, mostrando as divisões em *overbank* está representada na Figura 4.

O modelo UNET, desenvolvido pelo Hydrologic Engineering Center (1995), foi também testado na modelação hidrodinâmica. O modelo

considera o escoamento não-permanente unidimensional, através de uma rede de canais. Permite a incorporação de áreas de armazenamento laterais, podendo ser adicionadas diversas condições de contorno internas e externas, como por exemplo: hidrogramas e cotogramas observados, barragens de controle de níveis, pontes, bueiros, dentre outros (Pinheiro, 2000). Esse modelo não foi incorporado ao sistema devido a limitações como, por exemplo, operação em ambiente DOS, processamento em unidades de medidas inglesas (pé, milha, acre-pé) e inexistência de interface gráfica para o GIS, dificultando assim a avaliação da área inundável.

APLICAÇÃO - TRABALHO DE CAMPO

No trabalho de montagem do sistema de monitoramento e proteção contra cheias, a primeira etapa a ser cumprida foi o levantamento topobatimétrico da calha do rio no trecho a ser estudado, que compreende toda a região do estuário e se estende até o posto fluviométrico no município de São Lourenço da Mata.

Juntamente com o trabalho topobatimétrico foi criado um acervo fotográfico registrando pontos notáveis da calha como: desmatamento, aterro, erosão, acúmulo de lixo, lançamentos de esgotos. Todos esses pontos foram georreferenciados. Esse trabalho de campo gerou ao todo 59 seções, espaçadas aproximadamente a cada 500 m. Todo o levantamento foi feito utilizando um GPS geodésico, para obtenção das coordenadas X, Y e Z sobre a superfície do espelho d'água, e uma sonda para medida da profundidade e determinação da cota de fundo. Para o levantamento das coordenadas X, Y e Z foi utilizado o método diferencial (DGPS) com dois receptores GPS (Global Position System), um num ponto base de coordenadas conhecidas e outro para rastrear o trecho do rio em questão.

O sensoriamento remoto, através de imagens de satélites, vem provando ser uma ferramenta barata e útil no suporte ao mapeamento e monitoramento dos recursos hídricos (Sharma et al., 1989).

Romão (1998) afirma que quando dois receptores observam simultaneamente os mesmos satélites, é estabelecido um posicionamento relativo, resultando na diferença de coordenadas (X, Y, Z) entre os dois pontos, denominada *linha de base*. Para se obter as coordenadas dos pontos, deve-se trabalhar com um ponto de coordenadas conheci-

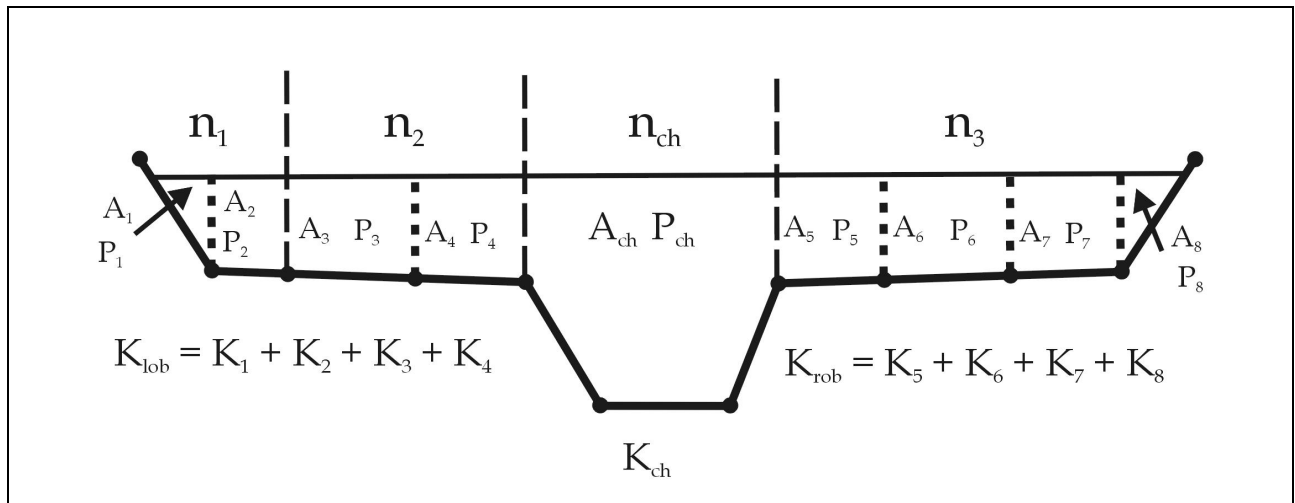


Figura 4. Esquema de discretização de seção transversal.

das (ponto de referência) para a determinação da posição relativa do segundo ponto. No posicionamento relativo, os dados são em geral pós-processados, pois são necessários os valores obtidos nas duas estações. A precisão alcançada com o posicionamento relativo atende em grande parte às exigências do usuário, pois ele tem a capacidade de reduzir as influências de erro, por meio da diferença entre os dados de observação das duas estações.

Nesse trabalho foram utilizados os pontos de base para georreferenciamento indicados na Tabela 1. Foram utilizadas ainda imagens da bacia geradas pelos satélites LANDSAT e SPOT para caracterização da área.

A Figura 5 mostra a bacia, a rede hidrográfica principal e as barragens de contenção de enchentes. Na Figura 6 é indicada a localização de todas as seções levantadas em campo, sobre imagem LANDSAT obtida da versão digital do Plano de Recursos Hídricos de Pernambuco (SECTMA, 1998).

MODELO DIGITAL DE TERRENO

Para a montagem do modelo digital do terreno foram utilizadas cartas altimétricas na escala 1:2000, com curvas de nível de 2 em 2 metros, de toda a área da bacia do Capibaribe contida na região metropolitana e se estendendo até São Lourenço da Mata, o que compreende um total de 59 cartas.

O modelo digital de terreno permite uma visualização em 3D, auxiliando bastante a análise. A Figura 7 mostra parte do MDT gerado.

As cartas foram fornecidas pela FIDEM - Fundação para o Desenvolvimento da Região Metropolitana do Recife, sob a forma de fotolitos, que foram digitalizados com o suporte de um scanner tamanho A0. Posteriormente foi feita a vetorização, com o auxílio do software TRACER, a edição e a colagem de todas as cartas com o software AUTOCAD MAP 3.0.

A Figura 8 exemplifica a altimetria de trecho em torno do rio e a Figura 9 mostra destaque do traçado urbano na região da foz.

Para a geração do Modelo Digital do Terreno: MDT ou TIN - *Triangulated Irregular Network*, foi utilizada a extensão ArcView 3D Analyst, ferramenta de geoprocessamento que permite a modelação de superfícies em 3 dimensões (Price, 1999). Para a utilização desta extensão é necessária a versão do ArcView 3.1 (ou mais recente).

SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA

Nesta etapa do trabalho foi utilizado um sistema integrado de análise desenvolvido na UFPE como ferramenta de suporte para estudos e planos de recursos hídricos em bacias hidrográficas, objetivando a conexão entre modelos de simulação e programas para tratamento e gerenciamento de dados hidrometeorológicos (Cirilo et al., 1997). Tal sistema apresentou-se como importante ferramenta na gestão dos recursos hídricos em Pernambuco e foi denominado de SGI - Sistema Gerencial de Informações Hidrológicas.

O SGI é composto por diversos módulos, entre eles: módulo pluviométrico, módulo evapo-

Tabela 1. Pontos da base fornecidos pela FIDEM - Fundação para o Desenvolvimento da Região Metropolitana do Recife.

Estação	Latitude	Longitude	ALT(m)
V - 79	8 00' 05",1803S	34 58' 09",9657W	122,72
P - 32009	8 04' 34",2715S	34 54' 13",065W	33,658
P - 32004	8 02' 16",302S	34 53' 52",658W	69,128
P - 32006	8 02' 50",793S	34 52' 38",371W	32,657

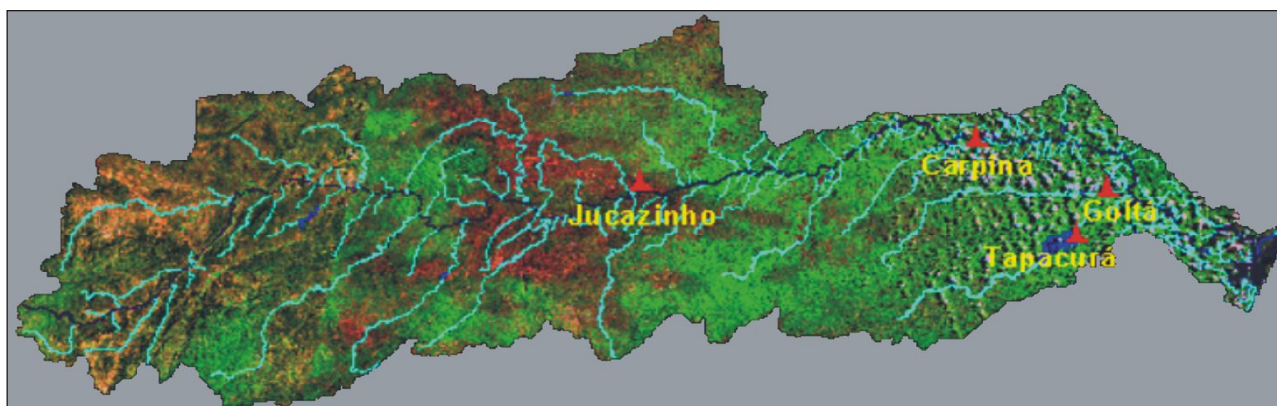


Figura 5. Imagem LANDSAT da bacia do rio Capibaribe com hidrografia principal e barragens para contenção de cheias.

