



**Universidade Federal da Paraíba**  
**Centro de Tecnologia**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA URBANA**  
**- Mestrado -**

**MEDIDAS DE PROTEÇÃO E CONTROLE DE INUNDAÇÕES**  
**URBANAS NA BACIA DO RIO MAMANGUAPE/PB**

*Francisco de Assis dos Reis Barbosa*

*Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal da Paraíba  
para obtenção do grau de Mestre*



**Universidade Federal da Paraíba**  
**Centro de Tecnologia**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA URBANA**  
**- Mestrado -**

**MEDIDAS DE PROTEÇÃO E CONTROLE DE INUNDAÇÕES**  
**URBANAS NA BACIA DO RIO MAMANGUAPE/PB**

Dissertação submetida ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Urbana da Universidade Federal da Paraíba como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre.

***Francisco de Assis dos Reis Barbosa***

**ORIENTADOR: Prof. Dr. Celso Augusto Guimarães Santos**



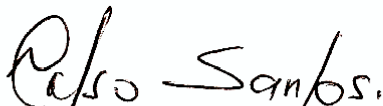
**“MEDIDAS DE PROTEÇÃO E CONTROLE DE INUNDAÇÕES URBANAS NA  
BACIA DO RIO MAMAMGUAPE/PB”**

**Por**

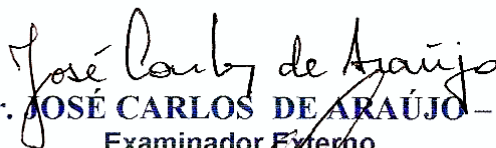
**Francisco de Assis dos Reis Barbosa**

**Dissertação aprovada em 31 de março de 2006**

**Período Letivo: 2006.1**



**Prof. Dr. CELSO AUGUSTO GUIMARÃES SANTOS – UFPB**  
Orientador



**Prof. Dr. JOSÉ CARLOS DE ARAÚJO – UFCE**  
Examinador Externo



**Prof. Dr. EDUARDO RODRIGUES VIANA DE LIMA – UFPB**  
Examinador Interno

*A minha esposa, Laise Kelley  
Aos meus pais, Ednaldo e Jacira,  
Com muito amor.*

## **AGRADECIMENTOS**

- Agradeço acima de tudo a Deus, por permitir a conclusão deste trabalho de dissertação.
- Aos meus pais por me incentivarem e me concederem a oportunidade de estudar, pelo amor sempre incondicional e toda a minha família pelo apoio sempre dedicado.
- Ao meu sogro e minha sogra pela paciência e apoio que sempre tiveram neste período da minha vida.
- A minha esposa Laise pelo apoio, segurança e amor que me tem dedicado sempre, pelas horas de ensinamentos e dedicação nestes anos de convivência.
- Ao meu orientador Prof<sup>o</sup> Celso Augusto Guimarães Santos, pela sua infinita paciência e dedicação, não apenas como um mestre, mas como um grande amigo.
- Ao engenheiro civil Laudízio da Silva Diniz pelo apoio incondicional e incentivo a esta pesquisa.
- Ao Laboratório de Recursos Hídricos e Engenharia Ambiental - LARHENA, pelo apoio acadêmico que recebi, pelos conhecimentos adquiridos e, principalmente, pela dedicação sempre presente demonstrada pelos professores deste laboratório e pela disponibilização de equipamentos e material para a realização da pesquisa.
- Aos amigos do LARHENA Alana Rodrigues, Antônio Júnior, Lívia S. Marinho, Nayra Vicente, Valéria Diniz dos Santos, Wamberto Junior, Hugo Barbosa, Pablo Moreno, Lovania Werlang, Maurício Goldfarb, Fernando Moreira da Silva, Joana, Richarde Marques, Leonardo, e a todos que fizeram e fazem parte desta família, pela amizade que pude compartilhar ao longo da minha passagem pelo Laboratório.
- A todos os colegas do mestrado, pela companhia nos momentos difíceis e pelas boas conversas.
- Aos professores e funcionários do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Urbana, pelos conhecimentos técnicos e científicos transmitidos.
- À Universidade Federal da Paraíba, a CAPES, que ajudaram na realização desta etapa da minha vida.

