

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
DOUTORADO EM ENGENHARIA CIVIL
ÁREA DE RECURSOS HÍDRICOS E TECNOLOGIA AMBIENTAL**

**SIMULAÇÃO HIDRÁULICO-HIDROLÓGICA DO ESCOAMENTO EM REDES
COMPLEXAS DE RIOS URBANOS: SUPORTE DE INFORMAÇÕES ESPACIAIS DE
ALTA RESOLUÇÃO**

TESE

Submetida à Universidade Federal de Pernambuco
Como parte dos requisitos para obtenção do grau de

Doutor em Engenharia Civil

**AUTORA: ROBERTA GUEDES ALCOFORADO
ORIENTADOR: JOSÉ ALMIR CIRILO**

RECIFE, JULHO DE 2006

A354s Alcoforado, Roberta Guedes

Simulação hidráulico-hidrológica do escoamento em redes complexas de rios urbanos: suporte de informações espaciais de alta resolução / Roberta Guedes Alcoforado. – Recife: O Autor, 2006.

139 p., il. color., gráfs., tabs. + 1 cd-rom (anexos)

Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Depto. de Engenharia Civil, 2006.

Inclui bibliografia e anexos.

1. Engenharia Civil. 2. Hidráulica. 3. Simulação Hidrodinâmica. 4. Geoprocessamento. I. Título.

624 CDD (22.ed.)

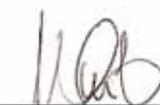
BCTG/2006-99

**SIMULAÇÃO HIDRÁULICO-HIDROLÓGICA DO ESCOAMENTO EM REDES
COMPLEXAS DE RIOS URBANOS: SUPORTE DE INFORMAÇÕES
ESPACIAIS DE ALTA RESOLUÇÃO**

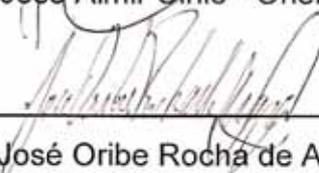
ROBERTA GUEDES ALCOFORADO

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS
GRADUAÇÃO DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO COMO
PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS DA OBTENÇÃO DO GRAU DE
DOUTORA EM CIÊNCIA EM ENGENHARIA CIVIL

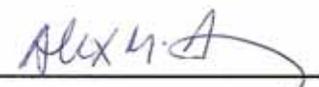
Aprovado por:



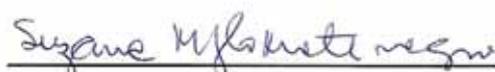
Prof. Dr. José Almir Cirilo - Orientador



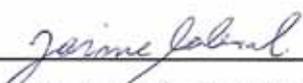
Prof. Dr. José Oribe Rocha de Aragão



Prof. Dr. Alex Maurício Araújo



Profa. Dra. Suzana Maria Gico Lima Montenegro



Prof. Dr. Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral

Recife, PE - Brasil

Julho de 2006

Oração a um rio (Maria Bonafé Ostrowsky)



Rio nosso,
nasces no mais puro dos recantos
refletes noite e dia o céu dourado e prateado.
Respeitado seja o vosso nobre leito,
bendito o teu caminho
mesmo ainda pequeno, frágil e transparente,
trazes a nós o sangue puro e cristalino
que alimenta nosso ninho
e perpetua nossa espécie.

Rio nosso,
perdoa por nossa gente,
pela sabedoria em gerações acumuladas,
por toda engenharia para confinar teu leito,
ajustar teu curso, grilar teus quintais
e aprisionar-te a correnteza
que hoje murmura nos umbrais
da mortalha de concreto .

Rio nosso,
perdoa por nossos pobres,
de toda sorte de pobreza,
de corpo, d'álma, de amor,
dos que carregam tuas águas
com tanto tipo de impureza,
e como se fosse pouco,
com aquilo que não lhes serve,
te obstruem a amaldiçoam a correnteza,
fazendo com que transbordem .

Rio nosso,
perdoa nossa cidade
que invadiu tua morada,
maculou tua pureza,
destruindo assim,
a unidade da natureza,
que abriga parte de um povo
ligado em guerra e riqueza,
que de ator, passa a vítima
de toda a calamidade.

Aos meus pais, Roberto e Lúcia

A Fred, meu marido,

Tiago e Maria Fernanda, meus filhos

A todos os habitantes das margens dos rios e canais que cortam as cidades de Recife e Olinda, com a esperança que este trabalho possa de alguma forma contribuir para a melhoria das suas condições de vida.

RESUMO

O presente trabalho trata da macrodrenagem de regiões urbanas, densamente ocupadas, com elevado índice pluviométrico e sujeitas à influência de marés. São comparadas metodologias de análise do escoamento em redes complexas de rios urbanos, avaliando os ganhos resultantes do uso de informações espaciais de alta resolução. A bacia do rio Beberibe e a parte da bacia do rio Capibaribe inserida na Região Metropolitana de Recife, no estado de Pernambuco, são utilizadas como estudo de caso.

A pesquisa foi montada com base de dados georeferenciada em ambiente SIG – Sistema de Informações Geográficas. Foi realizado levantamento em campo de todas as informações necessárias à definição do ambiente físico: dados relativos a 43 corpos d'água, sendo 3 rios e 40 canais. Ao longo destes foram levantadas 334 seções transversais. Esses corpos d'água foram agrupados em 23 sub-bacias para a análise hidrológica e de uso e ocupação do solo. Para composição do relevo utilizaram-se 308 cartas altimétricas da área, que foram digitalizadas, georeferenciadas e vetorizadas, montando-se daí o MNT – Modelo Numérico do Terreno. Imagens de satélite de alta resolução foram utilizadas para a identificação dos canais e correção do traçado das sub-bacias, assim como para classificação dos usos do solo.

Eventos de chuva com diferentes intensidades foram avaliados em processo de modelagem para determinação das vazões afluindo à rede de rios e canais, como aporte lateral ao longo de todos os trechos em estudo. O modelo de simulação hidrodinâmica da rede de rios incorpora essas contribuições e o efeito de maré a jusante. Esses resultados são comparados com métodos empíricos e lançados em forma de planície de inundação sobre imagem de satélite e mapas, para a identificação e quantificação dessas áreas.

Destaca-se o ganho de qualidade da informação decorrente do uso das informações espaciais de alta resolução e o potencial de utilização do conjunto de metodologias.

ABSTRACT

This work deals with macrodrainage of densely occupied urban regions with elevated rainfall index and subjected to the tide influence. In order to fulfill that intention, it compares methodologies of runoff analysis in complex nets of urban rivers evaluating the resultant gains of use of spatial high resolution information.

The Beberibe River water basin and the portion of Capibaribe River watershed inserted in Metropolitan Region of Recife, in state of Pernambuco, are used as a case study.

The research was done with geo referred data in SIG (Geographic Information System) environment. It contains the field data catchment of necessary information for definition of the physical environment: data relative to 43 water elements, which included 3 rivers and 40 channels. Among them, 334 transversal sections were analyzed. These elements were grouped in 23 sub basins for the hydrologic analysis and use of soil occupation. 308 altimetric maps of the area were used in the landscape composition. They were organized in digital form, geo referenced and vectorized, giving as a result the NMT (Numerical Model of the Terrain). Satellite high resolution images were used to identify the channels and correction of the sub basins tracing as well as to the classification of soil uses.

Rainfall events with different intensities were evaluated in the model processing to determine the discharges that flows to the river and channels net, as a lateral support along all branches in study. The hydrodynamic simulation model of the river net incorporates these contributions and the upstream tide effect. These results are compared with empiric methods and put in form of flood plain over the satellite images and maps, in order to identify and quantify these areas.

It was observed a gain of quality using spatial high resolution information and the potential use of the methodologies set analysed.

AGRADECIMENTOS

Essa pesquisa trouxe à autora a oportunidade de conhecer grande parte da cidade, onde jamais iria, se não fosse a necessidade do trabalho. Conhecer pessoas que vivem em realidades bem diferentes das nossas enriquece a alma, dá força pra seguir em frente e acima de tudo nos ensina a nunca reclamar da vida. Essas pessoas conhecem as verdadeiras dificuldades da vida dão aulas de sobrevivência e nos mostram, verdadeiramente, o que é ter esperança. Muitas vezes a depressão tornava-se inevitável após a jornada de trabalho, o consolo seria a oportunidade de poder ajudar de alguma forma a melhorar as condições de vida dessas pessoas. Sinto-me agora um pouco responsável por elas.

A toda a população residente as margens dos rios e canais visitados, por estarem sempre a disposição e interessados em informar e interagir. Pessoas em sua maioria muito pobres e em precárias condições de vida, mas que se mostram sempre dispostas a colaborar.

A Deus, que me deu uma verdadeira família.

Ao meu amigo e orientador, Prof. José Almir Cirilo, por acreditar, apoiar e incentivar a realização deste trabalho.

Aos meus pais que desde cedo me ensinaram a importância dos estudos.

Ao meu marido que vivenciou todo o percurso, apoiando e incentivando, Aos meus filhos que tão pequenos começaram a aprender sobre rios.

A tia Letícia e ao Durval, que mesmo residindo em outro estado, em muito colaboraram durante toda a etapa do desenvolvimento dos trabalhos.

Ao Eng. Alejandro Ernesto Lasarte, Representante do DHI no Brasil. sem a sua ajuda teria sido impossível desvendar o Mike e seus mistérios. Sempre atencioso e à disposição.

A todos que fazem o GRH – UFPE – professores, estagiários e funcionários. Aos amigos Lopes e Aerton pela preciosa ajuda no exaustivo trabalho de campo. Às amigas Suely, Walkíria e Janaína, por sempre colaborarem nos trabalhos cansativos. Aos estagiários, todos muito importantes na sua determinada época: Breno e Cristiane na digitalização das cartas, Carlos Henrique e Ernesto no trabalho de campo e Luiz na fase de conclusão dos trabalhos.

Ao Sr. Geraldo (in memoriam), que muito ajudou nas caminhadas ao longo dos canais, sempre muito atencioso e bem disposto. Com certeza um lugar especial a ele foi reservado na memória de todos os que um dia tiveram a oportunidade de conhecê-lo.

Aos amigos Valéria Camboim Góes e Carlos Eduardo Dantas, por toda a ajuda e trocas de informações relativas aos modelos de simulação.

Ao amigo Rui Santos, com o qual aprendi o verdadeiro significado da frase “mais vale um amigo na praça do que dinheiro no banco”.

À EMLURB – Empresa de Manutenção e Limpeza Urbana, pela disponibilização do Cadastro dos Canais de Recife e Olinda. Em especial à fotógrafa Aurelina Moura de Souza, que gentilmente cedeu fotografias do seu acervo.

Ao CONDEPE / FIDEM - Agência Estadual de Planejamento e Pesquisas de Pernambuco, pelo fornecimento dos fotolitos originais contendo a altimetria na escala 1:2000.

À SECTMA – Secretaria de Ciência, Tecnologia e Meio Ambiente do Estado de Pernambuco, pela disponibilização de dados de vazão e chuva, dentre outros.

À Prefeitura de Olinda – Pelo financiamento de boa parte do trabalho de campo no município.

Ao LAMEPE – Laboratório de Meteorologia de Pernambuco, pelo fornecimento dos dados hidrológicos.

Ao DECART - Departamento de Engenharia Cartográfica, em especial à Profa. Ana Lúcia, por permitir a utilização do ENVI, software para processamento de imagens de satélite.

À UFPE – Universidade Federal de Pernambuco, por proporcionar ambiente altamente favorável ao desenvolvimento do trabalho.

À CAPES por fornecer os recursos financeiros necessários.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 - Apresentação	1
1.2 - Objetivo	3
1.3 - Justificativa.....	3
1.4 - Conteúdo da Tese.....	5
2. REVISÃO DA BIBLIOGRAFIA	7
2.1 - Macrodrenagem em Áreas Urbanas.....	7
2.2 - Integração ao Geoprocessamento	12
3. MODELOS DE SIMULAÇÃO.....	15
3.1 – Modelos Hidrológicos	15
3.2 – Modelos Hidrodinâmicos	16
3.3 - Ferramentas Computacionais	21
3.3.1 – Interface de Comunicação	28
4. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA EM ESTUDO	30
4.1 - Posicionamento Histórico	30
4.2 - Rede de Drenagem	35
4.2.1 - <i>Bacia do Rio Capibaribe</i>	37
4.2.2 - <i>Bacia do Rio Beberibe</i>	40
4.2.3 - <i>Base Cadastral da Rede de Rios e Canais</i>	43
4.3 – Breve Histórico das Cheias em Pernambuco	54
5. LEVANTAMENTO DE DADOS E INFORMAÇÕES.....	62
5.1 - Bases Físicas	62
5.1.1 - <i>Trabalho de Campo para Caracterização do Sistema Físico</i>	62
5.1.2 - <i>Base Digital da Região e Ferramentas de Geoprocessamento</i>	64
5.1.3 - <i>Imagem de Satélite</i>	69
5.1.4 - <i>Definição das Bacias Contribuintes e Sua Caracterização</i>	72
5.1.5 - <i>Classificação da Imagem de Satélite</i>	75

<i>5.1.6 – Base de Banco de Dados Hidrológicos e de Marés</i>	84
<i>5.1.7 - Linha de Inundação de 1975</i>	88
6. INTEGRAÇÃO DA BASE DE DADOS	91
7. PROCEDIMENTOS PARA CÁLCULO DE HIDROGRAMAS DE CHEIA NAS SUB-BACIAS	100
8. SIMULAÇÃO DAS INUNDAÇÕES	110
9. CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE O TRABALHO	127
10. CONCLUSÕES	129
11. RECOMENDAÇÕES	131
12. BIBLIOGRAFIA	132

Simulação Hidráulico-Hidrológica do Escoamento em Redes Complexas de Rios Urbanos: Suporte de Informações Espaciais de Alta Resolução

1. INTRODUÇÃO

1.1 - Apresentação

Desde os primórdios das civilizações, observa-se uma forte tendência de organização dos agrupamentos populacionais de se desenvolverem às margens de grandes rios, sejam eles regiões de estuários ou não. Essa prática é facilmente explicável pela busca dos benefícios da água, não só como uma necessidade vital como também pelas facilidades trazidas dessa proximidade, como por exemplo o solo fértil, o transporte fluvial, a energia, dentre outros. Na antiguidade, tem-se como o maior exemplo o desenvolvimento da civilização egípcia às margens do rio Nilo, um dos maiores rios do planeta, em extensão, de margens amplamente férteis, devido a séculos de extravasamentos e utilizadas extensivamente para o cultivo agrícola. No velho continente, merecem citações dois grandes exemplos: o desenvolvimento de Londres às margens do rio Tamisa e Paris às margens do Sena. No Brasil pode-se citar a cidade de São Paulo, onde dentre outros rios destacam-se o Pinheiros e o Tietê. Recife e Olinda, em Pernambuco, também, desenvolveram-se às margens de rios: Capibaribe e Beberibe, respectivamente, de presença marcante na história destas cidades.

Essa prática de ocupação das áreas ribeirinhas tem trazido problemas em grande parte das cidades do mundo. Todo rio, em condições normais, extravasa regularmente a sua calha menor ocupando o seu leito maior, leito esse muitas vezes invadido pela urbanização desordenada que se aproveita dos longos períodos de estiagem, para invadir áreas que com certeza mais cedo ou mais tarde serão solicitadas pelas águas.