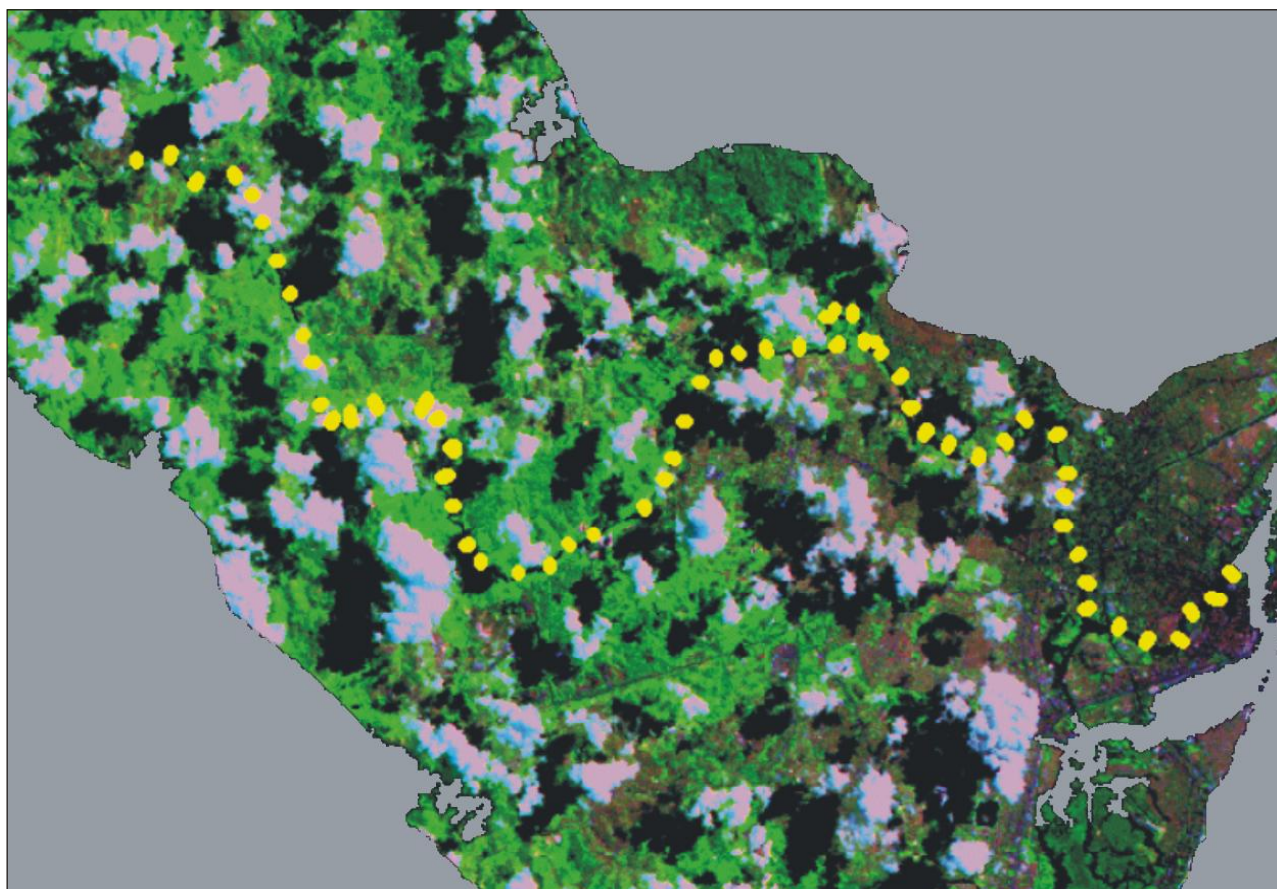


Figura 6. Imagem de satélite LANDSAT com indicação de seções transversais levantadas indicadas por ícones em amarelo.

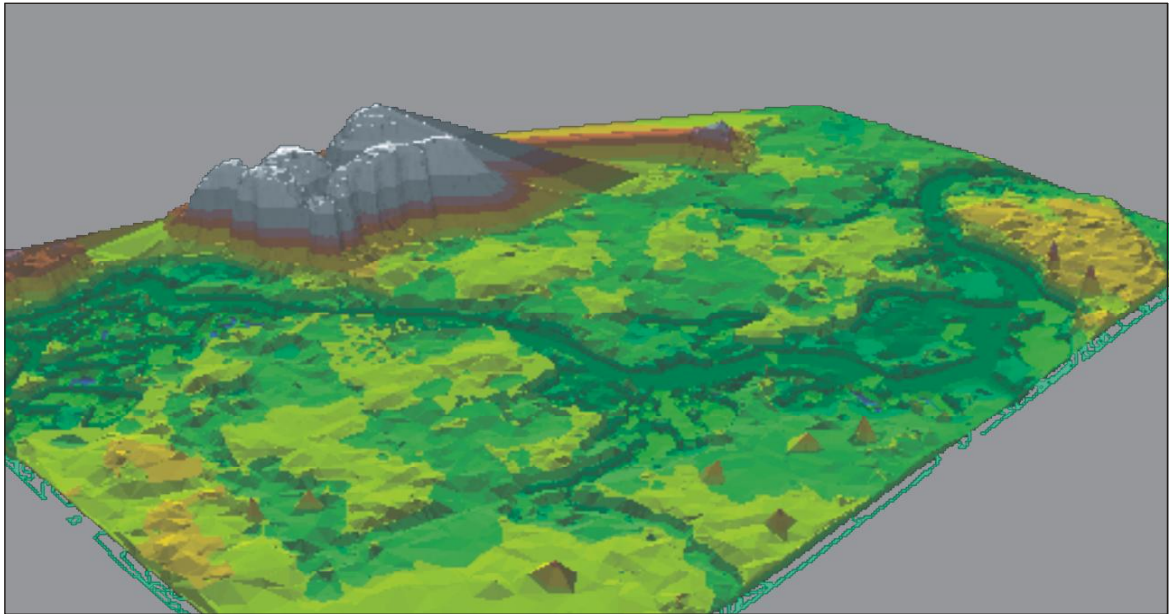


Figura 7. Pequeno trecho do modelo digital de terreno na parte baixa da bacia do rio Capibaribe.

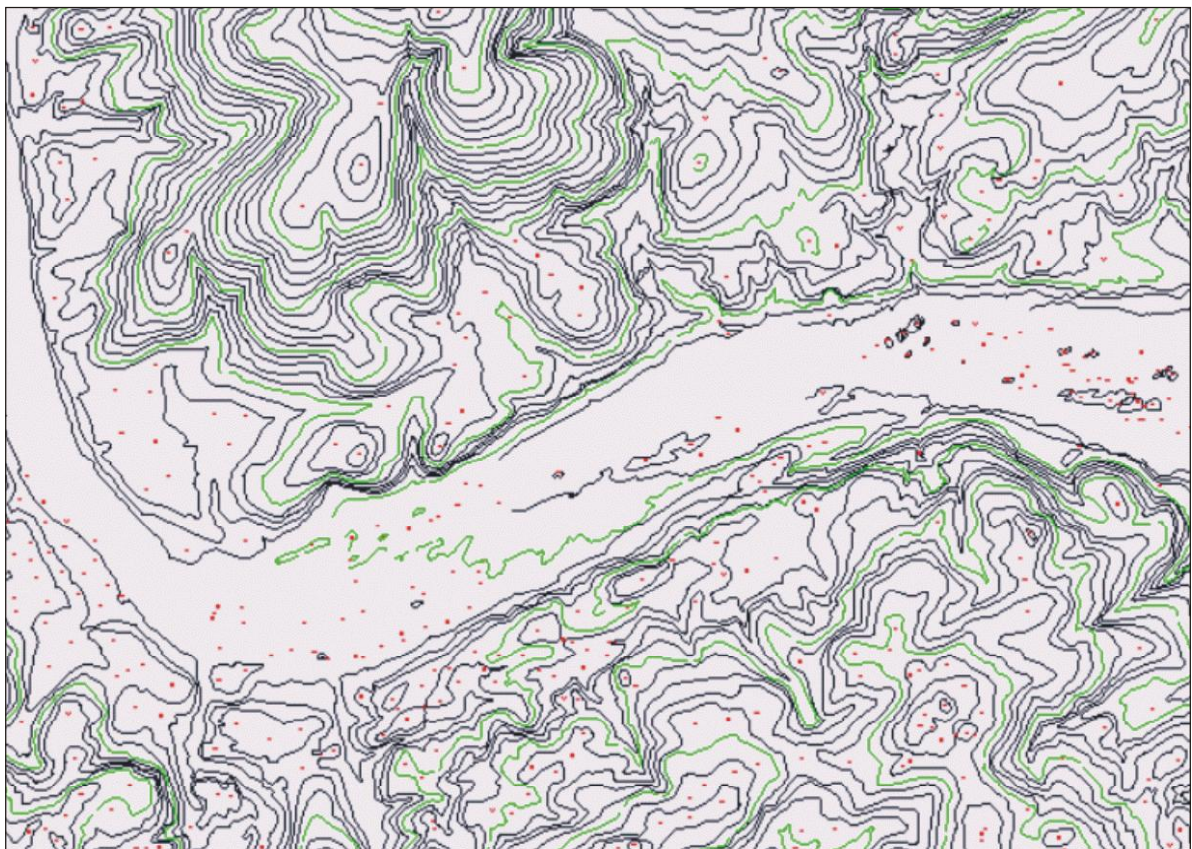


Figura 8. Altimetria - pequeno trecho com destaque em zoom.