## RESUMO

As inundações urbanas constituem-se num dos mais importantes impactos sobre a sociedade. Esses impactos podem ocorrer devido à urbanização ou à inundação natural da várzea ribeirinha. No contexto atual, diversas medidas de prevenção e proteção contra enchentes urbanas são adotadas, em geral, medidas de caráter corretivo. As medidas podem ser estruturais (quando modificam o sistema fluvial evitando os prejuízos decorrentes das enchentes) e não-estruturais (melhor convivência da população com as enchentes). Este projeto tem como abordagem principal a elaboração de um plano de medidas que contemple os aspectos de prevenção contra a ocupação dos espaços de riscos de enchentes, através de medidas estruturais e não-estruturais, associadas ou não, para os municípios localizados na Bacia do Rio Mamanguape/PB, que apresentam tendências a cheias por ocuparem, na sua maioria, as planícies de inundação de importantes cursos d'água. Diversos problemas podem estar associados à ocorrência desses eventos: ocupação inadequada dos leitos dos rios; falta de recursos para moradia e saneamento; falta de planejamento de ocupação do espaço urbano; e inexistência de sistemas de alerta em catástrofes e de planos de desocupação de áreas atingidas. Portanto, são apresentadas soluções práticas e eficientes para o melhor aproveitamento das áreas de risco, o que possibilitará uma melhor qualidade de vida no meio urbano. A participação efetiva do poder público e dos órgãos responsáveis pela gestão ambiental e urbana na implementação de uma política de educação ambiental e na elaboração de um plano diretor que priorize o controle de inundação no meio urbano deve ser imprescindível.

**PALAVRAS-CHAVES:** inundações urbanas, medidas de proteção e controle, bacia do Mamanguape

## **ABSTRACT**

The urban floods are constituted one of the most important impacts on the society. Those impacts could happen due to the urbanization or to the natural flood of the riverside area. In the current context, several prevention and protection measures against urban floods are adopted, in general, measures of corrective character. The measures can be structural (when they modify the fluvial system and reduce risks of flood damages) and non-structural (a better coexistence of the population with the floods). This project has as main aim the elaboration of a plan of measures that contemplates the prevention aspects against the occupation of the spaces with flood risks, through structural and non-structural measures, associated or not, for the municipal districts located within Mamanguape river basin in Paraíba State, prone to floods since almost all of them occupy the flood plains of the main water courses. Several problems could be associated with the occurrence of those events: inadequate occupation of the river beds; lack of resources for dwelling and waste water system; lack of planning for the occupation of the urban space; and lack of systems for catastrophe alert and for evacuation of the flooded areas. Therefore, it is presented practical and efficient solutions for the best use of the risk areas, which would lead to a better life quality for the urban areas. The effective participation of the public government and the responsible department for the environmental and urban administration in the implementation of a politics of environmental education and elaboration of a management plan that prioritizes the flood control in the urban areas is indispensable.