O aumento da recorrência de inundações nos meios urbanos, portanto, deve-se principalmente ao acelerado processo de urbanização que, ao longo das últimas décadas, concentrou nas regiões metropolitanas milhões de habitantes. Essa prática traz consigo graves problemas ambientais, dentre os quais pode-se destacar o comprometimento dos mananciais de abastecimento público e o lançamento de

esgotos na rede hídrica, transformando rios e canais em vetores de transmissão de doenças. Estes desastres verificam-se principalmente em países menos desenvolvidos, onde fatores como a ausência de regulamentos de ocupação de zonas rigorosas e, de uma forma geral, o mau uso e ocupação do solo, contribuem para o aumento dos riscos associados às inundações. No entanto, não apenas em países sub-desenvolvidos, como a Índia, o Haiti e a Etiópia, observam-se os problemas de inundações relatados. Países desenvolvidos, também, apresentam problemas dessa natureza. Nos Estados Unidos, áreas de Massachusetts e New Hampshire, dentre outras, sofrem com inundações. Na Europa, o rio Elba inunda vários estados da Alemanha, Dresden, Saxônia, Anhalt, Brandemburgo e Wittenberg. O rio Danúbio provoca inundações na Romênia. Na China, o rio Yang-Tse provoca inundações em Wuhan.

Em regiões de estuários, que sofrem a influência da maré, essa questão se agrava, pois, mesmo sabendo-se que os níveis de maré oscilam de acordo com um ciclo previsto, quando coincidem os níveis de preamar mais elevados e chuvas intensas os efeitos podem ser devastadores. E ainda, para agravar, recentes estudos realizados por cientistas do Programa Ambiental das Nações Unidas indicam a elevação dos níveis de maré em função do aquecimento global. A cidade de Bangladesh é um exemplo de cidade estuarina severamente acometida por inundações.

No Recife, a questão das grandes cheias do Capibaribe, que aterrorizaram gerações, foi controlada em função das grandes barragens construídas ao longo do seu curso, Jucazinho e Carpina, e nos seus afluentes mais importantes, Goitá e Tapacurá. Persistem, no entanto, temores de cheias de menor amplitude ocasionadas por chuvas intensas a jusante das barragens e inundações na planície de Recife decorrentes da drenagem deficiente e da ocupação desordenada. As galerias de águas pluviais, obsoletas, estão ocupadas com ligações clandestinas de esgotos, fazendo com que as chuvas torrenciais em áreas urbanas invadam as ruas impermeabilizadas e assim demorem mais tempo para escoar, trazendo grandes prejuízos.

A engenharia sozinha não resolve o problema das inundações. Tucci (2004) destaca ainda que a canalização em pontos críticos, apenas transfere a inundação de um lugar para outro na bacia. Não existem soluções simples, nem instantâneas

e.replicáveis de forma genérica. Cada caso deve ser analisado isoladamente, considerando as articulações entre os planos de bacias, planos de drenagem urbanas e outros que estiverem disponíveis. Deve-se ainda capacitar os agentes públicos e educar a sociedade.

1.2 - Objetivo

O presente trabalho de pesquisa apresenta como principal objetivo, formular e aplicar estratégia de análise da dinâmica da rede de rios e canais interligados em meio urbano, sujeitos à influência de marés e em regimes de alta precipitação, integrando bases de dados espaciais de alta definição.

A aplicação é feita às bacias dos rios Capibaribe e Beberibe, que cortam as cidades de Recife e Olinda.

1.3 - Justificativa

O estudo das cheias e inundações pode salvar vidas, preservar bens materiais e afetivos e ainda contribuir para a melhoria da qualidade de vida das populações urbanas, uma vez que o alto índice de adensamento urbano é sempre alheio ao planejamento fazendo com que uma simples cheia transforme-se em um evento trágico.

O estudo da macrodrenagem em áreas urbanas tem se intensificado em virtudes dos graves problemas que vem ocorrendo em escala mundial. O aumento da ocupação do solo com superfícies impermeáveis vem aumentado a frequência e a magnitude das enchentes.

Conforme Ostrowsky (2000), que estudou a problemática das cheias na região metropolitana de São Paulo, de um modo geral, as cheias vêm sendo tratadas de forma isolada e pontual, não considerando a bacia como um todo e assim as inundações migram de um lugar para o outro, transferindo os problemas para outras regiões e em muitos casos aumentando as perdas e os danos envolvidos.

Em pesquisas a respeito do clima mundial, o cientista Friedrich-Wilhelm Gerstengarbe, do Instituto de Pesquisa das Mudanças Climáticas de Potsdam, Alemanha, alerta para o início de uma nova fase de catástrofes climáticas que poderão afetar o mundo inteiro. No Brasil, o aquecimento global poderá agravar secas e inundações. “Para mim, não há mais dúvidas sobre a influência da ação humana sobre o clima. Extremos climáticos sempre existiram, mas agora sua frequência e intensidade confirmam nossa tese de que é o aquecimento da temperatura associado à ação humana sua principal causa”. Cientistas do IPCC – Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima, órgão ligado à ONU, também atribuem a responsabilidade sobre as mudanças no clima ao homem. O aumento de gases, como o dióxido de carbono e o metano, lançados em grandes quantidades na atmosfera, provocando aumento da concentração de poluentes na camada superior, com essa camada cada vez mais concentrada, aumenta a retenção de calor, que tem como consequência direta o derretimento das calotas polares e de geleiras nos picos mais altos de montanhas e o consequente aumento do nível dos oceanos. O impacto das mudanças é ainda mais perceptível em menor escala, por exemplo, em uma bacia hidrográfica pequena ou em um estuário ou linha de costa. Amplitudes aumentadas nos picos de vazão, rios perenes que se tornam intermitentes, assoreamento de rios e reservatórios são aspectos de grande relevância nas pesquisas.

A Figura 1.1 mostra, como exemplo, a elevação do nível do mar representada na praia de Boa Viagem, no Recife. Em amarelo, a média das marés há cinquenta anos e, em vermelho, previsão até onde a maré pode chegar em 100 anos. As causas que dão origem a essas mudanças decorrem ou podem acontecer tanto por efeitos globais como por ações localizadas, como obras e ações impactantes sobre os recursos hídricos.

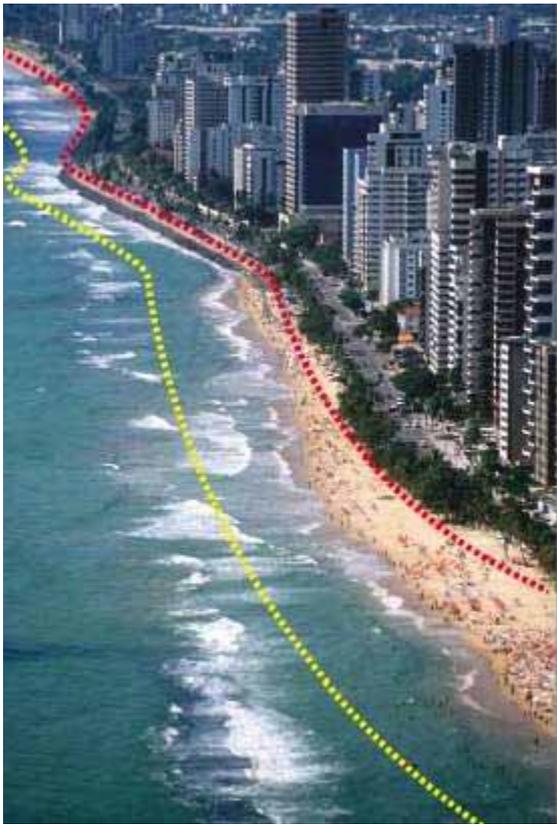


Figura 1.1 – Alteração do nível da maré. Em amarelo a média dos últimos cinquenta anos e em vermelho a previsão para 100 anos.

1.4 - Conteúdo da Tese

Após os esclarecimentos preliminares percorridos neste capítulo introdutório segue-se a descrição dos demais capítulos componentes do trabalho:

O capítulo 2 apresenta a revisão da literatura, enfocando os principais assuntos abordados no trabalho. O capítulo foi dividido em dois temas principais, a saber: macrodrenagem em áreas urbanas e integração ao geoprocessamento.

O capítulo 3 apresenta um breve histórico sobre a evolução dos modelos de simulação hidrológica e hidrodinâmica. Apresenta também os modelos hidrológicos e hidrodinâmicos utilizados nas simulações, bem como as interfaces necessárias às transferências de informações entre os softwares.

No capítulo 4 apresenta-se a caracterização do problema. Na primeira parte é mostrado um quadro evolutivo desde o surgimento das cidades de Recife e Olinda, como se deu o processo de ocupação desordenada, chegando-se até aos dias atuais. Na segunda parte, descreve-se as bacias em estudo: a bacia do rio Beberibe e a bacia do Capibaribe, destacando os aspectos atuais de cada uma. O capítulo apresenta ainda uma terceira parte, na qual é apresentado um histórico das cheias em Pernambuco, desde o ano de 1632 até os dias atuais.

O capítulo 5 apresenta o processo de levantamento de dados e informações sobre a área em estudo, relativos às bases físicas, utilizados no trabalho.

No capítulo 6 é apresentada a estruturação e montagem de toda a base de dados. Esses dados de entrada são necessários aos arquivos alimentadores dos modelos.

O capítulo 7 apresenta procedimentos empíricos para cálculo de vazão máximas e hidrogramas de cheia.

No capítulo 8 são mostradas as simulações das inundações e seus respectivos resultados.

O capítulo 9 apresenta considerações e comentários gerais a respeito do trabalho. O capítulo 10 apresenta as conclusões da pesquisa, e no capítulo 11 são feitas recomendações aos futuros trabalhos que venham a ser realizados.

2. REVISÃO DA BIBLIOGRAFIA

2.1 - Macrodrenagem em Áreas Urbanas

A quantidade de estudo sobre a macrodrenagem em áreas densamente ocupadas vem crescendo em função dos riscos de vida envolvidas no processo, uma vez que as enchentes, principalmente nessas áreas, provocam uma grande quantidade de prejuízos. A ocupação desordenada, não só das planícies de inundação como também do próprio leito dos rios, faz com que uma inundação provocada por chuvas intensas, que seria um processo natural, se transforme em uma grande problema social.

Naturalmente, a tomada de decisões numa região urbana densamente ocupada é difícil e complexa podendo, entretanto, ser assistida, em grande parte, com a aplicação de modelos matemáticos de simulação de cheias e sistemas de informação geográfica. A união destas duas tecnologias permite contar com uma ferramenta de análise espacial (geograficamente referenciada) orientada à tomada de decisão vinculada ao manejo de cheias. Como resultado da combinação destas duas tecnologias (modelagem e SIG), pode-se gerar mapas de inundação, necessários para identificar as zonas prioritárias para o controle de cheias, para alertar a Defesa Civil, bem como pode-se elaborar mapas de impacto das mesmas, que auxiliam na avaliação de soluções alternativas e na realização de uma análise multi-setorial do impacto da inundação (Carvalho et al.. 2003). A elaboração de sistemas de alerta torna-se extremamente importante quando, a partir da previsão, vidas possam ser salvas. Como exemplo, pode-se observar o caso do Tsunami que atingiu a Ásia em dezembro de 2004. Milhares de pessoas poderiam ter sobrevivido se de alguma forma fossem alertadas para o que estava por acontecer.

Em várias partes do mundo vêm sendo desenvolvidos trabalhos dessa natureza, com o intuito de minimizar os efeitos das enchentes. No Brasil, trabalhos como o de Krüger et al.. (1999) aplicado à cidade de União da Vitória no rio Iguaçu, foi um dos primeiros a apresentar técnicas de mapeamento de planícies de inundação e geoprocessamento. No mundo, essa questão vem sendo abordada de acordo com as necessidades e disponibilidades de cada país.

Biza et al.. (2001) desenvolveram na República Tcheca ferramentas para análise de cheias baseando-se em SIG, com o intuito de minimizar os danos a serem provocados por cheias futuras, calculando os danos provocados e análise custo x benefício das medidas de alívio a serem adotadas. O trabalho foi aplicado à bacia do rio Morava, numa área de aproximadamente 55.000 ha. Os resultados foram bastante satisfatórios. O rio Morava é um dos mais importantes tributários do rio Danúbio, recebe uma precipitação anual média de aproximadamente 635 mm e registrou um de suas maiores enchentes em julho de 1997, causando prejuízo da ordem de 3 bilhões de dólares. A partir daí, providencias começaram a ser tomadas no intuito de minimizar esses efeitos (Biza et al.. 1999).

Jorgensen e Host-Madsen (1997) desenvolveram para Bangladesh um sistema de controle e previsão de enchentes integrados em um ambiente GIS funcionando em tempo real. Bangladesh está localizada na confluência de três grandes bacias hidrográficas, Ganges, Brahmaputra e Meghna que drenam a Cordilheira do Himalaia através da Índia e, ainda para agravar, registra um alto índice de chuvas intensas. O Diário de Pernambuco registrou no dia 26 de Julho de 2004: “Enchentes seguem matando em Bangladesh; mortos já são 285. Mais de dois terços de Bangladesh estão debaixo d'água. Em Daca, sua capital, 100.000 pessoas foram obrigadas a procurar abrigos públicos. Essas são as piores enchentes desde 1988, quando 3.500 pessoas morreram”.

Jorgensen et al.. (2000) desenvolveram para a região de Piemont, noroeste da Itália, após ser acometida por uma das maiores enchentes registradas, um sistema de controle em tempo real, contando com uma rede telemétrica com mais de 200 estações meteorológicas. O sistema foi montado utilizando os softwares de simulação hidrológica e hidrodinâmica do DHI – Danish Hydraulic Institute e ambiente SIG da ESRI – Environmental Systems Research Institute. Essa integração resulta em uma poderosa ferramenta para o controle de enchentes em tempo real.

Na Polônia, após os incidentes ocorridos em virtudes de grandes cheias em 1997, criou-se um projeto para o gerenciamento e o controle de enchentes utilizando também ferramentas computacionais do DHI (DANCEE, 1998).

Nos Estados Unidos, vários trabalhos integrando GIS e modelos de simulação hidrológicos e hidrodinâmicos podem ser citados. No Texas, Tate (1999) foi um dos primeiros a utilizar essas ferramentas. Este autor desenvolveu procedimentos para gerar planícies de inundação utilizando ferramentas computacionais do HEC – Hydrologic Engineering Center, integrantes do US Corps of Engineers, e lançá-las no ambiente SIG da ESRI, montando um SIG, o qual permite que se faça um mapeamento das áreas inundáveis, os procedimentos para minimizar os impactos provocados e ainda pode funcionar como um sistema de alerta.

Azagra (1999) integrou modelos chuva x vazão, modelos de escoamento permanente e interfaces para transferência dos resultados obtidos ao ambiente da ESRI, para a determinação de planícies de inundação. O sistema é composto basicamente por três fases: a primeira calcula a vazão a partir da chuva, a segunda calcula os valores da elevação da planície de inundação em diferentes pontos, utilizando a simulação hidrodinâmica e na terceira esses valores são plotados sobre mapas. Esse sistema foi utilizado na bacia de Waller Creek em Austin, Texas.

Anderson (2000) desenvolveu um sistema com a finalidade de controlar os problemas de inundações em sistemas de drenagem de auto-estradas. O autor utilizou modelos hidrológico e hidrodinâmicos desenvolvidos pelo US Corps of Engineers. Os resultados foram lançados em um ambiente SIG com a ajuda de extensões. Essa integração se mostrou bastante favorável, capaz de gerar várias planícies de inundação simultaneamente, possibilitando observações e comparações entre vários tempos de recorrência.

Snead (2000) estudou a bacia hidrográfica de Mill Creek em Cincinnati no estado de Ohio para a realização de simulações hidrodinâmicas utilizando dois modelos de simulação: um desenvolvido pelo DHI e outro desenvolvido pelo Corpo de Engenheiros dos Estados Unidos, o primeiro trabalhando com as seções transversais levantadas em campo e o segundo extraído-as do modelo digital de terreno gerado. Diferenças significativas foram encontradas nos resultados. No modelo desenvolvido pelo Corpo de Engenheiros o fluxo se atenuou mais rapidamente, a altura máxima foi mais baixa e a duração do evento maior. No modelo do DHI a altura máxima atingida foi mais elevada e a duração do período de inundação mais reduzida. Essas variações devem-

se à consideração de entrada das seções transversais. Sendo estas seções extraídas do Modelo Digital do Terreno podem considerar toda a área da planície inundável.