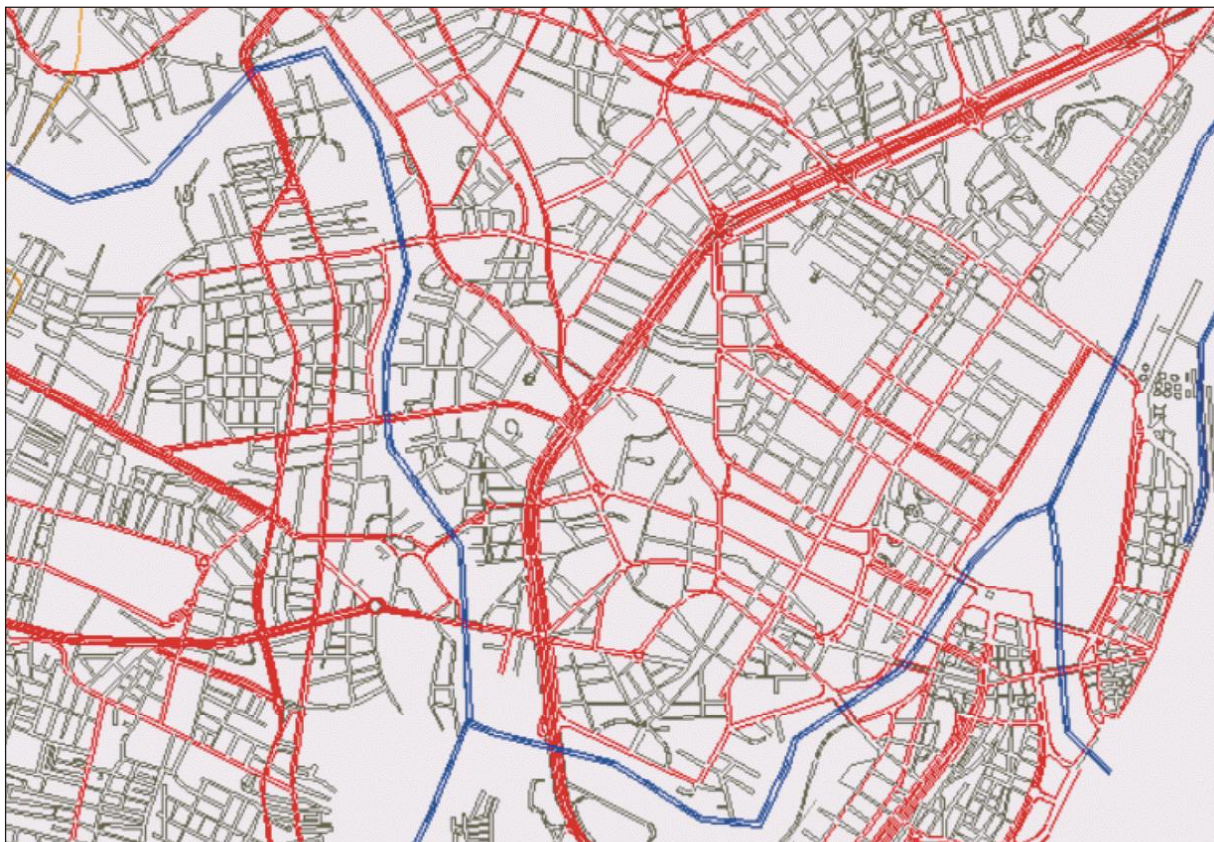


Figura 9. Traçado urbano na foz como exemplo de atributo.

rimétrico, módulo de qualidade d'água, interface para importação de dados, módulo fluviométrico e os modelos de simulação chuva x vazão.

Três eventos de cheia, ocorridos em 1969, 1970 e 1975 são tratados neste artigo.

Dentre esses módulos, foi usado principalmente o que trata de pluviometria, no qual é possível analisar dados e calcular precipitação média em uma determinada região, por meio do método dos polígonos de Thiessen. Modelos chuva-vazão, particularmente o IPH II (Tucci et al., 1981), integrados ao SGI, foram utilizados para recompor os hidrogramas da cheia de 1975, para a qual só há medidas esparsas.

A Figura 10 apresenta os polígonos de Thiessen traçados de forma automática no SGI para a área controlada pelo posto fluviométrico de São Lourenço da Mata e parte da relação dos postos pluviométricos detectados na área da bacia e vizinhança.

PREVISÃO EM TEMPO REAL

Para o treinamento e validação da técnica de redes neurais destinada à previsão em tempo real de cheias no rio Capibaribe, foram utilizados

registros de vazões coletados junto à SUDENE, relativos aos anos de 1969 e 1970, nos postos fluviométricos de Toritama, Limoeiro, Paudalho e São Lourenço da Mata, todos ao longo do Capibaribe, de montante para jusante, juntamente com os dados dos principais afluentes: rio Tapacurá nos postos de Vitória de Santo Antão e Bela Rosa, este próximo à sua foz, e rio Goitá no posto Engenho Sítio, também próximo à foz. Os dados foram levantados e processados a partir de linigramas e interpolados para intervalos de uma hora.

De princípio, buscou-se determinar o tempo médio de viagem do pico de cheia de cada um dos postos até o controle de São Lourenço. Defasando-se os hidrogramas conforme indicado na Figura 11, chegou-se a tempos de 17, 8, 4, 11, 4 e 4 h, na sequência pela qual os postos foram citados. Apenas para o posto de Vitória de Santo Antão houve diferença significativa entre o tempo de viagem no primeiro e no segundo evento de cheia, como se pode observar na Figura 11. Nesta figura, parte do período foi suprimida nos hidrogramas: apenas as vazões nos eventos de cheia estão indicadas.

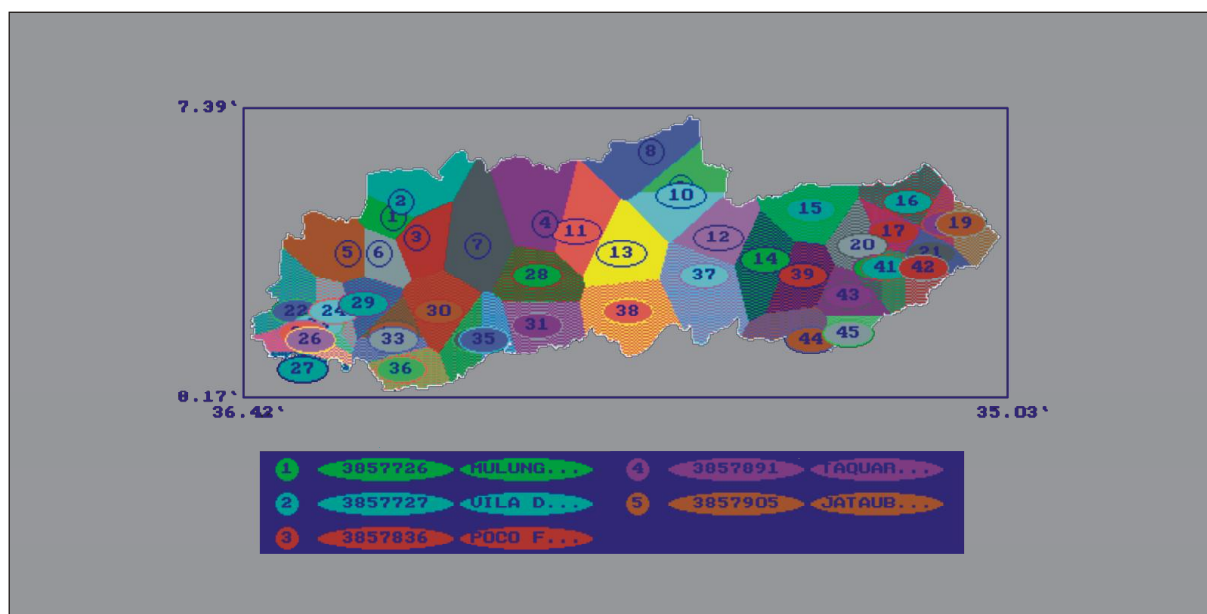


Figura 10. Polígonos de Thiessen para parte da rede pluviométrica da bacia do Capibaribe, área a montante do posto fluviométrico de São Lourenço da Mata.

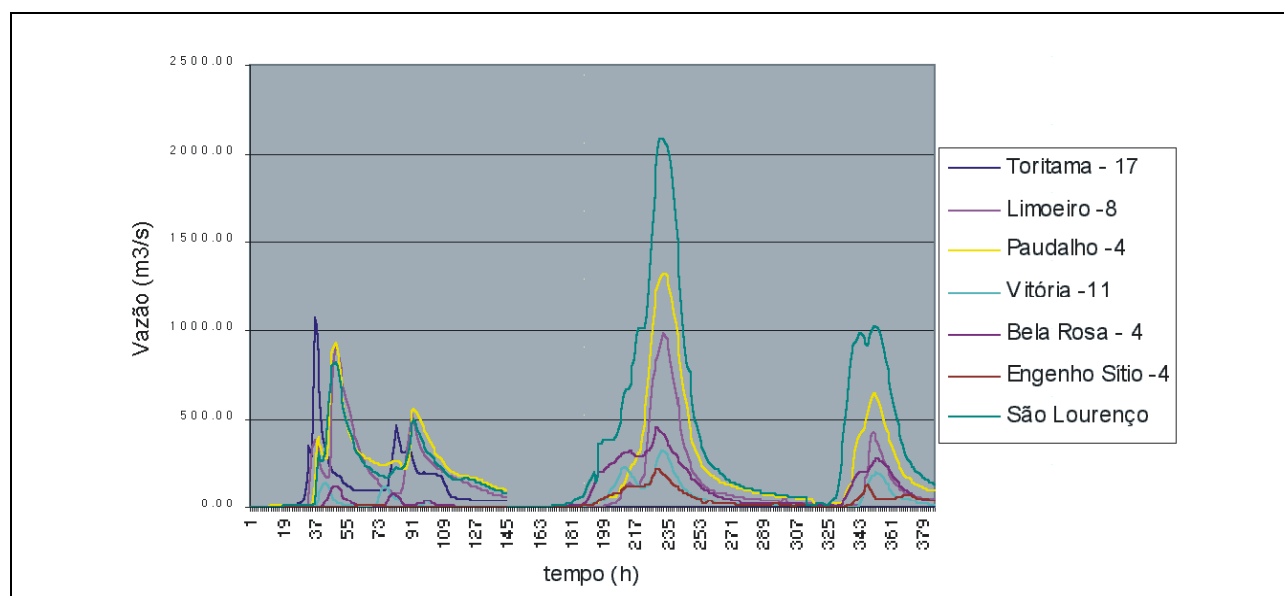


Figura 11. Vazões horárias em dois eventos de cheia (1969 e 1970) defasadas conforme os tempos médios de viagem.

Em caráter tentativo, foram analisadas diversas estruturas de redes neurais com base nas vazões ocorridas nos diversos postos. A vazão em São Lourenço da Mata, em um instante genérico t , foi relacionada a dados ocorridos em instantes $t - i$, com o tempo de antecedência i variando conforme o tempo de viagem da onda de cheia entre os diferentes postos de medição até o posto da entrada da RMR em São Lourenço da Mata. Por exemplo: a previsão da vazão em São Lourenço no instante t

depende, entre outras variáveis, da vazão do rio Tapacurá em Bela Rosa e do rio Goitá em Engenho Sítio no instante $t - 4$.

Na tentativa de incorporar a tendência da vazão incremental, as análises de treinamento e validação consideraram também a vazão do Capibaribe no próprio posto de São Lourenço no instante $t - n$, onde n é o alcance da previsão.

Alguns resultados são representados nas figuras a seguir. A Figura 12 indica o resultado da fase de treinamento (vazão medida e calculada 4 h a frente, no posto de São Lourenço) de uma rede neural cujos neurônios de entrada foram a vazão no Capibaribe no posto de Paudalho e São Lourenço juntamente com as vazões nos afluentes Tapacurá em Bela Rosa e Goitá em Engenho Sítio, todos com 4 h de antecedência. Têm-se assim quatro neurônios de entrada e um de saída, que é a vazão no Capibaribe em São Lourenço no instante de cálculo t . Em todas as estruturas de rede indicadas foram considerados dois neurônios em uma única camada intermediária e todas as conexões possíveis entre os neurônios, bem como a função de transferência sigmóide, a qual apresentou os melhores resultados entre as testadas.