**KEYWORDS:** urban floods, protection and control measures, Mamanguape river basin.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Bacias hidrográficas do Estado da Paraíba. ....	21
Figura 2.2 – Área de atuação dos Comitês de Bacia no Estado da Paraíba. ....	23
Figura 2.3 – Municípios localizados ao longo do Rio Mamanguape/PB.....	24
Figura 2.4 – Bacia hidrográfica do rio Mamanguape. ....	25
Figura 2.5 – Modelo digital de elevação da bacia do rio Mamanguape/PB.....	26
Figura 2.6 – Drenagem da Bacia do rio Mamanguape. ....	27
Figura 2.7 - Divisão climática do Estado da Paraíba segundo W. Köpper. ....	29
Figura 3.1 – Processo de impacto da drenagem urbana (Sudersha, 2002). Adaptado.....	35
Figura 3.2 – Características do balanço hídrico numa bacia urbana (Tucci e Bertoni, 2003). Adaptado .....	37
Figura 3.3 – Desenho representativo do reservatório de amortecimento.....	42
Figura 3.4 – Desenho representativo de um dique de proteção.....	42
Figura 3.5 – Desenho representativo de um alargamento de canal. ....	43
Figura 3.6 – (a) Comportamento do rio antes da implementação da medida; (b) comportamento do rio após a implementação da medida. ....	43
Figura 3.7 – Exemplo de utilização temporária (áreas de lazer). ....	46
Figura 3.8 – Estrutura esquemática de uma Rede de Monitoramento de controle de inundação. ....	47
Figura 4.1 - <i>Wavelets</i> -mãe: (a) Morlet, (b) Paul e (c) Derivada Gaussiana- DOG. ....	58
Figura 4.2 – Planos e canais que representam os cursos d’água da bacia.....	59
Figura 5.1 – Localização do município de Alagoa Grande.....	65
Figura 5.2- (a) Precipitação mensal total Alagoa Grande no período de 1963-1989. (b) Espectro wavelet de potência normalizado usando a wavelet de Morlet. (c) Espectro global de potência da wavelet. (d) Série temporal da escala-média da faixa de 8–16 meses. As linhas tracejadas em (c) e (d) são a significância para o espectro global da wavelet, assumindo o mesmo nível de significância e espectro de fundo como em (b).....	67
Figura 5.3 – Comparação da precipitação média mensal histórica (1963 a 1989) com a precipitação do ano de 2004.....	69
Figura 5.4 – Fotos da área urbana do município de Alagoa Grande em janeiro/fevereiro de 2004. (a) Lagoa no centro do município. (b) Ponte sobre o rio Mamanguape – Jusante. (c)	

Casa destruída pelas chuvas – Canafístula. (d) Rua que ficou completamente alagada (FONTE: AAGISA, 2004). .....	70
Figura 5.5 – Localização da barragem Camará. ....	72
Figura 5.6 - (a) Vista a jusante da parte da barragem rompida. (b) Vista da parede rompida pela força da água. (c) Foto a jusante da barragem. (d) Trecho destruído em virtude da força da água levando vegetação e rochas (junho de 2004). ....	73
Figura 5.7 – Localização da Sub-Bacia de Mulungu. ....	74
Figura 6.1 – Altimetria do município de Alagoa Grande. ....	78
Figura 6.2 – Mapa de inundação da área urbana de Alagoa Grande. ....	79
Figura 6.3 – Localização dos postos pluviométrico e fluviométrico de Mulungu. ....	80
Figura 6.4 – Hietograma e hidrograma observados para o posto de Mulungu no ano de 1995. ....	81
Figura 6.5 – Discretização espacial da sub-bacia de Mulungu. ....	82
Figura 6.6 – Representação esquemática dos elementos planos e canais na sub-bacia. ....	83
Figura 6.7 – Volume médio escoado por ano para cada sub-bacia discretizada em 1995. ....	85
Figura 6.8 – Localização dos pontos analisados na sub-bacia de Mulungu. ....	87
Figura 6.9 – Comportamento da vazão antes e após a implantação do reservatório. ....	88
Figura 6.10 - Vazão antes e após a implantação do reservatório a jusante do município. ....	89
Figura 6.11 - Vazão antes e após a implantação do reservatório no exutório da sub-bacia. ....	89
Figura 6.12 – Hietograma e hidrograma observados para o posto de Mulungu no ano de 2004. ....	90
Figura 6.13 – Comportamento da vazão antes e após a implantação do reservatório de amortecimento. ....	92
Figura 6.14 - Vazão antes e após a implantação do reservatório no ponto a jusante do município. ....	93
Figura 6.15 - Vazão antes e após a implantação do reservatório no exutório da sub-bacia. ....	93
Figura 7.1 – Modelo esquemático para um sistema de alerta contra inundação para os municípios da bacia do rio Mamanguape. ....	99