Shumuk et al.. (2000) aplicaram com sucesso o modelo de simulação hidrodinâmica do DHI para a simulação de perfis de inundações no rio Fraser, o terceiro maior rio da costa oeste da América do Norte, o qual drena uma área de aproximadamente 235.000 km². O rio conta com um sistema de diques que protege uma significativa parte da população da cidade chamada British Columbia. Os autores utilizaram o modelo com o principal objetivo de avaliar o nível de proteção fornecido pelo sistema de diques existente e para determinadas vazões anteriormente ocorridas, as possibilidades de superação desses diques e medidas mitigadoras caso esses eventos venham a ocorrer.

No Brasil, Sá et al.. (2003) desenvolveram importantes trabalhos para a bacia do Alto Iguaçu, região metropolitana de Curitiba, área freqüentemente assolada por enchentes. Os autores implantaram um projeto denominado “Modelos de Simulação em Recursos Hídricos para Controle de Cheias”, o qual fornece instrumentos para o monitoramento e acompanhamento da quantidade e qualidade da água. O sistema possibilita o fornecimento de informações para as estratégias decisórias das instituições envolvidas no sistema de alerta de enchentes. O modelo de simulação hidrodinâmico desenvolvido pelo DHI é o centro desse sistema, associado com modelo hidrológico para fornecer os dados de entrada e os registros de níveis de água requeridos, bem como os aportes laterais dos afluentes ao longo do trecho modelado. Os modelos se baseiam em simulação hidrológica das sub-bacias contribuintes e a simulação hidrodinâmica do canal principal do Iguaçu. Alvarenga et al.. (2003) aplicaram as mesmas ferramentas do DHI para a mesma região, para análises de qualidade de água. O modelo de qualidade é também dinâmico, podendo simular as concentrações ao longo de um período de tempo pré-determinado.

Miguez e Mascarenhas (1999) modelaram matematicamente o comportamento do movimento de cheias em áreas urbanas, utilizando um esquema de células de escoamento, formando uma rede de escoamento bidimensional em várias direções nas zonas de inundação. Para a construção da rede bidimensional é de máxima importância a representação da realidade física, hidrografia e topografia, implicando diretamente na boa qualidade dos resultados. Os autores aplicaram o modelo à bacia

do rio Cachoeira e seus afluentes, em região que inclui a cidade de Joinville, com o intuito de prever resultados de obras projetadas para a bacia com a finalidade de minimizar o efeito das cheias. Com a disponibilidade de manchas de inundação históricas definiu-se as áreas potencialmente alagáveis, chegando-se a divisão final da bacia em 240 células.

Heald (2001) analisa os processos de avaliar a vazão a partir da chuva, passando por procedimentos clássicos como o método racional e o método do Soil Conservation Service (SCS). Os autores discutem as vantagens, desvantagens e limitações de diferentes procedimentos e a potencial contribuição da aplicação de SIG a esses processos: a facilidade de determinar as características da cobertura vegetal e ocupação do solo, por exemplo, reduzindo o tempo de cálculo e diminuindo os erros.

As técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto aplicadas aos modelos hidrológicos apresentam-se como uma poderosa ferramenta, facilitando a comunicação entre significativas variáveis envolvidas nos problemas como a topografia, a identificação do uso do solo na bacia hidrográfica, e outras informações geograficamente relevantes e assim permitindo simular diferentes vazões em função das variações destas características (Shrestha, acessado em 01/07/2006).

Seth (acessado em 01/07/2006) apresenta os modelos hidrológicos como uma poderosa ferramenta ao gerenciamento dos recursos hídricos. As constantes modificações que sofrem os cursos d'água e as bacias hidrográficas em função das atividades humanas podem alterar todos os elementos do ciclo hidrológico. Os modelos hidrológicos podem auxiliar na quantificação dessas mudanças. Estes modelos podem ser auxiliados por técnicas de sensoriamento remoto, fotografias aéreas e imagens de satélite, com a finalidade de fornecer a informação espacial sobre a fase terrestre do ciclo hidrológico, principalmente em locais com pouca disponibilidade de dados. SETH et al.. (acessado em 01/07/2006) desenvolveram estudos utilizando imagens de satélite e técnicas de geoprocessamento para diferentes processos hidrológicos ocorridos em bacias hidrográficas. Modelos chuva-vazão, de erosão do solo, de sedimentação, de capacidade do solo, dentre outros. As ferramentas SIG apresentam-se como importantes gerenciadores da grande quantidade de dados envolvidos nos modelos hidrológicos e, juntamente com o sensoriamento remoto, disponibilizam informações para o adequado gerenciamento dos recursos hídricos.

Herath et al.. (1996) desenvolveram estudos hidrológicos com o objetivo de estimar o balanço hídrico em bacias urbanas. Aplicaram os modelos em Tóquio, no Japão, e Colombo, no Sirilanka. Destacam como ponto principal o entendimento e análise detalhada do ciclo hidrológico urbano. Como primeiro passo para esta análise foi necessário dividir o movimento das águas em natural e artificial. O artificial relaciona-se com toda a água utilizada pelos habitantes, enquanto que o natural refere-se à água das chuvas escoada e infiltrada e a evapotranspiração. “A quantificação deste ciclo da água é um grande problema, pois a maioria dos sistemas de monitoramento existentes estimam o comportamento total do sistema, enquanto que, com a disponibilidade da informação detalhada, é possível descrever o ciclo hidrológico completo utilizando modelos”.

Tan et al.. (2002) aplicaram técnicas de GIS e sensoriamento remoto para a determinação de coeficientes de escoamento em bacias hidrográficas em Taipei, na China, e na Flórida, EUA. Foram utilizados três tipos de base de dados: a primeira consiste nas informações para a implementação do SIG, contorno da bacia, modelo digital de terreno, tipo de solo e estradas. A segunda, composta pelas imagens de satélite Landsat, foi utilizada para o estudo da cobertura e ocupação do solo de 1990 a 2000. A terceira base compreende os dados obtidos em campo, chuva e vazão. O estudo identificou um acréscimo do crescimento das áreas urbanas e conseqüente impermeabilização da superfície, o que favorece a geração de picos elevados de vazão, fazendo-se necessário o desenvolvimento de estruturas de contenção de enchentes. Os autores recomendam a utilização de imagens de satélite com melhor resolução para melhor precisão na classificação, principalmente em regiões dinâmicas, com rápidas variações no uso do solo.

2.2 - Integração ao Geoprocessamento

Segundo Mendes e Cirilo (2001), quando o desempenho do sistema do mundo real é compreendido e seu comportamento é previsto, adquire-se informação adicional para controlar o sistema. Nesse contexto, os modelos podem ser usados para identificar os componentes mais sensíveis que influenciam o comportamento dos

sistemas, possibilitando que as simulações reproduzam adequadamente as situações do mundo real.

Um dos grandes desafios da Hidrologia refere-se à tentativa de representar por meio de modelos matemáticos os processos hidrológicos em uma bacia hidrográfica da forma mais fidedigna possível. Para a hidrodinâmica dos corpos d'água, modelar os processos físicos requer a “retratação” mais fiel da calha fluvial, declividades do terreno, composição da superfície onde se processa o escoamento. Essa é uma tarefa muitas vezes complicada, visto que em uma bacia hidrográfica verificam-se diferentes tipos de solo, vegetação, clima, dentre outras características que variam no tempo e no espaço, influenciando diretamente na resposta da bacia. Associadas a essas diferenças, inerentes ao meio ambiente natural, estão as ações antrópicas, tais como desmatamento ou aumento das áreas impermeáveis, decorrente da urbanização, que também contribuem para alterar o comportamento da bacia. Na tentativa de incorporar essa variabilidade espacial se faz uso dos modelos hidrológicos distribuídos, que se baseiam na discretização espacial da bacia hidrográfica, atribuindo diferentes características a cada elemento discretizado.

Para auxiliar nessa tarefa de representar espacialmente as características do meio físico de forma intrínseca aos modelos, portanto, tem-se utilizado as técnicas de geoprocessamento que, além disso, permitem a integração do planejamento de uso do espaço urbano com os modelos hidrológicos e hidrodinâmicos e, por conseguinte, possibilitam aprimorar cada vez mais os resultados obtidos pelos mesmos.

Os SIGs são normalmente equipados com ferramentas importantes para a implementação dos modelos hidrológicos como os algoritmos para o cálculo do contorno de bacias hidrográficas, declividades, modelos digitais de elevação, funções de rede e habilidade com superposição de imagens e mapas.

A integração entre os modelos hidrológicos e os SIGs pode se dar das seguintes maneiras (Kopp, 1996):

- Modelagem hidrológica baseada no próprio SIG, isto é, baseando-se apenas nas funções presentes no SIG são gerados os resultados do modelo, o que permite modelar apenas processos simplificados;

- Construção de pré e pós-processadores que permitam efetuar a conversão dos dados entre o SIG e o modelo (e vice-versa), sendo esse o procedimento mais comum de implementação da integração modelo hidrológico - SIG ou modelo hidrodinâmico – SIG;
- A terceira e mais poderosa forma de integração consiste em embutir o código fonte de um programa no código do outro, o que requer apreciável esforço de programação.

Em trabalho realizado por Eid e Campana (1999b) pode ser verificado um exemplo da primeira maneira de integração entre os modelos hidrológicos e os SIGs. Os autores realizaram uma estimativa da vazão média mensal em uma sub-bacia do rio Negro utilizando funções e programas desenvolvidos em SIGs. Já em outro trabalho, Eid e Campana (1999a) destacam como exemplos para o segundo e terceiro tipos de integração entre os modelos hidrológicos e os SIGs, o desenvolvimento de um pré-processador, descrito por Olivera et al.. (1998), constituído por uma série de rotinas e controles implementados no ambiente SIG da ESRI, e softwares desenvolvidos pelo Instituto Dinamarquês de Hidráulica (DHI, 2000), no qual foram inseridos os códigos fonte de programas computacionais de gerenciamento dos recursos hídricos no SIG.

Na segunda linha de trabalho foi desenvolvido na UFPE o SIGMA – Sistema de Informações para Gestão do Meio Ambiente, exaustivamente aplicado para estudos em Pernambuco e com algumas aplicações a outras regiões do Brasil (Kyrillos, 2000, Kyrillos et al.. 2000).

Outro exemplo de integração completa entre os modelos hidrológicos e os SIGs foi desenvolvido por Huang e Jiang (2002). No trabalho foram verificados todos os estágios da construção do modelo, da entrada inicial dos parâmetros, passando pela transformação dos dados, até à visualização dos mapas com os resultados finais.

As recentes e promissoras experiências de modelagem hidrológica com o auxílio do geoprocessamento reiteram a necessidade de se desenvolverem novos métodos que possibilitem a caracterização da variabilidade espacial dos processos hidrológicos ocorridos nas bacias hidrográficas. Os SIGs podem ajudar na interpretação de dados espacializados, bem como no melhor entendimento dos resultados dos modelos.

3. MODELOS DE SIMULAÇÃO

3.1 – Modelos Hidrológicos

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, ou modelos hidrológicos, por exemplo, permitem reconstituir séries de vazões, realizar previsões e simular situações especiais, procurando representar o comportamento da bacia hidrográfica. Normalmente se busca avaliar as vazões geradas a partir das chuvas, mas outros processos do balanço hídrico, como a recarga de aquíferos, podem ser avaliados conforme o tipo de modelo.

Num breve histórico sobre os modelos hidrológicos pode-se citar inicialmente Todini (1888). Durante o final do século XIX e o início do século XX, nas tentativas iniciais de se obterem valores de vazão a partir de valores de precipitação fez-se uso do método racional, que é baseado no conceito de tempo de concentração. Com o passar do tempo, muitas modificações foram introduzidas no método racional para possibilitar a inserção da distribuição não-uniforme, no espaço e no tempo, da precipitação e das características fisiográficas da bacia hidrográfica.

Na tentativa de tornar mais realistas as soluções obtidas pelos modelos, Sherman, em 1932, introduziu o conceito de hidrograma unitário baseado no princípio da superposição. O hidrograma unitário é um modelo linear de transformação chuva-vazão. É definido como o hidrograma resultante de uma precipitação efetiva de lâmina unitária, uniforme em toda a área de drenagem da bacia hidrográfica.

O uso do hidrograma unitário era dificultado pelo alto grau de subjetividade dos seus problemas, tais como, a separação dos escoamentos superficial e subterrâneo, a determinação da precipitação efetiva e derivação do hidrograma unitário.

No final dos anos 30 e durante os anos 40, muitas técnicas de análises estatísticas foram desenvolvidas no intuito de dar mais objetividade aos modelos e seus resultados.

Um grande avanço ocorreu nos anos 50 e 60, quando os hidrólogos introduziram novas técnicas matemáticas como as do tipo transformada de Laplace e série de Fourier, utilizadas para o ajuste do hidrograma unitário, e procedimento estatísticos como momentos, regressões, máxima verossimilhança, etc.

A teoria dos modelos de regionalização também foi desenvolvida nessa época, permitindo a transferência de dados fluviométricos entre regiões com características físico-climáticas semelhantes, possibilitando um maior aproveitamento dos registros existentes e facilitando a estimativa das variáveis fluviométricas.

Porém, com o desenvolvimento de todas essas técnicas que geravam resultados matemáticos satisfatórios, notou-se o distanciamento dos modelos baseados nos processos hidrológicos do mundo real. Surgiu então uma nova preocupação que era a de aplicar modelos a bacias hidrográficas complexas com uma grande diversidade de características físico-climáticas, tendo sido esses modelos calibrados com bacias hidrográficas de escalas diferentes, quase sempre de pequeno porte.

As últimas décadas do século XX e início do século XXI foram marcadas pelo desenvolvimento de vários modelos hidrológicos concentrados, distribuídos e para previsão em tempo real. Como exemplo dos modelos concentrados pode-se citar no Brasil o IPH com passo de tempo diário (Tucci et al., 1981), com passo de tempo mensal (Tucci, 1998), IPHMEN (Tucci, 1998), o GRH (UFPE, 1999), entre outros.

Esses modelos, de forma geral, têm como característica a utilização de diversos parâmetros que simplificam os mecanismos físicos, geralmente representando um comportamento médio da bacia. É fácil observar que isso afasta o modelo da realidade, dadas as diversidades espaciais caracterizadas nos ambientes físicos.

3.2 – Modelos Hidrodinâmicos

Em paralelo à simulação hidrológica, é preciso compreender como se processa o escoamento na rede de drenagem: canais e rios, sujeitos no caso à influência das marés. 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.

As áreas dos estuários dos rios de Recife e Olinda, em especial a do Capibaribe e a do Beberibe e os canais de maior porte a eles afluentes, apresentam grande variação de suas características em função da amplitude das marés, com fluxo extremamente variável em direção e sentido, necessitando assim o 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) e Baptista et al.. (2003) 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 considera as suas grandezas variando no tempo e no espaço. É a situação mais comum em rios e canais.

As equações de Saint-Venant, também conhecidas como equações unidimensionais do escoamento não-permanente gradualmente variado, são duas equações diferenciais parciais que representam a conservação da massa e da quantidade de movimento ao longo do canal e que não têm solução analítica, exceto em situações bastante simplificadas. Tais equações foram estabelecidas pela primeira vez por Ademas Jean-Claude Baré, conde de Saint-Venant, engenheiro francês, em 1870. Como indicado por Dantas (2005), constituem um sistema de duas equações diferenciais parciais, em x e t , do tipo hiperbólico, que em sua forma completa, sem desprezar nenhum termo, compõem o modelo de propagação de cheia denominado *modelo hidrodinâmico*.