Essa estrutura é particularmente interessante porque os postos escolhidos estão próximos aos locais onde foram construídas as principais barragens.

O evento de 1970, onde as chuvas aconteceram em toda a bacia, a exemplo do ocorrido em 1975, foi escolhido para o treinamento da rede. Na fase de treinamento, os coeficientes de correlação do ajuste estiveram sempre superiores a 0,95.

As Figuras 13 e 14 indicam a validação com os dados das enchentes de 1969 e 1975, com a mesma estrutura de rede neural. A série de vazões associada à enchente de 1975, como já foi citado, foi recomposta com o auxílio das precipitações ocorridas na bacia e do modelo IPH II, validada por observações e estimativas, visto que o evento não foi adequadamente monitorado.

A Figura 15 representa a fase de validação com uma estrutura de rede composta por três neurônios de entrada: dados das séries históricas de vazões nos postos do rio Capibaribe em Limoeiro e em São Lourenço, com 8 h de antecedência, e no posto do rio Tapacurá em Vitória, com 11 h de antecedência. Assim, a previsão é feita 8 h à frente.

É importante ressaltar que os dados utilizados neste estudo são anteriores à construção das quatro barragens que hoje compõem o sistema de proteção contra as cheias na bacia, constituindo-se assim em vazões naturais.

Conforme se pode observar nas validações apresentadas e com base nos seus indicadores de erro, os resultados da previsão são bastante animadores para o emprego da técnica de redes neurais.

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DAS BARRAGENS

A análise apresentada anteriormente não retrata a situação atual, em que quatro barragens devem operar na função de controle de cheias, além de abastecimento, no caso de Tapacurá e Jucazinho.

Seis cenários para análise foram desenvolvidos:

1. Afluência a Jucazinho, a partir das vazões registradas no posto de Toritama, a montante.
2. Afluência a Carpina, a partir da defluência adotada para Jucazinho.
3. Afluência a Carpina, a partir da defluência de Jucazinho e das observações no posto intermediário de Limoeiro.
4. Afluência a Tapacurá, a partir do posto do rio do mesmo nome em Vitória de Santo Antão, a montante.
5. Afluência a Goitá, por correlação com o posto do rio Tapacurá em Vitória.
6. Previsão das vazões no Capibaribe em São Lourenço, a partir da defluência das barragens de Carpina, Goitá e Tapacurá.

Observe-se que o cenário 5 estabelece correlação entre bacias vizinhas, visto que não há ainda posto implantado no rio Goitá a montante da barragem de mesmo nome, utilizando-se assim os dados do posto do rio Tapacurá em Vitória de Santo Antão.

Os dados de vazão nos locais onde foram implantadas as barragens foram interpolados a partir dos dados registrados nas estações a montante e a jusante. Essa interpolação foi baseada na distância ao longo do rio, no tempo de viagem estimado e na parcela de área da bacia de contribuição controlada pela barragem.

As Figuras 16 a 20 apresentadas a seguir representam validações para os cenários enumerados.

Esses cenários permitem, assim, a simulação da operação dos reservatórios para o controle de cheias na bacia em tempo real, com a antecedência máxima possível face ao tempo de propagação dos eventos na calha fluvial. Como exemplo, a Figura 21 apresenta a enchente reproduzida para 1975, no posto de São Lourenço da Mata, e o que teria acontecido se todas as barragens estivessem em operação restando a metade da vazão afluente a cada uma delas.

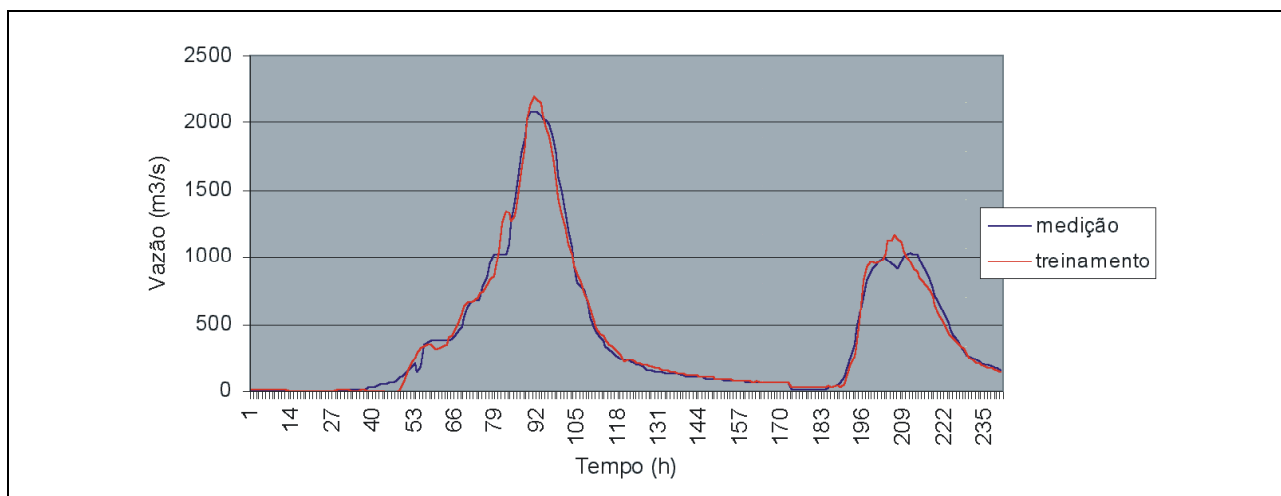


Figura 12. Vazões registradas e calculadas para o posto de São Lourenço 4 h a frente: treinamento da rede com os dados da cheia de 1970.

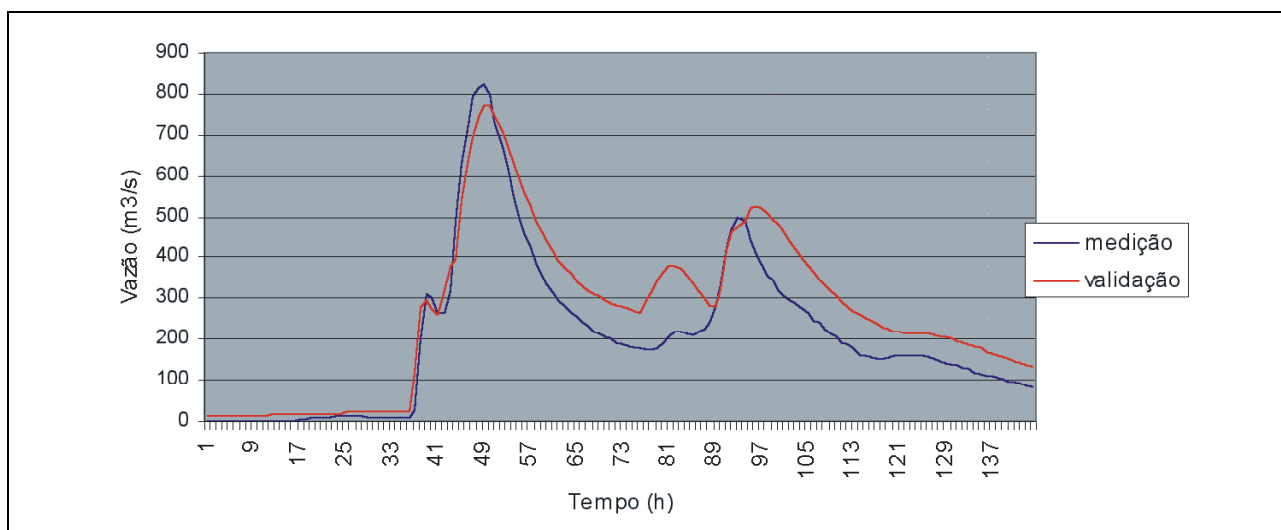


Figura 13. Validação para a cheia de 1969 - hidrogramas em São Lourenço da Mata, previsão com 4 h de antecedência.

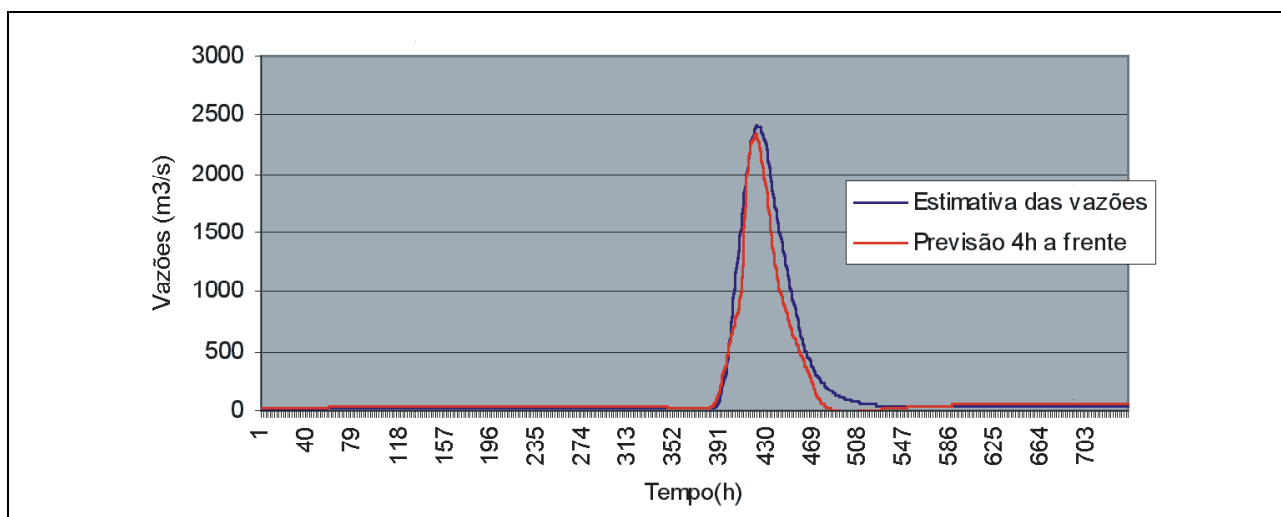


Figura 14. Validação para a cheia de 1975, ainda em São Lourenço.