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Localização e população dos municípios inseridos nas Bacias do Litoral Norte	22
Tabela 2.2 - Dados de precipitação anual (mm) na bacia do rio Mamanguape .....	28
Tabela 2.3 - Dados de evapotranspiração média anual (mm) na bacia do rio Mamanguape...	30
Tabela 3.1 - Comparação dos aspectos da água no meio urbano .....	34
Tabela 3.2 – Causas e impactos da urbanização sobre as cheias dos rios urbanos .....	37
Tabela 3.3 – Possível dimensão dos efeitos positivos (azul) e negativos (vermelho) das barragens para os diversos grupos de interesse .....	44
Tabela 3.4 – Medidas não-estruturais para controle de inundações .....	48
Tabela 3.5 – Principais fatores que afetam o risco de inundação.....	49
Tabela 6.1 – Pontos visitados no município de Alagoa Grande.....	77
Tabela 6.2 – Áreas de inundação no município de Alagoa Grande.....	79
Tabela 6.3 - Estimativa para propriedades hidráulicas do solo proposto por Rawls et al. (1991) .....	84
Tabela 6.4 – Dados de entrada do reservatório de amortecimento para o ano de 1995.....	86
Tabela 6.5 - Comparação entre os picos diários da vazão calculada para cada mês do ano de 1995 antes e após a implantação do reservatório de amortecimento.....	88
Tabela 6.6 – Dados de entrada do reservatório de amortecimento para o ano de 2004.....	91
Tabela 6.7 – Comparação entre os picos de vazão mensal observados antes e após a implantação do reservatório de amortecimento para o ano de 2004 .....	92
Tabela 7.1 – Estratégia e ações para o plano de gestão de inundação .....	95

## **LISTA DE APÊNDICES**

Quadro A. 1 - Modelo de entrada dos dados de precipitação .....	111
Quadro A. 2 - Dados de entrada dos parâmetros globais.....	111
Quadro A.3 – Parâmetros utilizados pelo modelo kineros2 dos elementos planos e canais discretizados da sub-bacia de Mulungu .....	112

# SUMÁRIO

## AGRADECIMENTOS

## RESUMO

## ABSTRACT

## LISTA DE FIGURAS

## LISTA DE TABELAS

## LISTA DE APÊNDICES

1	INTRODUÇÃO .....	15
1.1	Justificativa .....	17
1.2	Objetivos geral e específicos.....	18
1.3	Descrição dos capítulos .....	19
2	ÁREA DE ESTUDO.....	20
2.1	Bacia Hidrográfica do Litoral Norte.....	20
2.2	Bacia Hidrográfica do rio Mamanguape.....	23
2.3	Aspectos físico-climáticos da bacia do rio Mamanguape.....	26
2.3.1	Relevo e geologia .....	26
2.3.2	Hidrografia .....	27
2.3.3	Dados pluviométricos .....	28
2.3.4	Clima.....	29
2.3.5	Evapotranspiração.....	29
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	31
3.1	Evolução urbana e os problemas de inundação.....	31
3.2	Impacto devido ao escoamento urbano .....	33
3.2.1	Inundações de áreas ribeirinhas.....	35
3.2.2	Inundações devido à urbanização .....	36
3.3	Inundação Repentina ( <i>Flash Flood</i> ).....	38
3.4	Medidas de controle .....	39
3.4.1	Medidas estruturais.....	41