A presença de termos não lineares demanda a utilização de métodos numéricos para a solução, o que hoje é possível em virtude das facilidades computacionais disponíveis. A Figura 3.1, a seguir apresentada por Dantas (2005), ilustra técnicas numéricas de discretização do domínio, usadas na busca para a solução das equações de Saint-Venant. As técnicas mais utilizadas são: *método das características*; *método das diferenças finitas*; e *método dos elementos finitos*.

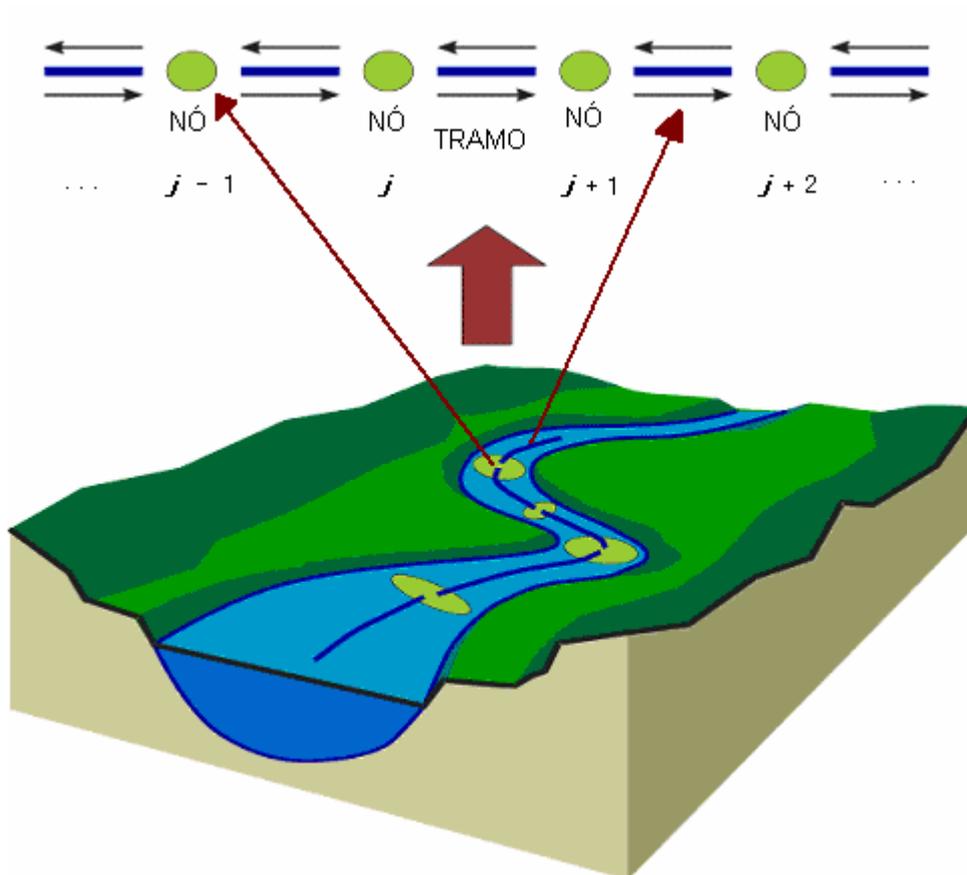


Figura 3.1 - Esquema de discretização de canais apresentado por Dantas (2005)

De acordo com Baptista et al.. (2003), os métodos numéricos, principalmente aqueles baseados nas aproximações por diferenças finitas, vêm sendo desenvolvidos e utilizados para solução das equações completas unidimensionais de Saint-Venant. Dois caminhos na formulação por diferenças finitas para a solução de problemas de valores iniciais e de contorno levam aos métodos explícitos e aos métodos implícitos. Os métodos explícitos conduzem a equações algébricas mais simples, nas quais os valores desconhecidos das variáveis dependentes podem ser escritos exclusivamente em termos de valores conhecidos, mas não são incondicionalmente estáveis sob o ponto de vista numérico. Nos esquemas implícitos, desde que formulados com coeficientes de ponderação adequados, praticamente não há problemas de estabilidade numérica. No entanto essa forma de discretização conduz a equações algébricas nas quais as incógnitas não podem ser escritas exclusivamente em função de valores conhecidos, sendo portanto necessária a resolução simultânea de várias equações.

As equações de Saint-Venant são apresentadas a seguir.

Equação da Conservação da Massa:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q \quad (3.1)$$

Equação da Conservação da Quantidade de Movimento:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + g A \frac{\partial h}{\partial x} - g A (I - J) = 0 \quad (3.2)$$

Sendo

h : profundidade de escoamento

x : distância medida ao longo do canal, de montante para jusante

Q : vazão em uma seção qualquer

q : contribuição lateral de vazão

A : área da seção transversal de escoamento

g : aceleração da gravidade

I : declividade do leito

J : perda de carga por unidade de comprimento, expressa pela Fórmula de Strickler-Manning:

$$J = \frac{n^2 Q^2}{R_h^{4/3} A^2} \quad (3.3)$$

Onde R_h é o raio hidráulico da seção e n um parâmetro de atrito que depende do material que compõe a seção do canal.

As equações diferenciais indicadas podem ser resolvidas discretizando seus termos em diferenças finitas.

Para solucionar as equações são necessárias condições de contorno (vazão ou profundidade conhecidas em cada extremo ou relação $Q \times h$, como curva chave, a jusante). No caso abordado neste trabalho, essas condições são:

- Vazões conhecidas a montante
- Níveis de maré a jusante.

As condições de maré a jusante são aspectos importantes a analisar. Com efeito, todos os cursos d'água da planície de Recife estão sob forte influência das oscilações e avanços das marés, que nas situações de máximas, ditam, ou influenciam, o comportamento do escoamento pelas calhas fluviais. Os níveis de influência dependem da situação hidrológica das bacias em um momento anterior ou concomitante com a atuação das marés máximas.

A Figura 3.2 seguinte ilustra o esquema de discretização das equações no espaço e no tempo.

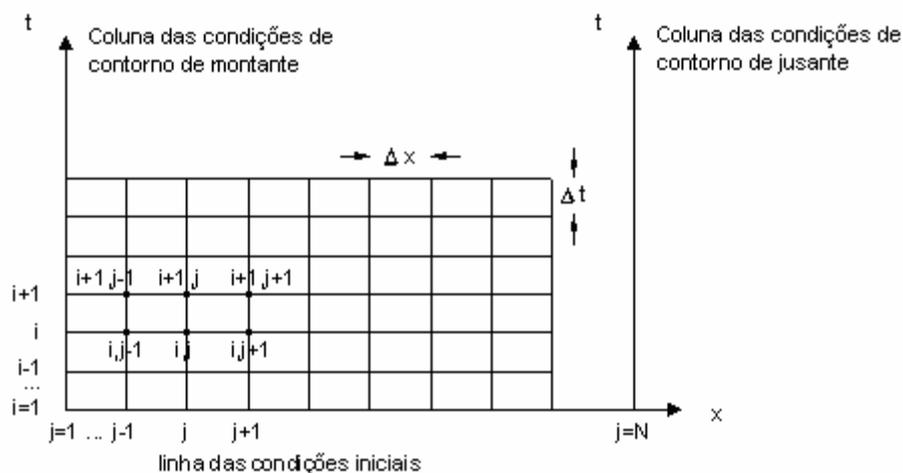


Figura 3.2 - Domínio $x-t$ discretizado com as linhas de condições iniciais e de contorno

As primeiras tentativas realizadas em pesquisa anterior, no caso para o rio Capibaribe (Alcoforado, 2000, Alcoforado e Cirilo, 2001) utilizaram modelo mais simples, em função de:

- Complexidade dos modelos e a dificuldade natural de torná-los de uso prático com rápida obtenção de resultados, uma das premissas daquele trabalho;

- Qualidade dos dados, em particular no que diz respeito ao relevo da área inundável, incompatível com refinamento maior da técnica.

Para representar matematicamente o escoamento na rede de rios e canais que drenam a região em análise serão usadas neste trabalho, portanto, as equações de Saint-Venant. Para isso e em função da interação com sistemas de informações geográficas, foram adquiridos os programas computacionais da “família” MIKE, desenvolvidos pelo Danish Hydraulic Institute (DHI, 2000).

3.3 - Ferramentas Computacionais

O MIKE 11, desenvolvido pelo DHI Water & Environment em 1987, é um software para simulação de fluxo, qualidade de água e transporte de sedimentos em estuários, rios, canais de irrigação e outros corpos d'água (DHI, 2001).

Trata-se de um modelo uni-dimensional que permite análises detalhadas de rios e rede de rios, gerenciamento e operação de sistemas de canais. Apresenta-se de forma flexível, rápida e interage de forma amigável com o usuário. O seu módulo hidrodinâmico baseia-se na solução das equações não-lineares completas de Saint-Venant, por meio de diferenças finitas para superfície livre de fluxo variável em uma dimensão. Em pontos discretos alternados ao longo dos trechos, o MIKE informa valores de profundidade ou cota da superfície livre no escoamento, vazão, velocidade, nº de Froude.

Para a modelagem matemática do escoamento unidimensional à superfície livre, algumas considerações a respeito de como se dará o transbordamento, devem ser analisadas e estabelecidas. A Figura 3.3 apresenta a visualização das seguintes premissas.

1. O escoamento se processa desprezando-se a planície de inundação; apenas os rios são modelados;
2. Na calha principal e em sua projeção até a superfície ocorre o movimento longitudinal, as zonas inundáveis são simuladas como reservatórios de acumulação, sem escoamento e em equilíbrio com o leito menor;

3. A planície de inundação é modelada como uma continuação da seção transversal, o mesmo nível da água é considerado entre o rio e a planície;
4. A planície de inundação e o rio são modelados separadamente, os níveis nos reservatórios de acumulação e no leito principal são diferentes entre si, sendo a ligação entre eles simulada como um vertedouro.

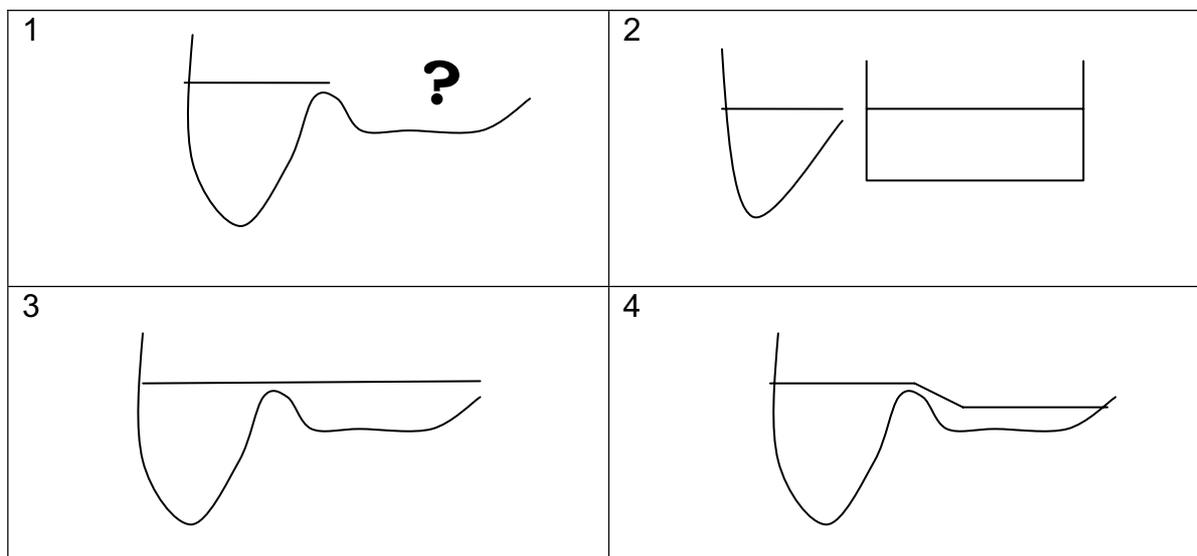


Figura 3.3 – Ilustração das considerações de transbordamento

Dentre os esquemas mostrados, o utilizado neste trabalho foi o segundo. Transbordamento e refluxo ao leito do rio se processam transversalmente, sem considerar o movimento longitudinal na planície de inundação.

Os modelos hidrodinâmicos usualmente consideram os afluentes e o escoamento superficial difuso como contribuições laterais. Isto se deve ao fato de as equações de Saint-Venant não incorporarem a chuva e a bacia, tão somente escoamento em calha fluvial. Portanto, para que seja possível utilizar a chuva no processo faz-se necessário a utilização de um modelo hidrológico para, a partir da chuva e características da bacia, avaliar-se a vazão como contribuição lateral.

O MIKE URBAN A, desenvolvido pelo DHI é um modelo chuva x vazão (Rainfall Runoff) bastante simplificado e de poucos parâmetros, recomendado para projetos de drenagem urbana. No caso, o modelo foi escolhido em função de a área em estudo ser quase que na sua totalidade urbana. O MIKE URBAN A será o responsável por converter toda a precipitação, ao longo da área em estudo, em vazão, que será adicionada como incremento lateral. O modelo utiliza como dados de entrada a

precipitação, um indicador de perdas iniciais, o percentual de área impermeável, o tempo de concentração, a área e a forma da bacia (é fundamentado no método conhecido como “Tempo x Área”). Tal método transforma o hietograma de uma chuva excedente em um hidrograma de escoamento superficial direto, levando em conta apenas o processo de translação (Tucci et al.. 1995). Foram desprezados os efeitos de armazenamento, portanto, pelo pequeno porte da bacia.

Segundo Chow (1964), um modelo é dito determinístico, quando a chance de ocorrência das variáveis envolvidas no processo é ignorada e o modelo segue uma lei definida que não a lei das probabilidades.

Dooge (1973) definiu a diferença entre sistemas estocásticos e determinísticos da seguinte forma: quando, para uma mesma entrada o sistema produz sempre a mesma saída, é dito determinístico, e quando o relacionamento entre a entrada e a saída é estatístico, é dito estocástico.

O MIKE URBAN é portanto um modelo conceitual determinístico. Esses modelos retratam condições médias na bacia e tem como principal objetivo a qualidade do hidrograma de saída. Determinadas variáveis, como por exemplo: capacidade de infiltração, estado de umidade do solo, vazão e nível dos aquíferos, evapotranspiração real são analisadas de forma global. Valores médios são calculados em intervalos de tempo de hora ou dia. Nesses modelos, a continuidade de volume e o armazenamento são os processos retratados por formulações baseadas em parâmetros empíricos, possuindo apenas uma relação qualitativa com as características físicas da bacia (Tucci, 1987).

Os parâmetros envolvidos no modelo são os listados a seguir:

Perdas Iniciais – Definem a quantidade de chuva necessária para que se inicie o escoamento superficial.

Reduções Hidrológicas – Fator devido às perdas por evapotranspiração, imperfeições na área de contribuição, etc. A parcela da evaporação é especificada por entrada de séries temporais ou definida igual a 0,05 mm/h.

Curva Tempo x Área - Determina, em função do lay-out da bacia hidrográfica, o retardo no escoamento, por meio de três funções de forma da bacia (retangular, divergente ou convergente).

Tempo de Concentração – Define o tempo requerido para que o fluxo chegue do ponto mais distante da bacia até o exutório da mesma.

O processo de cálculo do escoamento é discretizado no tempo. A consideração da velocidade de escoamento constante implica que a superfície da bacia hidrográfica seja discretizada espacialmente em um número de células formadas por círculos concêntricos com o ponto do centro coincidindo com o ponto do exutório da bacia. O total do número de células é dado pela seguinte equação:

$$n = T_c / \Delta t \quad (3.4)$$

Onde : T_c = Tempo de concentração

Δt = Passo de tempo da simulação

O MIKE 11 calcula a área de cada célula baseando-se na curva tempo x área especificada. A área total das células é igual à área impermeável especificada.