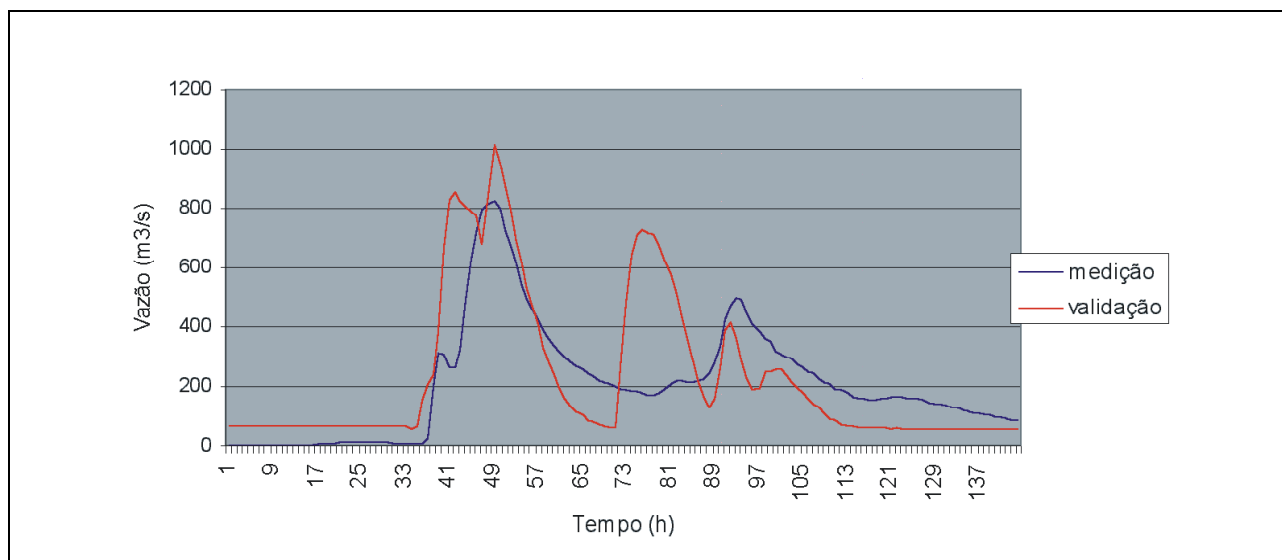


Figura 15. Previsão em São Lourenço a partir das vazões dos postos de Limoeiro e Vitória, com 8 h de antecedência.

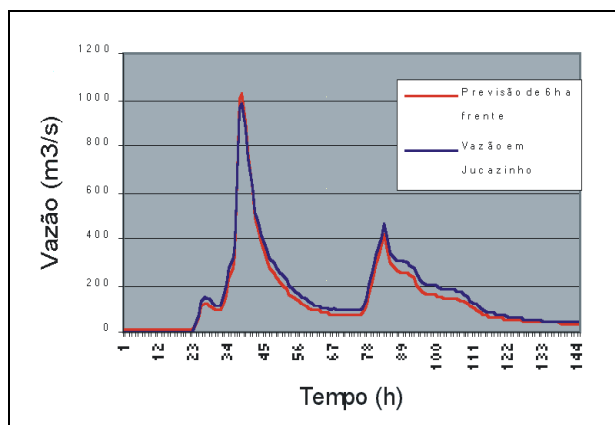


Figura 16. Validação para o cenário 1: afluência ao local da Barragem de Jucazinho, 1969.

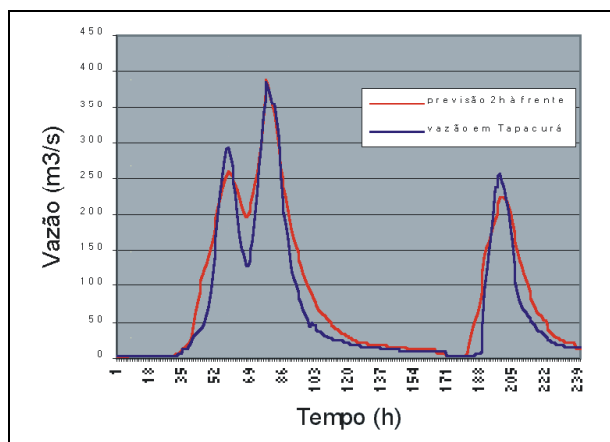


Figura 18. Validação para o cenário 4: afluência ao local da Barragem de Tapacurá, 1969.

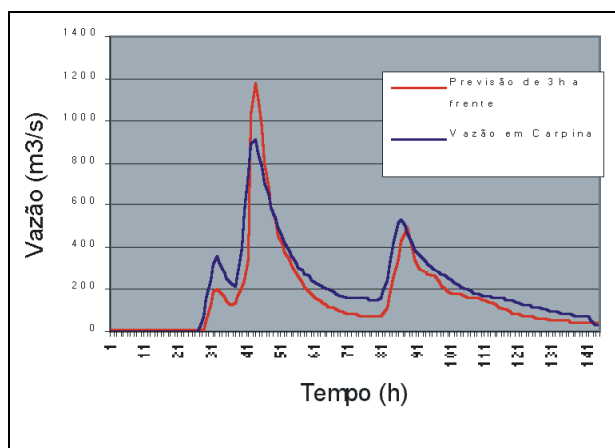


Figura 17. Validação para o cenário 3: afluência ao local da Barragem de Carpina, 1969.

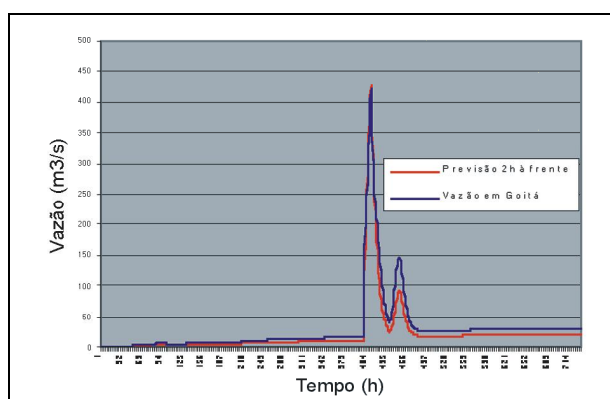


Figura 19. Validação para o cenário 5: afluência ao local da Barragem de Goitá, 1975.

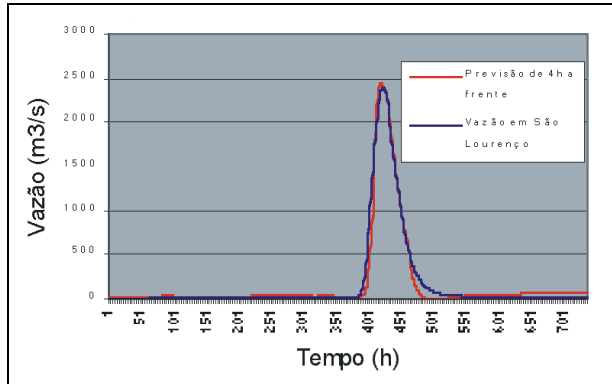


Figura 20. Validação para o cenário 6: vazão em São Lourenço da Mata, 1975.

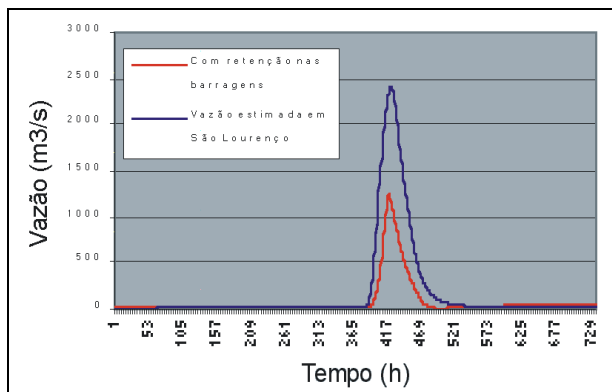


Figura 21. Estimativa das vazões ocorridas em 1975 para o posto de São Lourenço da Mata e na hipótese de retenção de 50% da vazão afluente a cada barragem.

SIMULAÇÃO DO ESCOAMENTO NA CALHA FLUVIAL E PLANÍCIE DE INUNDAÇÃO

Uma vez avaliada a dimensão da cheia que se aproximaria da Região Metropolitana de Recife, restaria a avaliação dos seus impactos, definindo-se as zonas alagáveis.

Para a utilização do modelo HEC - RAS, foi estruturada toda a base de dados requerida, como informações da geometria do rio principal e das seções transversais, obtidas no levantamento topobatimétrico e do modelo digital do terreno. O parâmetro de atrito de Manning foi estimado entre 0,03 e 0,035, conforme as características dos diferentes trechos, e a declividade do rio foi fixada em 0.0007 m/m (Barros, 1979).

Os níveis registrados na tábua de marés referem-se no caso em estudo ao Porto do Recife. Esses valores devem ser convertidos para o RN - referência de nível do IBGE - Instituto Brasileiro de



Figura 22. Seção de jusante, ponte Princesa Isabel.



Figura 23. Seção intermediária com escombros de ponte caída sobre o rio.

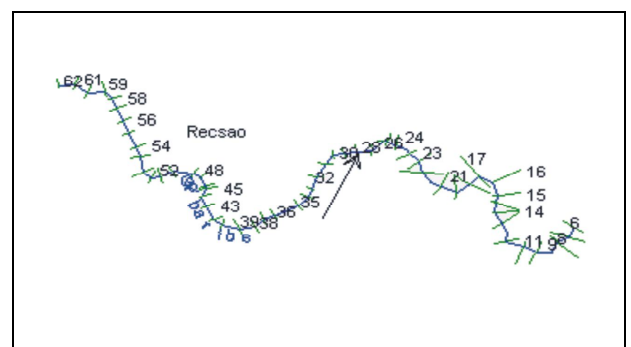


Figura 24. Discretização da geometria do trecho em estudo.

Geografia e Estatística. A CPRH (1992) - Companhia Pernambucana do Meio Ambiente, desenvolveu através de observações uma relação entre a tábua das marés e o RN do IBGE.

$$RN = TM - 0.8 \text{ (erro de } \pm 0,05 \text{ m)}$$

onde RN é a referência de nível e; TM o nível registrado na tábua das marés.