3.4.2	Medidas não-estruturais .....	45
3.5	Construção de Mapas de Inundação .....	48
3.5.1	Grau de risco de inundação .....	49
3.5.2	Elaboração do mapa de risco de inundação .....	50
3.6	Modelagem hidrológica .....	51
3.6.1	Modelos hidrológicos.....	51
3.6.2	Classificação dos Modelos Hidrológicos.....	53
4	METODOLOGIA: MATERIAIS E MÉTODOS .....	56
4.1	A Transformada <i>Wavelet</i> .....	57
4.2	Modelo Hidrossedimentológico Kineros2 .....	59
4.2.1	Modelo de infiltração do solo.....	60
4.2.2	Escoamento superficial no plano.....	60
4.2.3	Escoamento superficial no canal .....	61
4.2.4	Dados de entrada do modelo Kineros2 .....	62
4.2.4.1	Dados de entrada.....	62
4.2.4.2	Parâmetros de entrada do modelo.....	62
4.2.4.2.1	Parâmetros globais .....	62
4.2.4.2.2	Parâmetros dos planos.....	63
4.2.4.2.3	Parâmetros dos canais .....	64
5	ESTUDO DE CASO: MUNICÍPIO DE ALAGOA GRANDE/PB.....	65
5.1	Localização e generalidades.....	65
5.2	Análise da frequência de precipitação através da Transformada <i>Wavelet</i> .....	66
5.3	Chuvas de janeiro e fevereiro/2004.....	68
5.4	Rompimento da Barragem Camará .....	71
5.5	Sub-bacia de Mulungu.....	73
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	75
6.1	Elaboração do mapa de inundação .....	75
6.2	Análises dos hidrogramas de cheias a partir da implantação de reservatório de amortecimento .....	80
6.2.1	Simulação para o período de janeiro a dezembro de 1995 .....	80
6.2.1.1	Aplicação do Modelo Kineros2.....	81
6.2.1.2	Discretização espacial da sub-bacia de Mulungu .....	81
6.2.1.3	Parâmetros de Entrada.....	83
6.2.1.4	Espacialização da vazão .....	85

6.2.2	Simulação para o período de janeiro a dezembro de 2004 .....	89
6.2.3	Discussão.....	93
7	AÇÕES E PROGRAMAS PARA CONTROLE DAS INUNDAÇÕES .....	95
7.1	Proposta de Gestão de Risco de Inundação na Bacia do rio Mamanguape .....	95
7.2	Plano para Gerenciamento da bacia do rio Mamanguape .....	96
7.2.1	Medidas a curto prazo.....	96
7.2.2	Medidas a médio e longo prazo.....	97
8	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....	102
8.1	Conclusões .....	102
8.2	Recomendações.....	104
	REFERÊNCIAS .....	105
	APÊNDICE A.....	110
	APÊNDICE B.....	113

# 1 INTRODUÇÃO

A inundação urbana   um evento tão antigo quanto as cidades ou aglomerações urbanas. Este evento pode ocorrer devido ao comportamento natural dos rios, quando o excesso do volume da chuva que não consegue ser drenado ocupa a várzea e inunda, de acordo com a topografia, as áreas próximas aos rios (inundações ribeirinhas), ou pode ocorrer pelo efeito da altera o produzida pelo homem na urbaniza o devido   impermeabiliza o das superfícies e canaliza o dos rios.

As inundações em áreas urbanas representam um grave problema para as cidades brasileiras, uma vez que atingem áreas densamente ocupadas ocasionando prejuízos consideráveis e irreparáveis para a popula o. Um conjunto de fatores pode ser relacionado quanto   ocorrência das inundações. Certamente, um dos mais preocupantes   a falta de planejamento para ocupa o de bacias hidrográficas, resultando a ocupa o de áreas consideradas de risco de inunda o. A popula o de maior poder aquisitivo tende a habitar os locais seguros ao contrário da popula o carente que ocupa as áreas de alto  ndice de inunda o, provocando problemas sociais que se repetem por ocasião de cada cheia na região. Quando a freq ncia das inundações   baixa, a popula o ganha confiança e despreza o risco, aumentando significativamente o investimento e a densifica o das áreas inundáveis.

O problema das inundações urbanas   complexo uma vez que envolve a es multidisciplinares e abrangentes sobre a bacia hidrográfica como um sistema integrado e dinâmico. A es isoladas podem apenas transferir de local as inundações.