O escoamento tem início após a quantidade de água proveniente da chuva exceder as perdas iniciais especificadas para a precipitação e encerra quando a quantidade de chuva acumulada na superfície atinge o nível abaixo da perda inicial especificada. Após o início do escoamento o volume acumulado em uma certa célula se move em direção a jusante. O volume real na célula é calculado como um balanço de continuidade entre a vazão de entrada, oriunda da célula a montante, a chuva em questão (multiplicada pela área da célula) e a vazão de saída a jusante. A vazão de saída é na verdade o hidrograma resultante da superfície de escoamento.

Além do modelo citado avalia-se nesse estudo um conjunto de outros procedimentos de análise hidrológica. Estudos realizados para a rede de macrodrenagem da RMR, pelo PQA – Projeto de Qualidade das Águas e Controle da Poluição Hídrica para as Bacias do Beberibe, Capibaribe e Jaboatão (1997), indicaram, em função da disponibilidade de dados e informações secundárias e das

particularidades da área urbana em que se insere a rede de canais, um conjunto de hidrogramas de cheia para tempos de retorno de 10 e 20 anos. Essa análise foi feita utilizando metodologias de Diaz e Tucci (1989) e SCS (Soil Conservation Service, EUA).

Nos estudos do PQA o procedimento proposto por Diaz e Tucci foi referenciado como Método Regional, pelo fato de que se fez uma espécie de regionalização a partir de dados de diversas bacias urbanas de pequeno porte inseridas em áreas intensamente urbanizadas.

- Método Regional

As “expressões regionais” foram definidas tendo por base um agrupamento de bacias com percentual de área impermeável superior a 10% (algumas bacias apresentavam taxas de até 60%) e área de drenagem total inferior a 30,0 km², com características semelhantes às bacias dos canais da rede de macrodrenagem da RMR.

As “expressões regionais” resultantes são:

$$q_P = 0,09 \times A^{0,25} \times IMP^{0,7} \times L_{CG}^{0,47} \quad (3.5)$$

$$\Rightarrow t_p = 10,57 \times q_P^{-0,95} \times A^{1,05} \quad (3.6)$$

$$\Rightarrow L_{25} = 25,7 \times q_P^{-0,93} \times A^{0,68} \quad (3.7)$$

$$\Rightarrow L_{50} = 17,9 \times q_P^{-0,63} \times A^{0,68} \quad (3.8)$$

Onde:

⇒ q_P = vazão de pico do HU (m³/s);

⇒ t_p = tempo de pico do HU (minutos);

⇒ L_{25} = largura do HU ao 25% da vazão de pico (minutos);

⇒ L_{50} = largura do HU ao 50% da vazão de pico (minutos);

⇒ A = área de drenagem da bacia (km²);

⇒ IMP = percentual de áreas impermeáveis;

L_{CG} = comprimento do talvegue até o centro de gravidade da bacia (km).

A aplicação da formulação citada permite obter um HU típico conforme apresentado na Figura 3.5, a seguir.

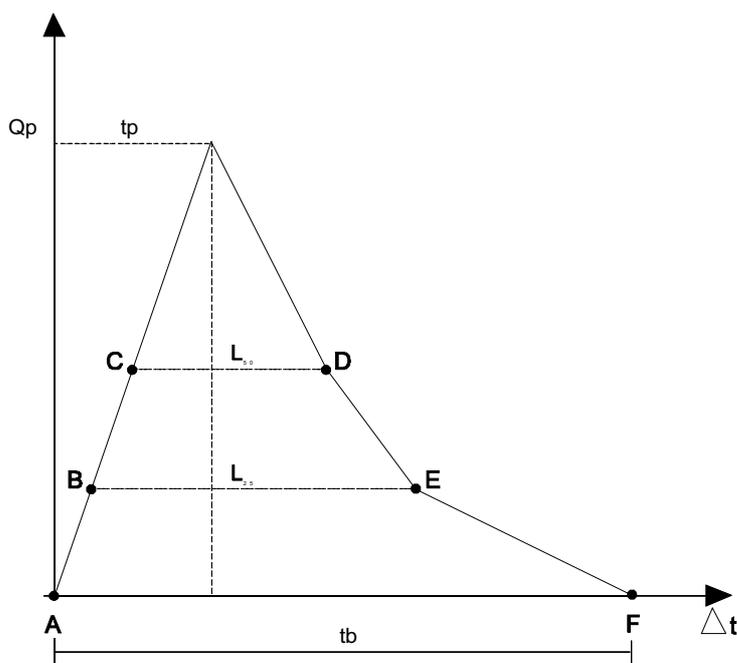


Figura 3.5. - Hidrograma Unitário obtido a partir das expressões regionais.

Paralelamente a outros métodos de cálculo de vazões de cheia, utilizou-se também nos estudos do PQA o Método SCS – desenvolvido no Soil Conservation Service, dos Estados Unidos - para a definição ou comparação das vazões máximas.

- Método SCS

No Método SCS também é empregada a “Teoria do Hidrograma Unitário” para obter os hidrogramas triangulares nos intervalos de tempo definidos pelo usuário. Em seguida é feita a composição dos diversos hidrogramas de forma a obter o hidrograma final.

A Equação proposta pelo SCS para a separação do escoamento é a seguinte:

$$H = (P - 0,2S)^2 / (P + 0,8S) \quad (3.9)$$

Onde:

P = precipitação em mm;

S = retenção potencial do solo em mm;

H = Lâmina escoada em mm.

O valor de S depende do tipo e da ocupação do solo e pode ser determinado a partir da profundidade e tipo de solo ou estimado por tabelas. A quantidade $0,2S$ é uma estimativa de perdas iniciais (A_i), devida à interceptação e retenção em depressões. Por essa razão, impõe-se a condição $P > 0,2S$.

A abstração potencial do solo é associado ao conceito do “Curve Number”:

$$CN = \frac{1000}{10 + \frac{S}{25.4}} \quad (3.10)$$

Onde CN = Curve Number que varia entre 0 e 100 e está relacionado ao tipo de solo, às condições de uso e ocupação e da umidade antecedente.

O hidrograma unitário utilizado no método do SCS é apresentado na Figura 3.6 a seguir.

Onde: t_r = duração da precipitação;

t_p = tempo de pico;

$t'p$ = tempo contado do início da precipitação;

t_c = tempo de concentração;

p_q = vazão de pico.

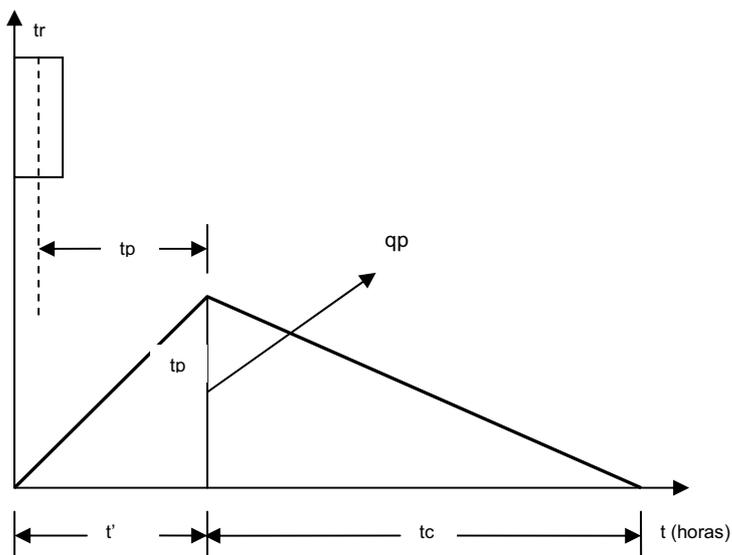


Figura 3.6 – Hidrograma triangular SCS

3.3.1 – Interface de Comunicação

O MIKE GIS, também desenvolvido pelo DHI, é uma ferramenta que permite a visualização dos resultados gerados no MIKE 11 em sistemas de informações geográficas. O MIKE GIS funciona como uma interface entre o MIKE 11 e o ArcView, software de geoprocessamento, possibilitando a visualização em 2 ou 3 dimensões. MIKE 11 e MIKE GIS juntos resultam em uma ferramenta que pode se adequar ao controle e previsão de cheias.

Os mais importantes temas criados no MIKE11 GIS são:

DEM – Digital Elevation Model – representa a elevação do terreno através de polígonos retangulares;

BRS – Branch Route System – Tema com linhas que representa a rede de rios;

FM – Flood Map – Mostra a extensão, profundidade ou duração de um evento de inundação em mapa;

XSC – Cross Section - Ferramenta utilizada para extrair perfis de seções transversais do DEM

AEC – Storage Cell – Extrai do DEM curvas de área x elevação.

Para que o MIKE GIS possa realizar as transferências de arquivos entre os dois softwares é fundamental que os arquivos sejam desenvolvidos na mesma base cartográfica.

Após realizadas as simulações no MIKE 11, o MIKE GIS permite transportar os resultados para o ArcView e daí a sobreposição das planícies de inundação sobre mapas e imagens de satélite da área, a fim de facilitar a interpretação dos resultados.

4. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA EM ESTUDO

4.1 - Posicionamento Histórico

Olinda e Recife, cidades das mais antigas do nosso país, datam do Brasil colonial. “São duas cidades numa só: Recife e Olinda”. Impossível separá-las (Maia et al.. 1978). “Ó linda situaçam para se fundar huma villa!” Com tal exclamação Duarte Coelho, em princípios do século XVI, teria escolhido e batizado o sítio onde viria a se edificar Olinda. A Figura 4.1 mostra foto de Olinda e estuários dos rios Capibaribe e Beberibe.



Figura 4.1 – Foto de Olinda, em destaque a matriz de São Pedro

Em 1630, com a tomada de Olinda pelos holandeses e conseqüente incêndio, cresceu a população do Recife, a princípio simples povoado de pescadores. Cresceu e tornou-se cidade, uma grande metrópole com terras conquistadas à água com dois rios ao invés de um só, aterrando-se os canais naturais e aproveitando os velhos assoreamentos, fazendo de uma cidade um grupo de ilhas: quase um arquipélago. (Freyre et al.. 1970).

A pequena aglomeração portuária, onde se iniciou a expansão da cidade do Recife, a 4 km de Olinda, foi gerada por iniciativas de colonos, sem apoio da Capitania.

Esse assentamento desenhava-se conforme a península, dentro do perímetro natural menos sujeito às marés, enquanto que a Vila de Olinda, dispunha de igrejas, prédios públicos e residenciais confortáveis, destinados à elite política e agrária.

O nome Ar'Raçif, a "calçada do mar", é o termo Islâmico para descrever a formação rochosa que batiza a cidade.

O sítio geográfico do Recife configurou-se às margens do Oceano Atlântico, no Estado de Pernambuco, Nordeste do Brasil. Ergueu-se lentamente sobre uma enseada cujos limites eram as bordas das colinas terciárias, ainda hoje subsistentes, que lhe torneavam as águas. Do leste, o mar; do oeste, os rios, em processo hidrodinâmico, forjaram-lhe a restinga. Entre esta e os arrecifes, o ancoradouro natural – principal fato gerador da cidade – e, adentrando, a ocidente, as ilhas de aluvião do delta. A natureza já cumprira o seu papel, restando ao homem a gestão final, a ampliação dos solos em detrimento da água. O Recife se aperta entre o rio e o mar.

Antes de ser a capital, o Recife era domínio da Mata Atlântica e das águas, doces dos rios e as salinas das marés, ocorrendo a troca entre essas águas na região denominada de baixo estuário, propiciando o desenvolvimento dos manguezais, que ainda hoje ocupam mais de 13 ha, junto às áreas densamente urbanizadas do Recife (Rocha et al.. – 2004).

As Figuras 4.2 e 4.3 mostram fotos atuais do Recife. A Figura 4.4 mostra foto antiga do Rio Capibaribe que, no princípio, permitia o acesso de grandes embarcações.



Figura 4.2 – Pontes do Recife



Figura 4.3 – Margem do Capibaribe



Figura 4.4 – O Rio Capibaribe com acesso de grandes embarcações

No século XIX o crescimento foi muito grande. A população passou de cerca de 20 mil habitantes em 1800, para mais de cem mil no final do período. Daí vieram as reivindicações da população ao governo provincial, depois da independência, por abastecimento de água, esgotos e cemitérios fora das igrejas. Nesse período o Porto do Recife foi um dos mais movimentados das Américas.

O crescimento urbano do Recife dá-se em duas fases distintas. A primeira envolve os quatro primeiros séculos, efetivando-se através de conquistas lentas de terras secas, aproveitando os assoreamentos. A segunda depois de 1907, quando se abrem grandes avenidas. Dessa época, data-se o grande mapeamento da cidade, um mapa litografado. Douglas Fox foi o seu autor (Menezes, 1988). A Figura 4.5 mostra mapa de 1915 onde se pode já observar o crescimento acentuado, por conquista gradual de terras ao rio, em aterros sucessivos das áreas de alagados e mangues.

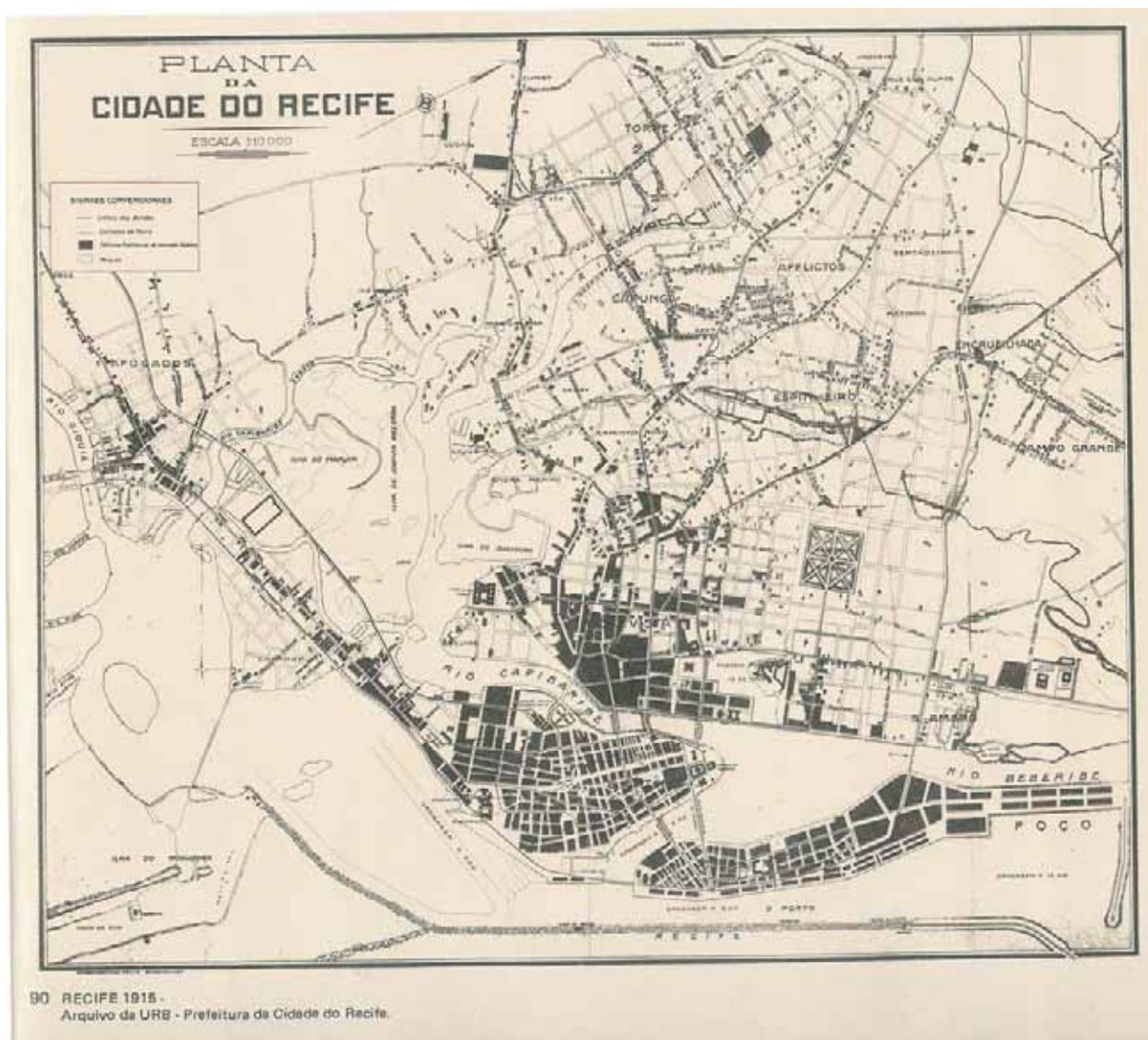


Figura 4.5 – Mapa da Cidade do Recife em 1915 (Menezes, 1988).