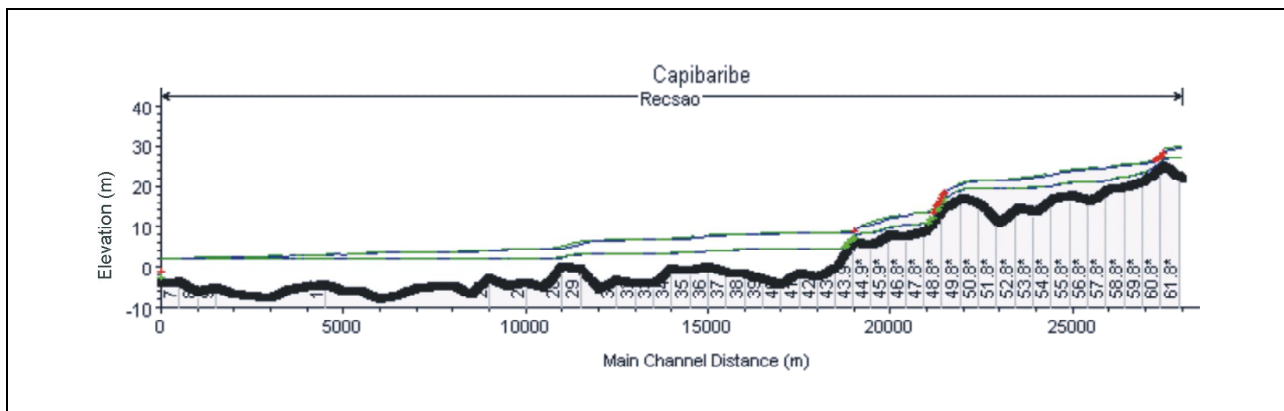


Figura 25. Exemplo de dois perfis simulados.

Com esta correção, todos os valores de cota, sejam ao longo do rio, sejam relativos ao terreno, passam a se referir ao mesmo referencial.

O HEC - RAS, em sua versão 2.0, permite que sejam introduzidos dados de geometria em três dimensões e georreferenciados. Esta capacidade torna possível a importação e exportação de arquivos entre o modelo e *software* tipo CAD e GIS, facilitando a entrada e saída de dados e conseqüentemente a avaliação dos impactos da inundação. A etapa de definição da geometria é naturalmente de máxima importância, visto que quanto melhor esta for representada melhores serão os resultados obtidos do programa.

A discretização levou a 59 seções transversais, numeradas de jusante para montante. A seção de controle a montante está localizada no posto fluviométrico de São Lourenço da Mata e a seção de jusante, localizada na ponte Princesa Isabel, praticamente na foz do rio.

A Figura 22 apresenta uma foto da seção de jusante e a Figura 23 uma seção intermediária, pouco mais afastada da maior concentração urbana.

A Figura 24 mostra esquema da geometria do trecho em estudo.

Como foi explicitado anteriormente, o HEC - RAS não realiza simulações de escoamento não permanente diretamente. Isso é estimado simulando-se sucessivos perfis estacionários como retratos instantâneos do escoamento, sendo esses diferentes entre si.

A título de exemplo, apresentam-se a seguir resultados obtidos com o HEC - RAS utilizando-se como exemplos duas simulações: uma com vazão na calha de 100 m³/s e outra com 1000 m³/s. Os dois perfis obtidos são visualizados na Figura 25. O HEC - RAS também permite uma visualização dos resulta-

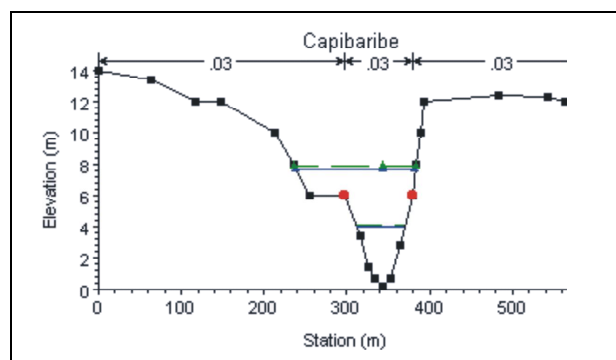


Figura 26. Área molhada - seção 36.

dos em 3 dimensões, o que possibilita a identificação das áreas em que houve transbordamento.

A jusante foi suposta uma cota de maré de 1.7 m (RN IBGE).

Uma outra forma de visualizar os resultados é apresentada na Figura 26, onde são indicados os níveis d'água na seção transversal para as duas simulações em uma seção qualquer.

MONTAGEM DO SIG

O ArcView foi o *software* de geoprocessamento escolhido para a montagem do SIG. Esse programa trabalha com extensões que funcionam como módulos adicionais, fornecendo funções especiais ao ambiente GIS. É fornecido com várias extensões, e outras são adquiridas separadamente, como é o caso da Spatial Analyst e 3D Analyst. A extensão AVRas proporciona a comunicação entre o ArcView e o HEC - RAS. Ao ser acionada esta última extensão, tornam-se disponíveis novas funções ou ferramentas inerentes ao "sistema convidado".

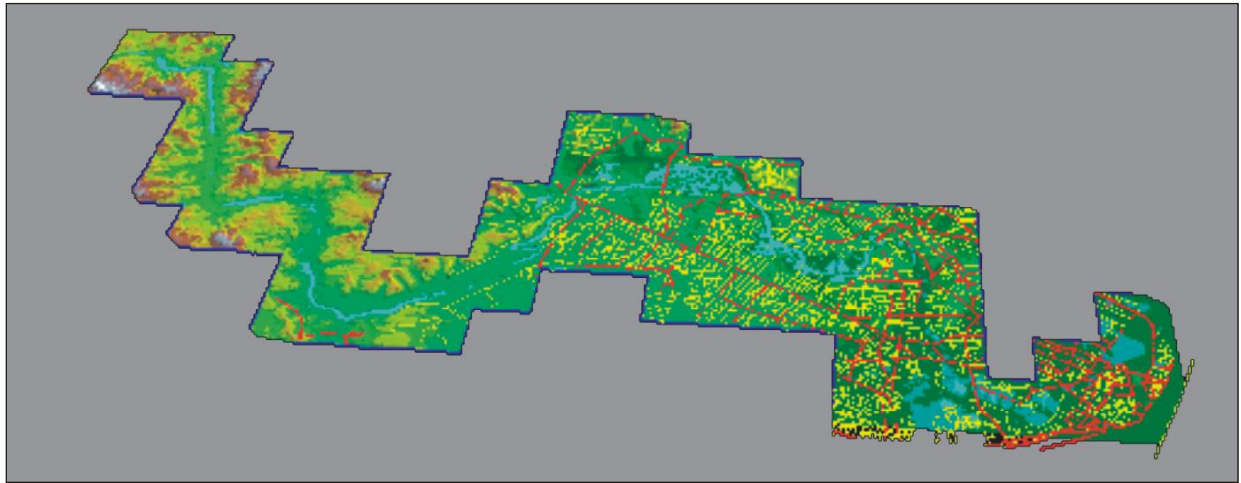


Figura 27. Planície de inundação para vazão de 700 m³/s sobre o MDT e as principais vias urbanas de Recife.

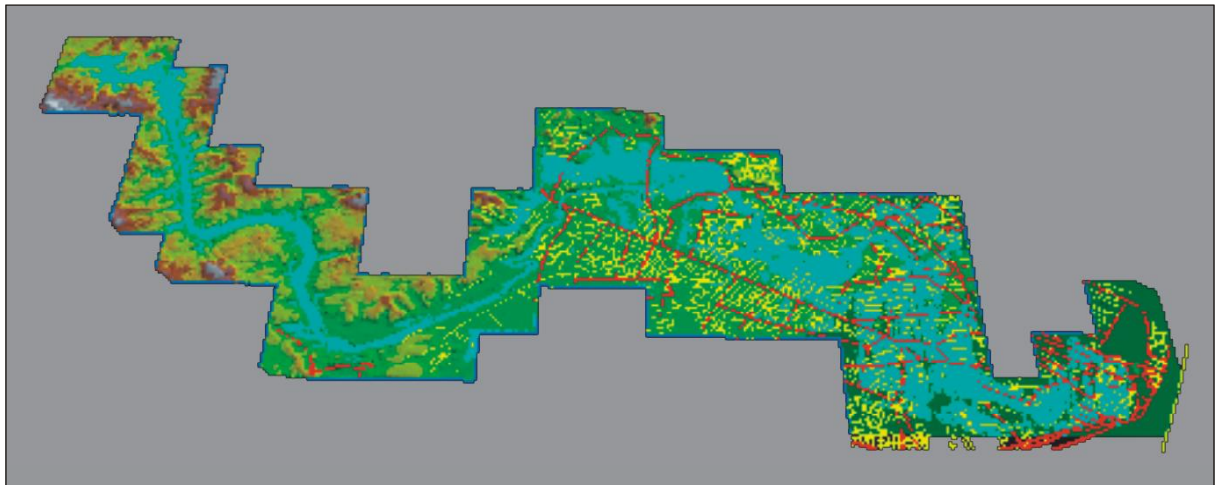


Figura 28. Planície de inundação para vazão de 3400 m³/s em 3 dimensões, sobre o modelo digital do terreno e as ruas da região adjacente ao rio Capibaribe.

A extensão AVRas possibilita a criação de um mapa digital de áreas inundáveis, fazendo a comunicação entre o *software* ArcView e o modelo utilizado para o cálculo dos perfis de escoamento, o HEC - RAS. Essa extensão, desenvolvida pelo Engenheiro da ESRI, Dean Djokic, necessita para o seu funcionamento da presença das extensões citadas anteriormente, 3D Analyst e Spatial Analyst. Seu funcionamento pode ser dividido em duas etapas: a primeira, de pré-processamento, corresponde a um conjunto de procedimentos e funções que permitem a preparação de dados para entrada no programa HEC - RAS. A segunda etapa, de pós-processamento, permite o delineamento da planície de inundação a partir de resultados fornecidos pelo HEC -

RAS e a geração de dados para o ambiente GIS (Kruger, 1999).

O objetivo do segundo módulo é o de automatizar o delineamento da planície de inundação, o que requer a conversão do TIN, representação de superfícies através de uma malha de triângulos não superpostos e contíguos que representa o terreno, e do TIN da superfície líquida em *grids*. Os dois *grids* são comparados e os locais onde a superfície líquida se apresenta com elevação superior à do terreno definem a área inundada. O *grid* da área inundada é convertido em um tema do tipo polígono, que é o resultado final do cálculo.

Para que fosse possível trabalhar todo o processo em um mesmo ambiente, os programas

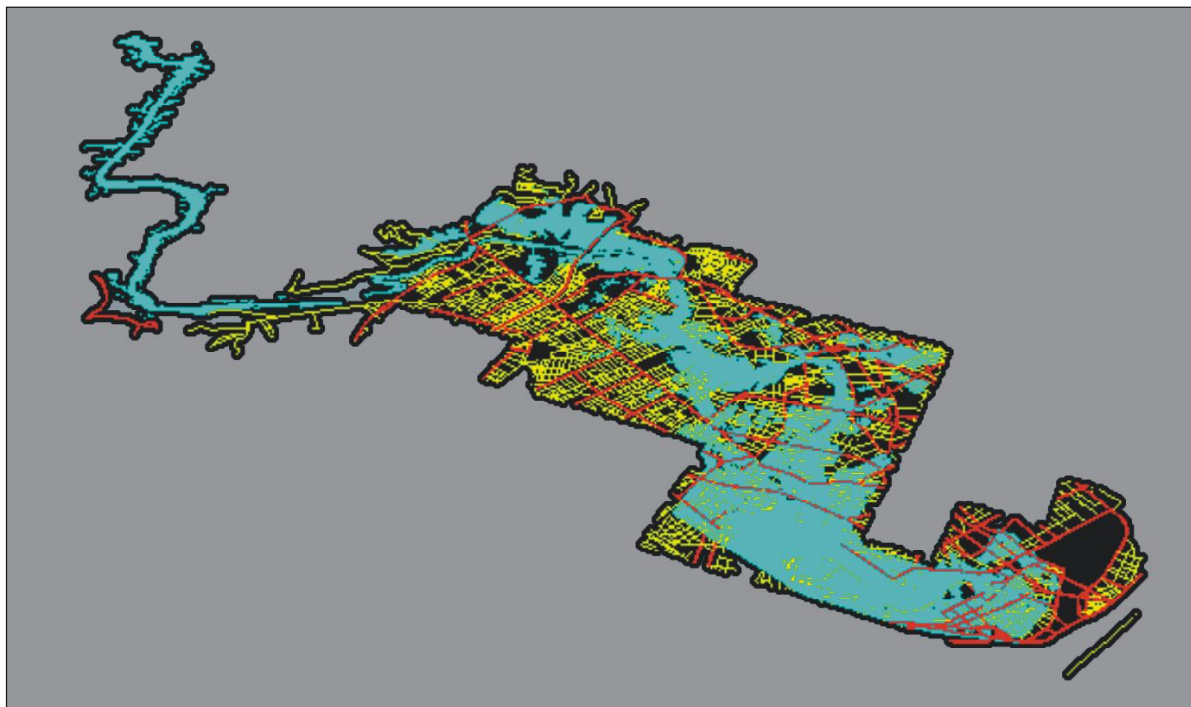


Figura 29. Representação da área alagada simulada para a vazão de $3400 \text{ m}^3/\text{s}$ sobre ruas da cidade.

que compõem o sistema foram acoplados ao ArcView. Para tanto foram adicionados à tela principal do ArcView botões de atalho para o acionamento dos programas em questão, no caso o Programa de Redes Neurais e o HEC - RAS - Módulo de Simulação Hidrodinâmica.

SIMULAÇÕES DA ÁREA INUNDÁVEL

A primeira avaliação feita buscou definir a capacidade da calha principal do rio, sem transbordamento, na condição da geometria atual. Para tanto foram analisadas diferentes vazões e várias condições de maré.

Os resultados obtidos para uma vazão de $700 \text{ m}^3/\text{s}$, que é tida em vários relatórios como a capacidade de suporte da calha, e maré na condição máxima de 1,7 m, relativa ao IBGE, podem ser visualizados na Figura 27.

Observando os resultados, o modelo apresentou transbordamentos de pequena monta em áreas importantes da cidade, como por exemplo parte dos bairros de Coelhos, Poço da Panela, Casa Forte e Dois Irmãos.

As cartas altimétricas fornecidas pela FIDEM para a geração do MDT - modelo digital do terreno foram finalizadas em 1977, com fotos tiradas entre os anos de 1974 e 1975, anteriores à retificação ocorrida em trecho intermediário da calha do rio. Isso acarreta uma certa discrepância quando lançados os resultados sobre o mapa da cidade e sobre imagens de satélite, visto que todos os cálculos são realizados de acordo com o MDT.

A cheia de 1975, já estudada, teve sua vazão de pico estimada em $3.400 \text{ m}^3/\text{s}$, em função da chuva intensa no perímetro urbano de Recife a jusante do controle de São Lourenço da Mata, o que corresponde a um incremento da ordem de 30%. Essa vazão foi também simulada numa tentativa de reconstituir tal evento. O nível máximo de maré no evento da cheia foi de 1.7 m (RN IBGE).

Os resultados obtidos são mostrados nas Figuras 28 a 32, projetadas sobre diferentes níveis de informações.

A Figura 31 apresenta trecho da cidade de Recife em que é comparada a zona indicada pelo modelo como inundável (em azul) para a vazão citada e a linha de cheia avaliada pela SUDENE (1975).

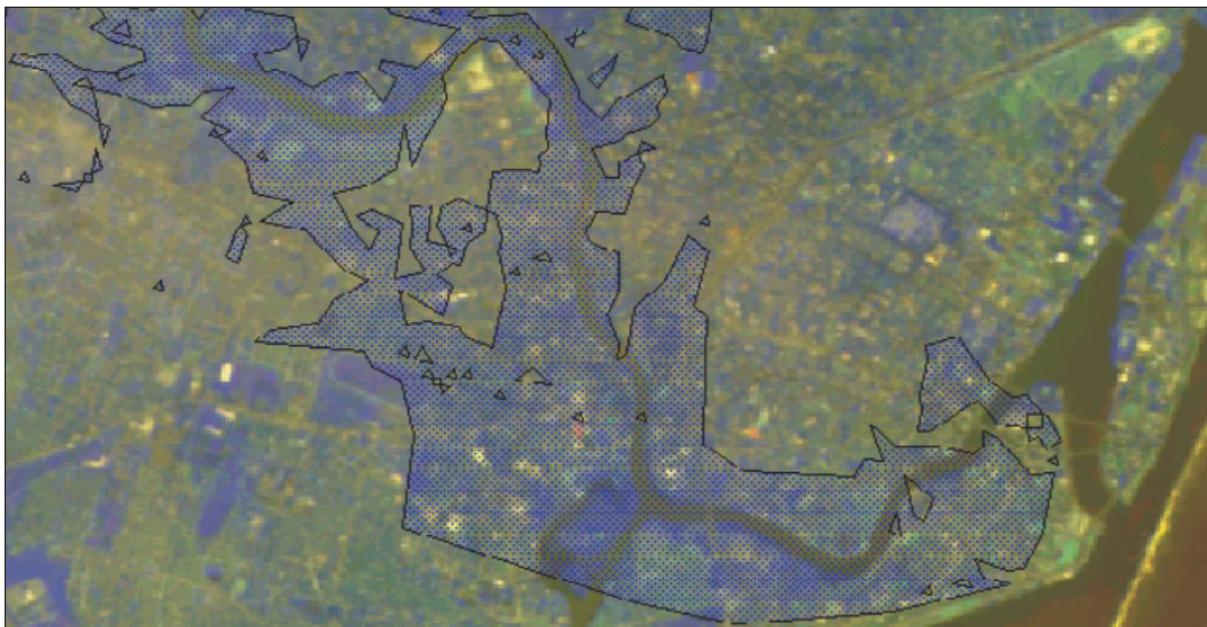


Figura 30. Resultado da inundação sobre imagem SPOT em parte da cidade mais próxima à foz.

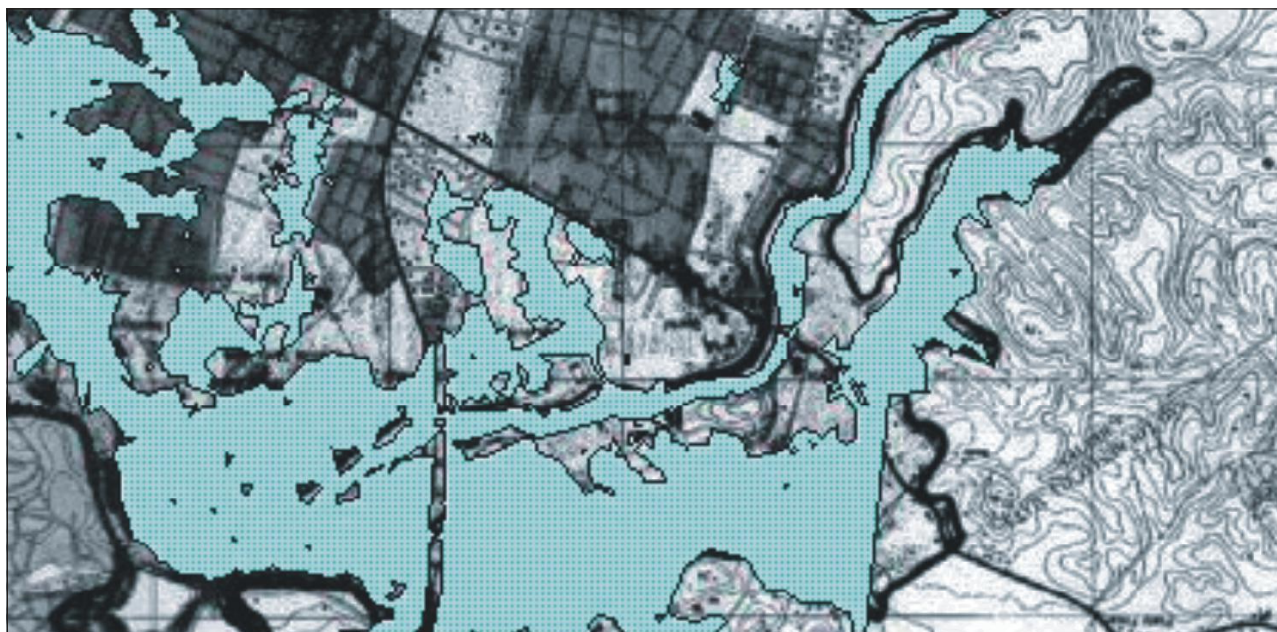


Figura 31. Comparação de parte da área inundável com a linha de cheia (contorno escuro) levantada após o evento de 1975.

Não houve ainda o ajuste esperado em diversas áreas, devendo-se considerar:

- A ausência de cartas que completem toda a região na formação do Modelo Digital do Terreno usado no modelo; digitalização complementar deverá ser feita.
- Houve contribuição de outros rios estuários na cheia além do Capibaribe.
- Por se tratar de uma planície muito baixa, o espaçamento entre as curvas de nível ainda não é satisfatório na parte mais baixa.
- A linha de cheia levantada em campo está também sujeita a imprecisões.