“A Cidade do Recife nasceu e cresceu em sucessivas levas de avanço das terras, inicialmente sobre o mar, depois sobre os rios, os canais, lagoas e alagados. Tão ampla foi essa intervenção no seu meio físico, que a cidade tem hoje a sua drenagem sufocada e em muitos pontos afunda sob o peso dos aterros” Gusmão (1988).

A Figura 4.6 mostra comparativo entre uma foto antiga do Recife no bairro de Boa Viagem e imagem de satélite do local atualmente.

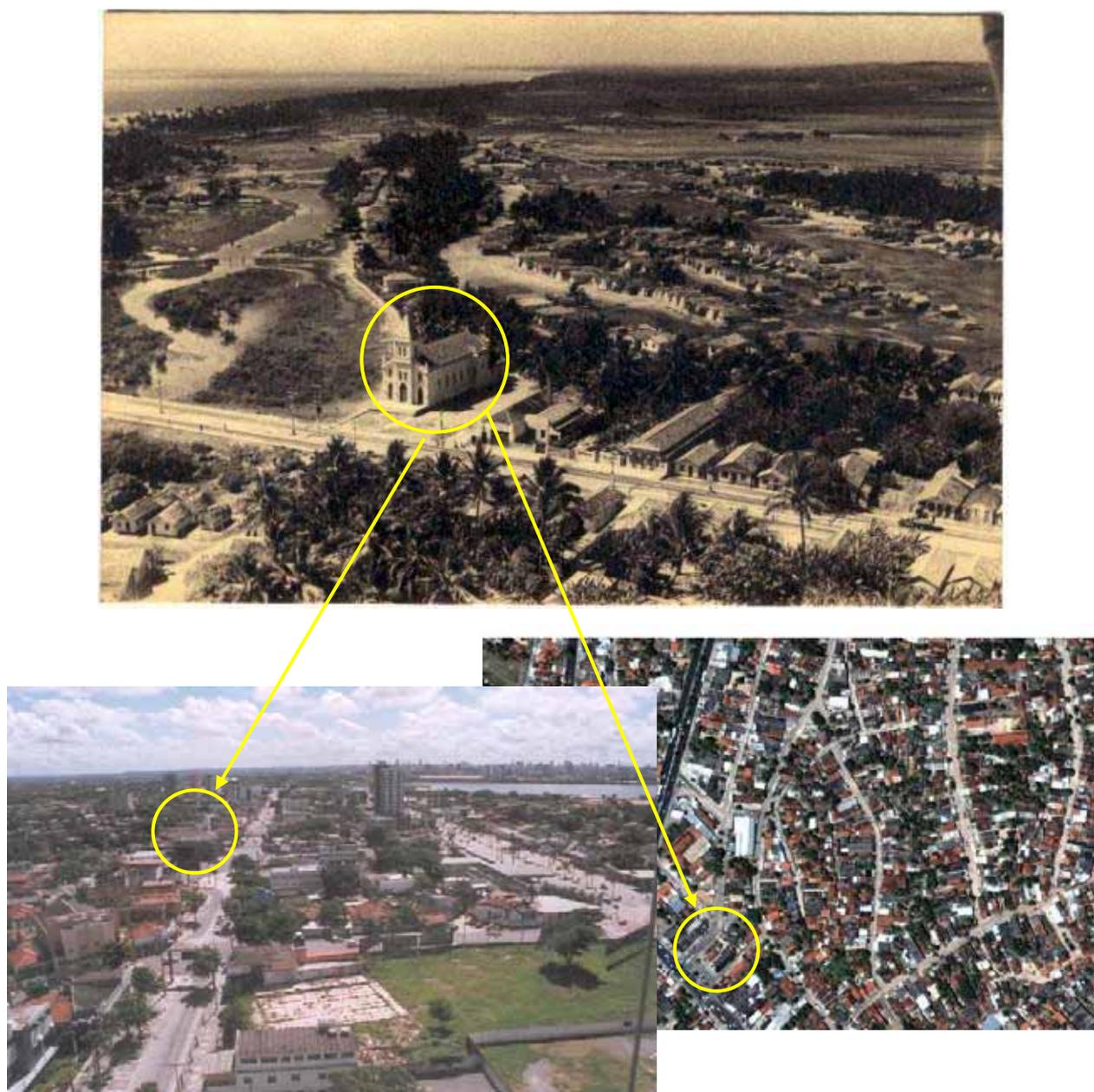


Figura 4.6 – A igreja do Pina em destaque. Do lado esquerdo um alagado que foi totalmente aterrado, dando lugar à Av. Domingos Ferreira, principal acesso ao bairro de Boa Viagem, que pode ser visto ao fundo, e no detalhe imagem de satélite e foto atual da área.

Juntamente com o ambiente litorâneo, os morros foram também preservados em suas características, situados a norte, oeste e sudoeste.

4.2 - Rede de Drenagem

O processo de formação da Planície do Recife tem como influência geológica mais recente o fenômeno do avanço e recuo do mar, ocorrido durante o período Quaternário e responsável por importantes unidades de depósito de sedimentos, os bancos de arenitos, que afloram nas praias de Recife em época de maré vazante. Os depósitos flúvio-lagunares e os mangues complementam as planícies até o encontro com as bordas da Formação Barreiras, nos morros.

Os sistemas de drenagem são diretamente influenciados por processos de erosão em áreas urbanas, com a ocupação dessas áreas alterando as condições de equilíbrio. Nas áreas de maior declividade ocorre o processo de erosão acentuada, já nas partes planas, ocorre o assoreamento dos cursos d'água em função do material carregado. O mau uso e ocupação do solo, como o desmatamento e os aterros, também contribuem no processo de erosão.

O clima predominante em toda a área em estudo é o tropical úmido com precipitações média anual de 2450,7mm (medida entre os anos de 1961 a 1990). O relevo apresenta uma grande parte montanhosa com cotas até 150m e uma extensa planície com cotas até 10 metros, os morros ao redor da planície contribuem para acelerar o escoamento alagando a planície. As bacias do Capibaribe e Beberibe dispõem de uma rede hídrica de aproximadamente 105 km na região em estudo.

No Recife e em Olinda, há ocorrência de muitos locais ocupados de forma inadequada por populações de baixa renda em maior parte, como também empreendimentos comerciais, edifícios residenciais e até hospitais ocupando áreas "roubadas" ao leito do rio. Nas áreas de encostas, por outro lado, são freqüentes os deslizamentos, quase sempre decorrentes de erosões localizadas, comuns durante as épocas de chuvas mais intensas. As vezes tais eventos chegam a ter grande repercussão, por envolver consideráveis prejuízos materiais e até perdas de vidas humanas (SEPLAN/PE, 1997).

Os efeitos da erosão são amplamente visíveis nas estruturas de macrodrenagem, mas vale salientar que o seu controle está diretamente ligado às questões de microdrenagem.

Na chamada Planície de Recife destacam-se as bacias dos rios Capibaribe, Beberibe e Tejipló, que com seus meandros e a zona estuarina formam a planície flúvio-marinha com grandes porções de áreas alagáveis e de solo pouco resistente. “Esses solos foram, ao longo de 4 séculos, sendo aterrados de forma desordenada. A ocupação de encostas e morros por assentamento informais é, em relação à questão da drenagem, a atividade mais danosa. O desmatamento excessivo, os cortes e aterros indiscriminados, a inexistência de muros de contenção e drenos, são os maiores causadores de erosão nessas áreas e, conseqüentemente, responsáveis pelo intenso assoreamento que se verifica nos canais e cursos d’água” (SEPLAN/PE, 1997).

Foram escolhidas como objeto de estudo neste trabalho a bacia do rio Capibaribe, apenas a parte inserida na RMR – Região Metropolitana do Recife, e a bacia do rio Beberibe, que corta as cidades de Recife e Olinda. Observa-se que o divisor de águas dessas duas bacias é facilmente identificável na parte montanhosa, mas na grande parte plana a separação é bem difícil, fazendo com que muitas vezes as bacias se confundam. Essa dificuldade em definir um divisor de águas entre essas duas bacias é evidenciada pela presença do canal Derby-Tacaruna, que vai desde o Capibaribe até à foz do rio Beberibe, unindo as duas bacias. Esse referido canal data de 1970, quando um grande mangue, que cortava as duas cidades, foi aterrado para a construção da avenida Agamenon Magalhães, com a presença do canal entre as duas pistas. Este canal conta com um sistema de comportas, uma no início e outra no final, que abrem e fecham em função da variação da maré. Esse sistema foi instalado com o objetivo de evitar os transbordamentos devido ao movimento das marés.. Ambos os rios deságuam no Oceano Atlântico e o Capibaribe apresenta uma influência de maré viva estimada em 22 Km.

A bacia do Rio Tejipló, integrante da planície do Recife, não foi considerada nos cálculos, devido à dificuldade de acesso para a realização dos levantamentos e medições em campo. Trata-se de uma área bastante poluída, com muitos rios naturais e favelas nas duas margens. Apresenta nas margens um grande acúmulo de lama, tornando difícil o acesso à água. Esta bacia conta ainda com o manguezal do Pina, uma área com mais de 10 ha, que separa os corpos d’água.

A Figura 4.7, a seguir, apresenta uma vista aérea do manguezal do Pina.



Figura 4.7 – Manguezal do Pina, na bacia do Rio Tejió

4.2.1 - Bacia do Rio Capibaribe

O Capibaribe é, sem dúvida, o rio mais importante do estado. Nasce nas vertentes da Serra do Jacarará, no município de Poção e tem 240 km de extensão. Em sua bacia estão localizados 39 municípios e o rio deságua no Oceano Atlântico, depois de cortar toda a cidade do Recife.

A área total da bacia é de aproximadamente 7.400 Km², correspondendo a aproximadamente 7,8% da área do estado. A porção do Capibaribe compreendida nos limites da Região Metropolitana do Recife representa parcela reduzida desta unidade hidrográfica.

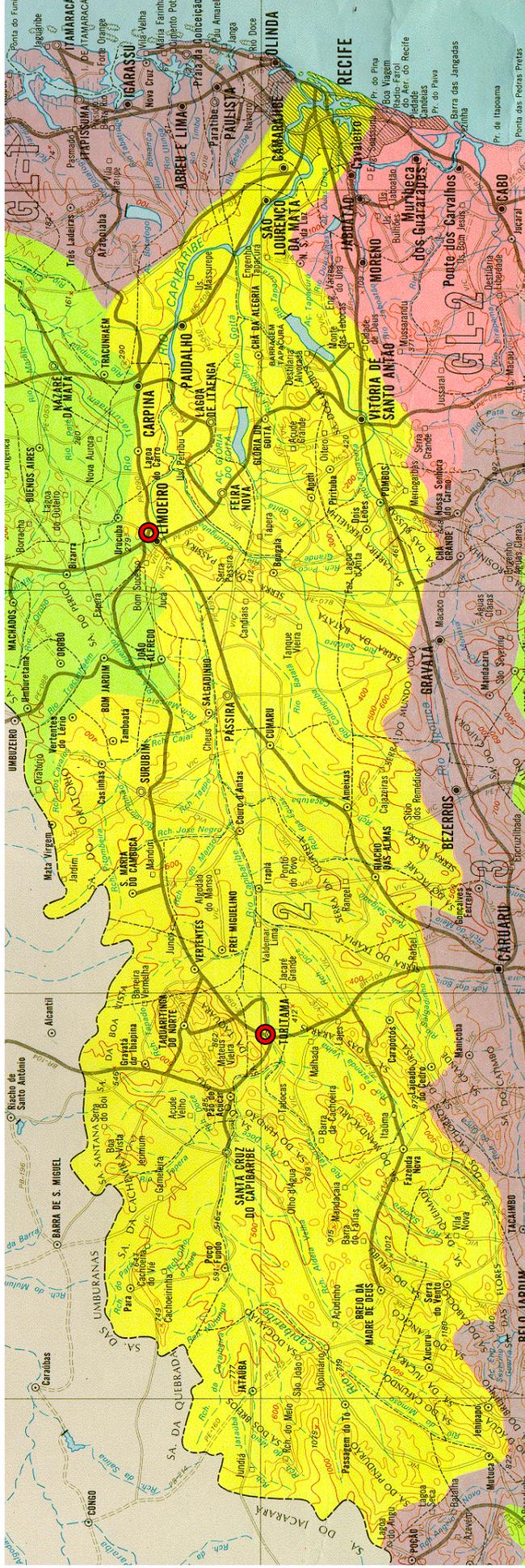
O Capibaribe tem seu curso dividido em três trechos: superior, médio e inferior. Os alto e médio cursos do rio estão situados no Polígono das Secas, onde o rio apresenta regime temporário. O Capibaribe, em seus primeiros movimentos, apresenta-se como um pequeno filete de água, que seca na maior parte do ano, transformando o rio em um caminho de areia. Esse trecho da bacia é caracterizado ainda pela presença de bastante água no subsolo, tornando a área fértil e favorável ao aproveitamento das aluviões. O rio se torna perene a partir do município de Limoeiro, na região agreste do estado, até o seu desaguadouro, na cidade do Recife. Ao longo do seu curso, o Capibaribe, drena 41 municípios, dos quais 27 estão com suas sedes inseridas na bacia, atravessando vários centros urbanos, servindo de corpo receptor de resíduos industriais e domésticos. Seu mais importante afluente é o Rio Tapacurá, o clima predominante é o semi-árido e menos de 20% de sua área têm chuvas acima de 800 milímetros.

Dois fatos relevantes associavam-se a esta bacia, na RMR: as enchentes catastróficas que, periodicamente, assolavam a capital e a presença da represa de Tapacurá, responsável pelo suprimento hídrico de parte da população metropolitana. Em relação às cheias, o Governo Federal, após à grande cheia de 1975, concluiu a construção das barragens de Carpina e Goitá e recentemente Jucazinho, as quais, juntamente com a de Tapacurá e melhorias introduzidas no leito do rio, na zona urbana, compõem o conjunto de obras de grande porte para a defesa contra inundação da capital.

A Figura 4.7 mostra a foz do rio Capibaribe. A Figura 4.8 apresenta a bacia do rio Capibaribe, como parte do mapa de bacias hidrográficas de Pernambuco (SECTMA/PE, 1998), destacando os municípios de Toritama, limite do Alto Capibaribe, e Limoeiro, limite da parte média da bacia, onde o rio passa a ser perene. A Figura 4.9 apresenta um esquema com a localização das barragens de proteção e abastecimento.



Figura 4.7 – Foz do rio Capibaribe



20 Kilometers

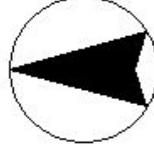


Figura 4.8 – Bacia do Rio Capibaribe, mapa de divisão de bacias hidrográficas de Pernambuco

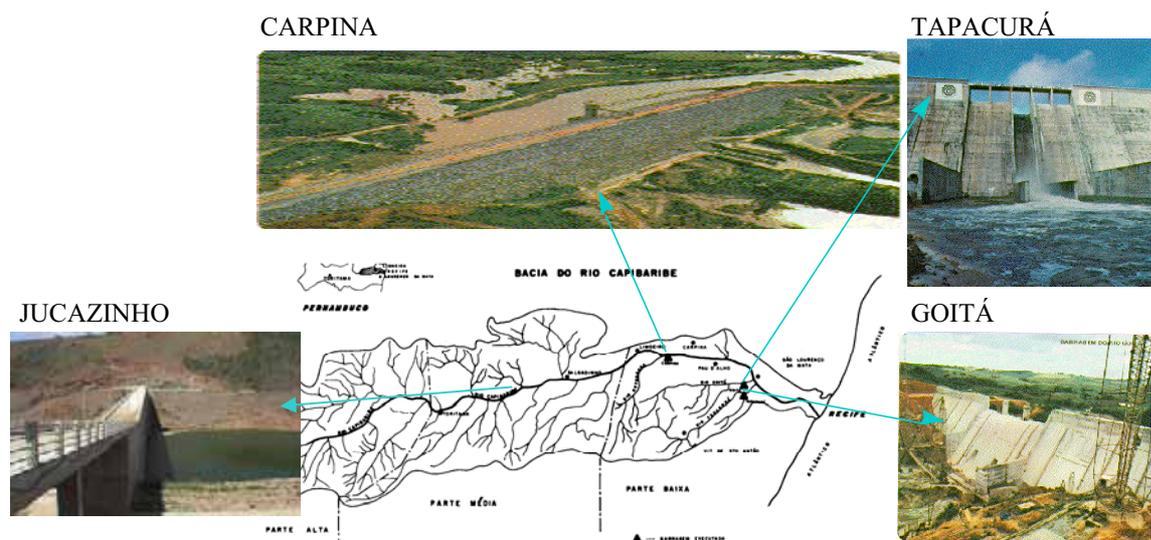


Figura 4.9 – Bacia do Capibaribe e esquema com a localização das barragens, da esquerda para a direita: Jucazinho, Carpina, Tapacurá e Goitá.

4.2.2 - Bacia do Rio Beberibe

O rio Beberibe nasce em um lugar chamado Cabeça de Cavalo, no córrego denominado das Pacas, entre os municípios de São Lourenço da Mata e Olinda, mais precisamente nas matas do Engenho Timbó e Massiape, sendo formado pela junção dos riachos das Pacas e Araçá. Somente após esta confluência é que passa a receber a denominação de Beberibe. A área da bacia é de 79 km², totalmente inclusa na RMR - Região Metropolitana do Recife. Para o nome Beberibe, se encontram na literatura alguns significados, dentre eles o mais cabível sendo “voar em bando”, explicável por seu passado de margens cobertas por árvores, onde aves reuniam-se em bandos, e que ao menor ruído voavam juntas. A sua mais antiga referência data de 12 de março de 1537 e é encontrada no chamado Foral de Olinda, quando o Donatário da Capitania de Pernambuco, Duarte Coelho Pereira, assim refere-se ao porto da capitania “...a ribeira do mar até o Arrecife dos Navios, com suas praias, até o Varadouro da Galeota, subindo pelo Rio Beberibe...”.

O rio Beberibe é um dos rios componentes da bacia hidrográfica GL-1, composta por grupo de rios litorâneos, totalmente pertencente ao estado de Pernambuco. A Figura 4.10 a seguir mostra essa bacia no mapa de divisão de bacias hidrográficas de Pernambuco (SECTMA/PE, 1998).

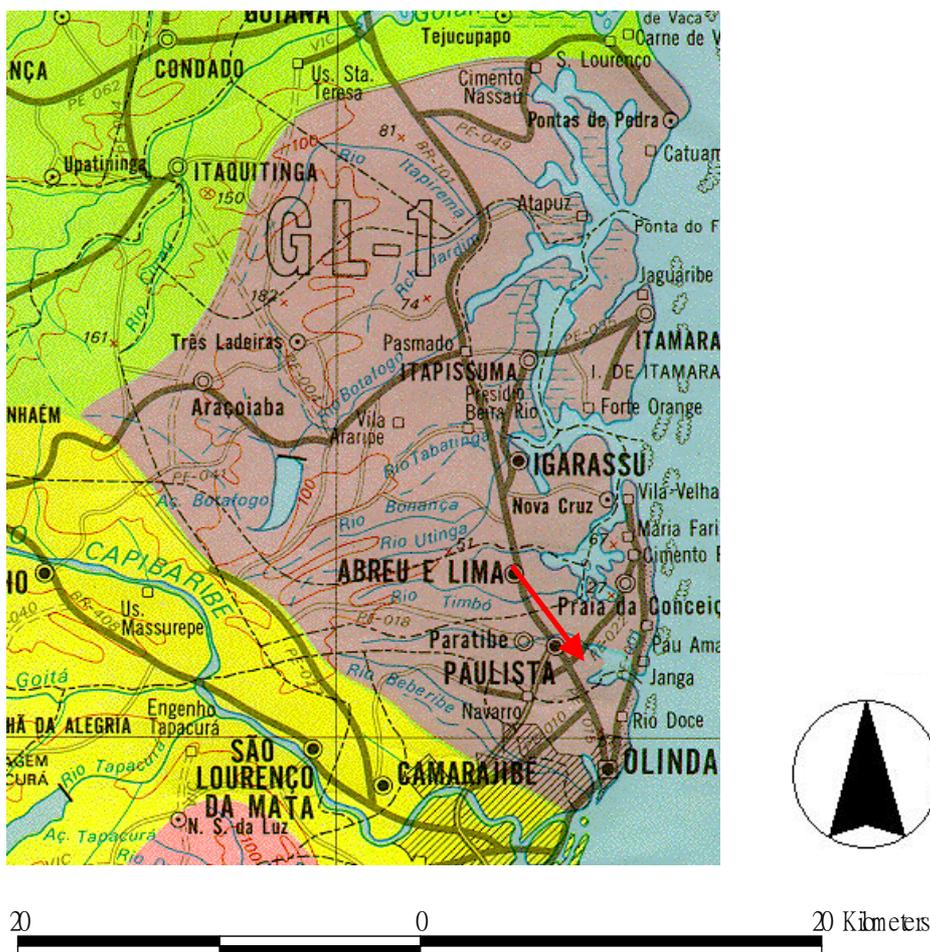


Figura 4.10 - Bacia hidrográfica GL-1, mapa de bacias hidrográficas de Pernambuco, destacando o rio Beberibe

A BR – 101 divide esta bacia em dois setores distintos. A oeste desta rodovia os terrenos encontram-se ainda desocupados, com resquícios de mata exuberante e vegetação original desta região. A outra parte, a leste, apresenta-se bastante ocupada. Esta bacia destaca-se ainda por ter partes de suas áreas drenadas inseridas nos municípios de Olinda e Recife, inclusive definindo, parcialmente, os limites entre ambos.

Os estudos realizados pelo SEPLAN/PE (1997) subdividiram essa bacia em três partes distintas, a saber:

Beberibe superior - Correspondente à drenagem do curso principal situada a oeste do traçado da BR-101, está inserida em região elevada, com inúmeras nascentes perenes não poluídas e coberta com vegetação. Para essa área previa-se um forte processo de

antropização, com a conseqüente impermeabilização das áreas de montante. Essa impermeabilização diminuiria a capacidade de infiltração das águas das chuvas, reduzindo o escoamento de base, e portanto diminuindo o potencial de regulação natural dos deflúvios de superfície, aumentando assim os escoamentos de superfície durante os eventos chuvosos, podendo dar origem a situações de risco de inundações a jusante.

Beberibe médio - Compreende o trecho entre a BR-101 e a confluência com o rio Morno. Contrasta com o trecho superior por apresentar um vale aberto, com margens planas, freqüentemente ocupadas pelos excessos hídricos veiculados durante as estações chuvosas. As edificações são mais escassas nessa área.

Beberibe inferior - Correspondente à porção mais habitada da bacia, apresenta amplos claros (vazios quanto à ocupação) nas zonas planas mais alagadiças. O nível de adensamento e impermeabilização de alguns dos aglomerados urbanos presentes na área já se encontram-se próximos ao limite de saturação.

São cinco as principais sub bacias em que pode ser dividida a bacia do Beberibe, a saber: do riacho das Pacas, do rio Morno, do canal Lava Tripas, do canal Vasco da Gama - Arruda e do canal da Malária. A Figura 4.11 mostra o contorno da bacia do rio Beberibe e as cinco sub bacias citadas.

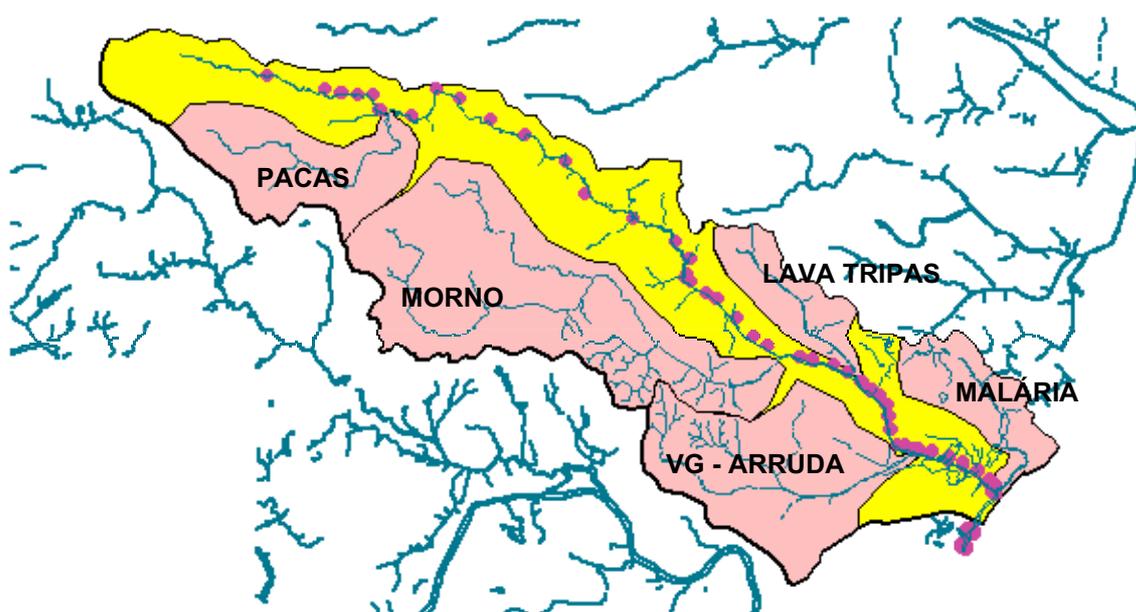


Figura 4.10 – Bacia do Beberibe com a divisão das cinco sub-bacias, na margem esquerda: Lava Tripas e Malária, e na margem direita: Pacas, Morno e Vasco da Gama Arruda.

A Figura 4.12 mostra a foz do rio Beberibe



Figura 4.12 – Foz do Rio Beberibe

Afluindo a esses rios encontram-se uma grande quantidade de cursos d'água secundários ou canais, das mais variadas espécies, revestidos ou não revestidos, abertos ou fechados. Esses canais surgiram, em sua maioria, como consequência de drenagem de aterros em locais alagadiços, que provocam impermeabilizações e diminuição do processo natural de infiltração da água no solo, aumentando o escoamento superficial.

4.2.3 - Base Cadastral da Rede de Rios e Canais

A Prefeitura da Cidade do Recife, através da EMLURB – Empresa de Manutenção e Limpeza Urbana, catalogou todos canais da cidade do Recife, montando um cadastro com as mais variadas informações a respeito destes.

O cadastro foi dividido por bacias hidrográficas, a saber: bacia do Beberibe, do Capibaribe, do Jiquiá, do Tejió e do Jordão. Parte dessas cinco bacias compõem a cidade do Recife.

Esse material serviu como ponto de partida para o trabalho de catalogação dos canais. O “Cadastro de Canais”, como foi denominado, apresenta mapas de localização, ficha técnica e várias fotos de todos os canais apresentados. Trabalho em campo foi realizado com o objetivo de averiguar todas as informações contidas, bem como adicionar alguns dados necessários ao conhecimento de sua geometria, para a entrada de dados nos modelos de simulação, tanto hidrológico como hidrodinâmico.

A Tabela 4.1 a seguir apresenta o cadastros dos canais pertencentes às bacias do Capibaribe e Beberibe, que são os canais deste estudos.

As Figura 4.13 e 4.14, a seguir, apresentam diagrama unifilar das bacias do Beberibe e Capibaribe, respectivamente, com os trechos de rios e canais considerados na modelagem. Outros foram incorporados como escoamento superficial difuso, como será posteriormente explicado