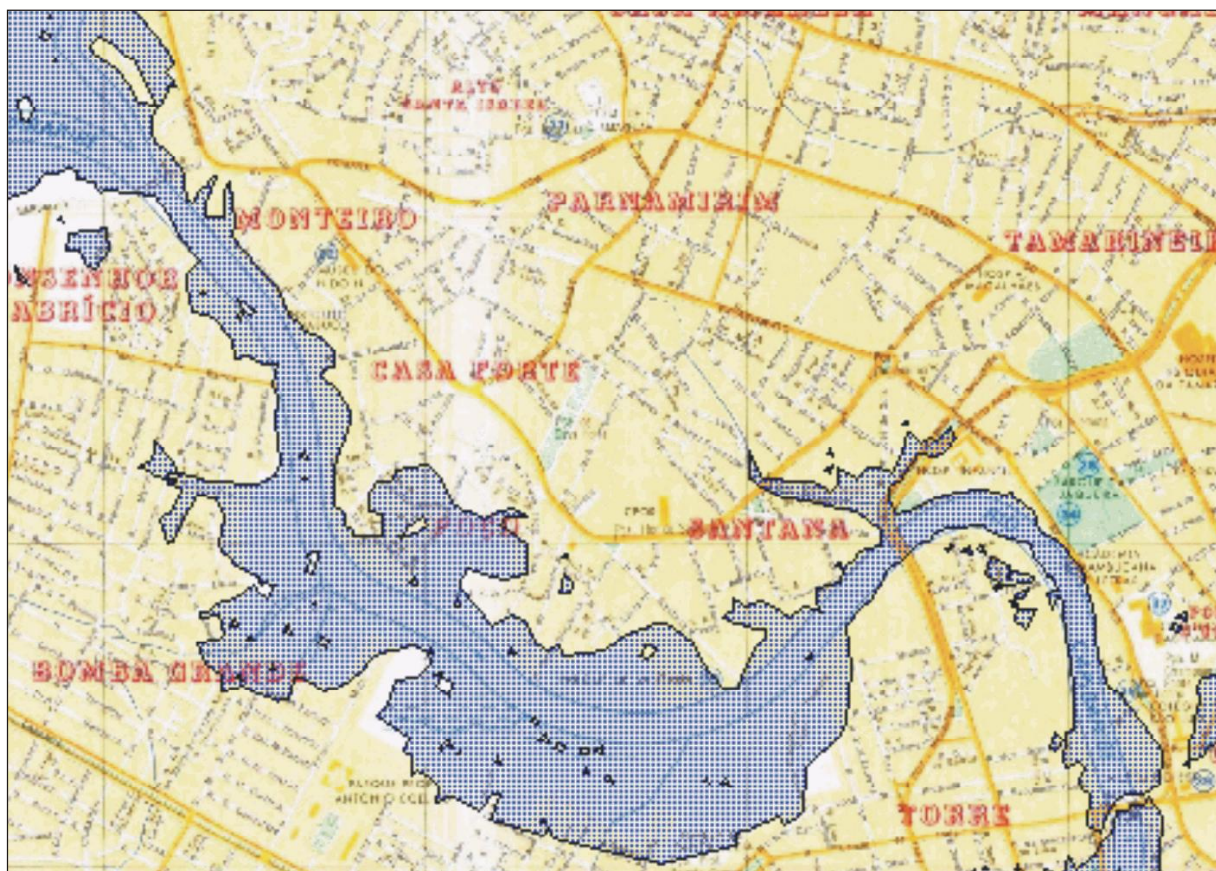


Figura 32. Simulação da área inundável sobre trecho do mapa da cidade de Recife.

CONCLUSÕES

O sistema aqui desenvolvido tem como seu principal objetivo o controle e a previsão de inundações, seja em tempo real, seja nas atividades de planejamento. Como estudo de caso tratou-se da previsão e controle de cheias em tempo real no rio Capibaribe em Pernambuco.

O desenvolvimento da metodologia deu origem a um SSD – Sistema de Suporte à Decisão, capaz de apresentar resultados com precisão aceitável. O sistema tem, além disso, as ferramentas necessárias para planejamento das ações na calha fluvial e na bacia como um todo.

Foram empregados modelos matemáticos para a simulação do escoamento, compatíveis com as premissas de agilidade na análise e decisão. O objetivo central do trabalho, de prever as vazões de chegada à cidade e visualizar a possível inundação sobre mapa de ruas, foi alcançado de forma satisfatória. Apesar dos bons resultados alcançados, há no entanto ajustes a fazer, tanto no MDT como no monitoramento, a nível pelo menos horário, dos rios e barragens e da precipitação na bacia, de forma a se

dispor de dados mais atuais para reavaliar constantemente os resultados e efetivamente gerar um processo seguro de controle de cheias na bacia.

Esse sistema poderá auxiliar os órgãos de Defesa Civil do Estado e de operação dos reservatórios a adotarem as medidas que minimizem os efeitos de enchentes e alertarem em tempo hábil a população, em caso de inundações.

AGRADECIMENTOS

Às Secretarias de Ciência, Tecnologia e Meio Ambiente e posteriormente de Recursos Hídricos do Estado de Pernambuco, que, juntamente com o PROÁGUA Semi-árido da Secretaria de Recursos Hídricos do Ministério do Meio Ambiente, proporcionaram os recursos necessários para o desenvolvimento deste estudo; à FINEP – Financiadora de Estudos e Projetos, por meio do Programa REHIDRO, pelo suporte à pesquisa; e ao Dr. Dean Djokic, Engenheiro da ESRI, pelo fornecimento da extensão AVRas 2.2.

REFERÊNCIAS

- ASFORA, M. C.; ROLIM, A. L.; BALTAR, A. M. e CIRILO, J. A. (1996). *Utilização do Sistema Gerencial de Informações Hidrológicas do Estado de Pernambuco*. 3º Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, Salvador, BA, p. 67-74.
- BARROS, M. C. (1979). *Verificação do Grau de Proteção do Plano de Controle de Enchentes do Governo Federal, Bacia do Capibaribe - Pernambuco*. Tese de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Instituto de Pesquisas Hidráulicas.
- CIRILO, J. A. (1991). *Análise dos Processos Hidrológico-Hidrodinâmicos na Bacia do Rio São Francisco*. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- CIRILO, J. A.; BALTAR, A. M.; ROLIM, A. L. e TORRES, C. O. (1997). Processamento Integrado de Dados para Análise Hidrológica. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, vol. 2 n°1 jan/jun, p. 15-28.
- CIRILO, J. A.; SAMPAIO Jr, R. A.; AGRA, M. C. M.; CUNHA, F. A. G. C. e TORRES, C. O. (1997). Sistema de Informações de Recursos Hídricos do Estado de Pernambuco: Subsistema de Informação ao Usuário. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, vol. 2 n°1, jan/jun, p. 29 a 43.
- CPRH - COMPANHIA PERNAMBUCANA DO MEIO AMBIENTE (1992). *Projeto Capibaribe - Um Estudo do Estuário. Vol. 3 - Aspectos Físicos e Biológicos*.
- HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER (1995). *UNET - One - Dimensional Unsteady Flow Through a Full Network of Open Channels, User's Manual*, US Army Corps of Engineers, Davis, CA.
- HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER (1997). *HEC - RAS - River Analysis System, User's Manual*, US Army Corps of Engineers, Davis, CA.
- KRÜGER, C. M.; CAMARGO, A. S. G. e GARCIA, K. S. (1999). *Mapeamento Automático de Áreas Inundáveis Através de Geoprocessamento - Aplicação à Cidade de União da Vitória*. XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Belo Horizonte, MG.
- OSTROWSKY, M. S. B. (2000). *Sistemática Integrada para Controle de Inundações em Sub-Bacias Hidrográficas Urbanas. Estudo de Caso: A Bacia do Córrego Pirajucara*. Tese de Doutorado, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo. São Paulo, SP.
- PINHEIRO, M. C. (2000). *Modelação Matemática do Escoamento e Caracterização Geométrica da Morfologia Fluvial: Subsídios para Navegação e a Operação de Reservatórios*, Tese de Doutorado, COPPE / UFRJ, Rio de Janeiro.
- PRICE, M. (1999). *Terrain Modeling with ArcView 3D Analyst, ArcUser*, Janeiro - Março.
- ROMÃO, V. M. C. (1998). *Apostila do Departamento de Engenharia Cartográfica da Universidade Federal de Pernambuco "Sistema de Posicionamento Global (GPS)"*, Recife, PE.
- SECTMA - SECRETARIA DE CIÊNCIA, TECNOLOGIA E MEIO AMBIENTE DO ESTADO DE PERNAMBUCO (1998). *Plano Estadual de Recursos Hídricos*. Recife, PE.
- SHARMA, K. D., SINGH, S., SINGH, N., & KALLA, A. K. (1989). Role of Satellite Remote Sensing for Monitoring of Surface Water Resources in an Arid Environment, *Hydrological Sciences - Journal*, India.
- SUDENE - Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste (1995). *Programa Especial para Controle das Enchentes no Recife - Estado de Pernambuco*.
- TUCCI, C. E. M.; SANCHEZ, J. e SIMÕES LOPES, J. (1981). *Modelo IPH II de Simulação Precipitação-Vazão na Bacia: Alguns Resultados*. IV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Fortaleza, CE.
- VALENÇA, M. J. (1999). *Análise e Projeto de Redes Neurais com Abordagem Construtiva para Modelagem de Sistemas Complexos*. Tese de Doutorado, Departamento de Informática, UFPE. Recife, PE.
- VALENÇA, M. J. S. e LUDERMIR, T. B. (1999). *Introdução às Redes Neurais, Sistemas Inteligentes - Aplicações a Recursos Hídricos e Ciências Ambientais*, cap. 1, ABRH.

Decision Support System for Flood Analysis, Forecasting and Control

ABSTRACT

This work deals with a real time support system for forecast and flood control using runoff hydrodynamic simulation modeling associated with geoprocess techniques.

Capibaribe River's basin, in Pernambuco, is used as case study.

The system was based in geoprocess software like ArcView and extensions ArcView 3D Analyst, ArcView Spatial Analyst and AVRas, this last one responsible for the communication between ArcView and the hydrodynamic simulation modeling HEC - RAS.

The system foresees two kind of analysis: planning and real time operation. The planning analysis can be made starting from data of well-known flow, or still using rain-runoff simulation modeling. To real time forecasting the system has a program starting from the methodology of neural network. The results of this analysis are the river flow close to RMR (Metropolitan Area of Recife) entrance. These flow gage station data are upstream boundary condition for the hydrodynamic simulation model, with tide levels as downstream boundary condition. GIS allows automatic evaluation of the areas which could be flooded and throws these areas on city maps and on satellite images, SPOT and LANDSAT, facilitating a fast diagnosis and definition of the actions to be implemented.

Keywords: forecast; geoprocess; neural networks.