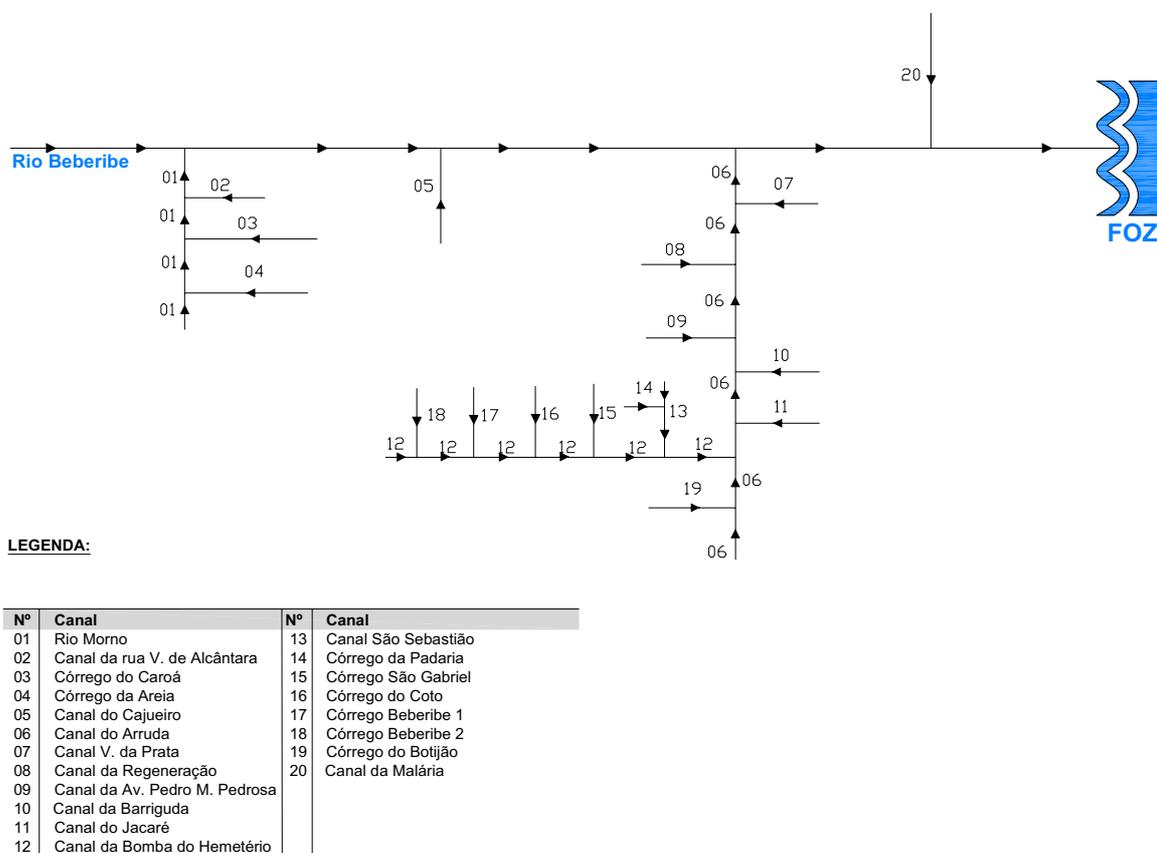


Figura 4.13 – Diagrama Unifilar da Bacia do Rio Beberibe

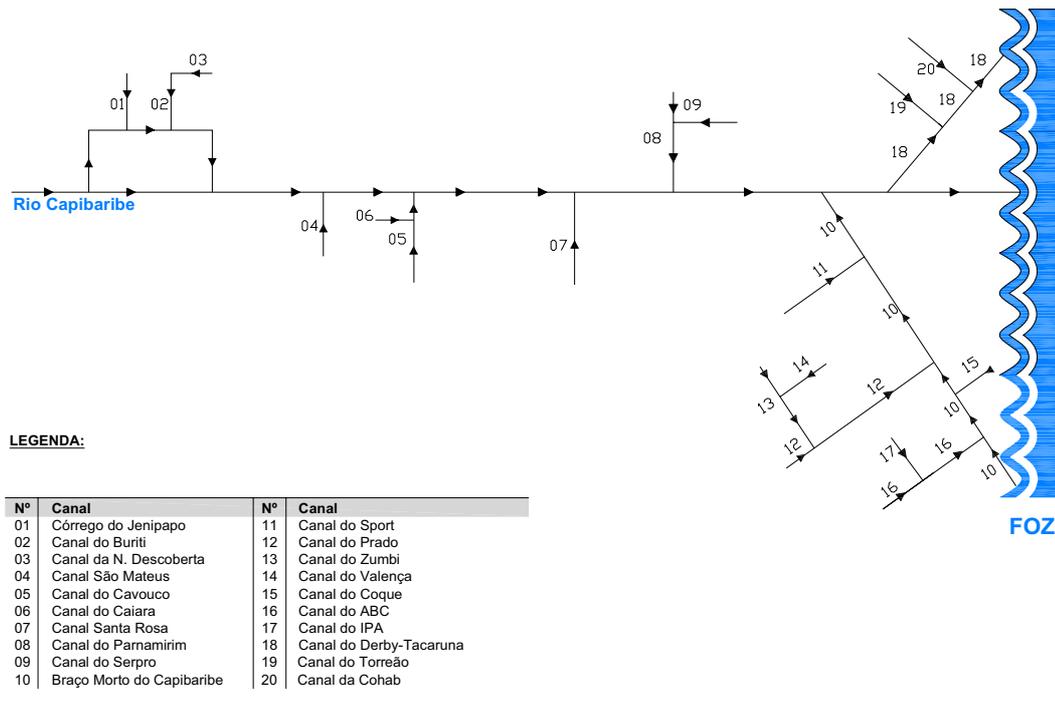


Figura 4.14 – Diagrama Unifilar da Bacia do Rio Capibaribe

Tabela 4.1 – Ficha Técnica dos Canais

Nome	Bacia	Bairro	Principais Ruas Cortadas	Trecho	Seção	Largura	Tipo de Revestimento	Cond. Revest.	Tipo de limpeza	Observações
Córrego Antônio Rodrigues	Beberibe	Alto do Pascoal		A - B	Irregular	1,4	alvenaria de pedra	regular	manual	não sofre inundações
Canal do Arruda	Beberibe	Alto do Pascoal	Estrada Velha de Água Fria, Avenida Beberibe, Rua Petronilla Botelho	A - B	Trapezoidal	9,8	Concreto	regular	mecanizado	Existem muitas placas danificadas. Não sofre inundações
	Beberibe	Alto do Pascoal		B - C	Irregular	30	nenhum		mecanizado	A pista foi construída dos dois lados do canal, entre a Rua Petronilla Botelho e a Rua Jerônimo Villela, onde foi construída uma nova ponte. Não sofre inundações
	Beberibe	Alto do Pascoal		C - D	Retangular	25	nenhum		mecanizado	O fim do trecho apresenta revestimento em concreto. Não sofre inundações
Canal da Avenida Pedro de Melo Pedrosa	Beberibe	Arruda	Rua das Moças, Av. Prof. José dos Anjos	A - B	Irregular	7,5	nenhum		mecanizado	O canal se encontra parcialmente coberto por plantas, o que pede a sua limpeza. Há um estrangulamento da seção, o que provoca inundações
	Beberibe	Arruda		B - C	Irregular	6	nenhum		mecanizado	Possui os mesmos problemas que a seção anterior
Canal da Barriguda	Beberibe	Hipódromo	Av. Beberibe, R. Dona Euvira, R. Mem de Sá	A - B	Trapezoidal	3,8	Blocos de Concreto	regular	mecanizado	O início do canal possui muita vegetação em seu interior, que precisa ser retirada. Sofre com inundações
	Beberibe	Hipódromo		B - C	Trapezoidal	4,8	Blocos de Concreto	regular	mecanizado	Existe vegetação no revestimento. É um trecho sujeito a transbordamentos
	Beberibe	Hipódromo		C - D	Irregular	5	Nenhum		mecanizado	não sofre inundações
Canal da Bomba do Hemetério (Córrego do Euclides)	Beberibe	Morro da Conceição	Rua Marial, R. Padre Oliveira, R. São Gabriel, R. Jacob	A - B	Trapezoidal	3,5	Concreto	Boa	Manual	não sofre inundações
	Beberibe	M. da Conceição		B - C	Retangular	3,8	alvenaria de pedra	Boa	manual	não sofre inundações
	Beberibe	M. da Conceição		C - D	Trapezoidal	2,9	Concreto	regular	manual	não sofre inundações
	Beberibe	M. da Conceição		D - E	Trapezoidal	3,7	alvenaria de pedra	Boa	manual	não sofre inundações
	Beberibe	M. da Conceição		E - F	Trapezoidal	3,7	Concreto	Boa	manual	não sofre inundações
Córrego do Botijão	Beberibe	Vasco da Gama	Rua Córrego do Bantolomeu, R. Frederico Ozanam, R. 2 de Fevereiro	A - B	Trapezoidal	0,8	alvenaria de pedra	regular	manual	Há problemas com inundações
	Beberibe	Vasco da Gama		B - C	Trapezoidal	1,4	alvenaria de pedra	regular	manual	
	Beberibe	Vasco da Gama		C - D	Trapezoidal	3,9	alvenaria de pedra	regular	manual	
	Beberibe	Vasco da Gama		D - E	Trapezoidal	3,9	Concreto	regular	manual	
Canal do Cajueiro	Beberibe	Cajueiro	Rua Belo Horizonte, R. Pará	A - B	Retangular	1,6	alvenaria de pedra	regular	manual	O trecho possui um pouco de vegetação brotando do revestimento, a qual precisa ser removida. Não sofre inundações
	Beberibe	Cajueiro		B - C						Não é possível estabelecer os parâmetros acima, pois o trecho se encontra coberto por lajes
	Beberibe	Cajueiro		C - D	Trapezoidal	2,5	alvenaria de pedra	regular	manual	Há vegetação brotando do revestimento. Não sofre inundações
	Beberibe	Cajueiro		D - E	Trapezoidal	2,5	alvenaria de pedra	regular	mecanizado	Existe problema de transbordamento no ponto C, devido à altura do terreno ser pequena
	Beberibe	Cajueiro		E - F	Retangular	3	Esquedo - Alvenaria de pedra	regular	mecanizado	Há necessidade de limpeza da margem do canal, onde há muita vegetação.
Córrego do Carvão	Beberibe	Vasco da Gama	Rua Pardal, Estrada do Brejo	A - B	Retangular	1,7	alvenaria de pedra	regular	manual	No pontilhão existente na Rua Belo Horizonte, pode haver problemas com a oscilação de mórás
	Beberibe	Vasco da Gama		B - C	Trapezoidal	2	alvenaria de pedra	regular	manual	não sofre inundações
	Beberibe	Vasco da Gama		C - D	Irregular	3	nenhum		manual	Não sofre inundações e há um pouco de lixo no revestimento
Córrego da Areia	Beberibe	Nova Descoberta	Rua Craolândia, R. J. Iereira, R. Sanharó, Av. Vereador Otacilio	A - B	Retangular	1,2	alvenaria de pedra	Boa	manual	Há problemas com inundações
	Beberibe	Nova Descoberta		B - C	Retangular	1,4	alvenaria de pedra	Boa	manual	É um trecho inundável
	Beberibe	Nova Descoberta		C - D	Trapezoidal	3	alvenaria de pedra	Boa	manual	Não sofre inundações
	Beberibe	Nova Descoberta		D - E	Irregular	7,2	nenhum		manual	Não sofre inundações
Córrego do Cotó	Beberibe	Mangabeira	Rua Bomba do Hemetério	A - B	Retangular	2,1	Concreto	regular	manual	É um trecho inundável e possui lixo e vegetação
	Beberibe	Mangabeira		B - C	Trapezoidal	4,1	Concreto	regular	manual	Não sofre inundações
Canal do Jacaré	Beberibe	Tamarineira	Avenida Norte, Av. Prof. José dos Santos	A - B	Irregular	6	nenhum		manual	O início do canal se encontra encoberto por vegetação densa e tem problemas com inundações
	Beberibe	Tamarineira		B - C	Trapezoidal	4,3	Concreto	regular	manual	O revestimento possui rachaduras e vegetação. Não sofre inundações
Córrego da Padaria	Beberibe	Beberibe	Rua Padre de Castro, R. Petrovina	A - B	Retangular	0,6	alvenaria de pedra	Boa	manual	Esse trecho possui um canal de cada lado da rua, com dimensões constantes
	Beberibe	Beberibe		B - C	Trapezoidal	1,35	alvenaria de pedra	Boa	Manual	Há lixo, vegetação e acúmulo de areia no interior do canal

Tabela 4.1 – Ficha Técnica dos Canais: continuação

Canal da Regeneração	Beberibe	Arruda	Rua do Machado, R. Major Guilherme, R. das Moças	A - B	Irregular	4.5	nenhum		Manual	Esse trecho é parcialmente revestido, com bastante vegetação e precisa de limpeza. Não sofre inundações
	Beberibe	Arruda		B - C	Irregular	3.8	nenhum		mecanizado	Existe um buéio subdimensionado sob uma passarela, o que provoca inundações na área. Há necessidade de limpeza
	Beberibe	Arruda		C - D	Irregular	3.4	Esquendo - Alvenaria	regular	mecanizado	O revestimento existente nesse trecho é formado pelo muro das casas existentes ao longo de sua extensão. É necessária limpeza do revestimento. Há, também, um grande acúmulo de lixo provocado por passarelas muito baixas. Esse lixo é formado, principalmente, por garrafas plásticas descartáveis. É um trecho inundável
	Beberibe	Arruda		D - E	Irregular	3.4	nenhum		Manual	O trecho tem problemas com inundações porque há um estreitamento da seção do canal, passando de 3,40 m para cerca de 2,00 m e pelo fato de existirem muitas casas construídas sobre o canal (palafitas).
	Beberibe	Arruda		E - F	Irregular	2.8	nenhum		Manual	Há necessidade de limpeza e o trecho é inundável
Córrego São Gabriel	Beberibe	Água Fria	Rua Bomba do Hemetério	A - B	Trapezoidal	1.7	alvenaria de pedra	regular	Manual	O trecho possui muitas lixas construídas sobre o canal e muito lixo em seu interior.
	Beberibe	Água Fria		B - C	Trapezoidal	4.3	Concreto	regular	Manual	Não sofre inundações
Canal São Sebastião	Beberibe	Água Fria	Rua Floresópolis, R. Córrego da Padaria, R. Alto do Pascoal, R. Bomba do Hemetério	A - B	Trapezoidal	2.8	alvenaria de pedra	Boa	mecanizado	Não sofre inundações
	Beberibe	Água Fria		B - C	Trapezoidal	3.7	Concreto		mecanizado	Não sofre inundações
	Beberibe	Água Fria		C - D	Trapezoidal	4.9	Concreto	Boa	Manual	Existem casas ocupando a margem esquerda do canal. O trecho não sofre inundações
	Beberibe	Água Fria		D - E	Trapezoidal	4.7	alvenaria de pedra	Boa	Manual	O trecho não sofre inundações e o revestimento precisa de limpeza
	Beberibe	Água Fria		E - F	Trapezoidal	4.7	Concreto	Boa	Manual	Não sofre inundações
	Beberibe	Água Fria		F - G	Retangular	4.9	alvenaria de pedra	regular	Manual	Há a presença de casas na margem esquerda do canal antes da Rua Bomba do Hemetério. Após esse ponto, a ocupação passa a ser nas duas margens. É um trecho inundável
	Beberibe	Água Fria		G - H	Retangular	4.9	Concreto	regular	Manual	é um trecho inundável, precisa de limpeza profunda e construção de arimo de proteção
Canal Vasco da Gama	Beberibe	Vasco da Gama	Rua Assunção, R. Vasco da Gama, Av. Norte, R. Paula Batista, R. da Harmonia, Estrada Velha de Água Fria	A - B	Retangular	1	alvenaria de tijolo	Boa	Manual	Não sofre inundações
	Beberibe	Vasco da Gama		B - C						O trecho está coberto pelas residências
	Beberibe	Vasco da Gama		C - D	Irregular	2	nenhum		Manual	Há bastante lixo no trecho. Não sofre inundações
	Beberibe	Vasco da Gama		D - E	Retangular	1.2	alvenaria de pedra	regular	Manual	Há necessidade de limpeza no rejunte das placas. Não sofre inundações
	Beberibe	Vasco da Gama		E - F	Trapezoidal	2.5	Concreto	regular	Manual	Existem rachaduras nas placas e lixo
	Beberibe	Vasco da Gama		F - G	Retangular	1.3	alvenaria de tijolo	regular	Manual	Não sofre inundações
	Beberibe	Vasco da Gama		G - H	Retangular	2	Concreto	regular	Manual	Não sofre inundações
	Beberibe	Vasco da Gama		H - I	Trapezoidal	2.3	alvenaria de pedra	regular	Manual	Há vegetação brotando do revestimento. Não sofre inundações
	Beberibe	Vasco da Gama		I - J	Retangular	2	Concreto	regular	Manual	Somente o final do trecho é descoberto, apresentando muito lixo.
	Beberibe	Vasco da Gama		J - K	Trapezoidal	3.2	Concreto	regular	Manual	O canal recebe um afluente nesse trecho. Não sofre inundações
	Beberibe	Vasco da Gama		K - L	Trapezoidal	3.5	Concreto	regular	Manual	Não sofre inundações
	Beberibe	Vasco da Gama		L - M	Trapezoidal	4.3	Concreto	regular	Manual	Há rachaduras no concreto. Não sofre inundações. Esse trecho margela a Avenida Norte
	Beberibe	Vasco da Gama		M - N	Trapezoidal	4.3	Concreto	regular	mecanizado	Não sofre inundações
	Beberibe	Vasco da Gama		N - O	Trapezoidal	9.5	Concreto	regular	Manual	É um trecho com muito lixo. Não sofre inundações
Canal da Vila da Praia	Beberibe	Arruda	Avenida Luiz Correia de Brito	A - B	Trapezoidal	2.8	alvenaria de pedra	regular	mecanizado	Existem várias placas danificadas e muito lixo. Não sofre inundações
	Beberibe	Arruda		B - C						O revestimento do canal possui rachaduras e vegetação. Há problemas de inundações
	Beberibe	Arruda		C - D	Irregular		nenhum		Manual	O trecho em questão foi todo alterado
	Beberibe	Arruda		D - E	Retangular	3	alvenaria de pedra e tijolo	regular	Manual	Esse trecho está com muito lixo e sofre com inundações
	Beberibe	Arruda		E - F	Irregular	2	nenhum		Manual	O trecho sofre inundações
										Há bastante lixo no final do canal e esse trecho é inundável