Para a mitiga o de inundações em bacias urbanizadas, diversas alternativas estruturais associadas a a es não-estruturais podem ser aplicadas, desde a realoca o humana até o próprio convívio com o problema. Desta forma, a elabora o de um Plano de Controle de Enchentes de uma cidade ou região metropolitana deve considerar as bacias hidrográficas sobre as quais a urbaniza o se desenvolve. Diversos meios associados podem garantir um desenvolvimento sustentável e racional possibilitando um crescimento urbano e conseqüente melhoria de vida para a popula o.

As a es públicas, em muitas cidades brasileiras, estão indevidamente voltadas para medidas estruturais com visão pontual. A canaliza o tem sido uma medida utilizada extensamente para transferir o problema de um ponto a outro na bacia, sem que sejam avaliados os efeitos para jusante ou os reais benefícios das obras. Esse processo   prejudicial aos interesses públicos e representa um prejuízo extremamente alto para toda a sociedade ao



longo do tempo. Quanto a medidas não-estruturais, para as áreas consideradas de risco, isto é, nas planícies de inundação, normalmente são adotadas soluções de caráter preventivo de modo a reduzir os danos causados pela inundação como: regulamentação da ocupação da área de inundação, previsão de cheia e plano de evacuação, entre outras. No entanto, uma seqüência de anos sem inundação é motivo para a sociedade pressionar o poder público para que haja ocupação do leito maior do rio.

No Brasil, apesar de os municípios terem sido pressionados a estabelecerem um Plano Diretor Urbano, a grande maioria não contempla os aspectos de prevenção contra a ocupação dos espaços de risco de enchentes. Para a implementação de medidas, sejam elas estruturais ou não-estruturais, diversos fatores devem ser levados em consideração: aspectos ambientais, hidrológicos, uso e ocupação do solo, características sócio-econômicas. Estes fatores garantem um gerenciamento adequado e eficiente considerando seus aspectos naturais e locais possibilitando, assim, uma melhor convivência com tais fenômenos.

Neste trabalho será abordado um estudo relacionado com a problemática de inundações em áreas ribeirinhas na bacia hidrográfica do rio Mamanguape, no Estado da Paraíba, cuja população sofre com a força das águas dos rios que cortam as cidades, principalmente o rio Mamanguape, que se estende desde o brejo paraibano até o Oceano Atlântico. A enchente ocorrida no início de 2004 foi um forte catalisador para que a população e, principalmente, os governos estadual e municipal se preocupassem quanto à questão de enchentes urbanas, passando a discutir políticas públicas de controle e proteção de inundações em todo o Estado da Paraíba.

Como estudo de caso será feita uma análise mais criteriosa para o município de Alagoa Grande, localizado no médio curso do rio Mamanguape. Um plano de medidas que considere os aspectos de prevenção contra a ocupação dos espaços de riscos de enchentes, através de medidas estruturais e/ou não-estruturais, associadas ou não, será contemplado. Diversos problemas estão associados quanto à ocorrência desses eventos: ocupação inadequada dos leitos dos rios; falta de recursos para moradia e saneamento; e falta de planejamento de ocupação do espaço urbano. Buscar-se-ão, portanto, soluções práticas e eficientes para o melhor aproveitamento das áreas a fim de evitar transtornos, possibilitando melhor qualidade de vida para o meio urbano.

## 1.1 Justificativa

A bacia hidrográfica do rio Mamanguape, localizada no Estado da Paraíba, tem apresentado diversas cheias ao longo de seu percurso nos últimos anos, ocasionando prejuízos principalmente aos municípios ribeirinhos. A enchente mais recente ocorreu no início de janeiro de 2004, onde foram registrados diversos transtornos à população, como deslizamentos de terra, alagamentos e interdição de rodovias. Uma das primeiras bacias do Estado a sofrer com as fortes chuvas de janeiro de 2004 foi a do rio Mamanguape, gerando os primeiros desabrigados e desalojados nos municípios de Mulungu e Gurinhém num total de 230 famílias. Em 23 de janeiro do mesmo ano, com a continuidade das chuvas, a Defesa Civil entrou em alerta máximo. No início de fevereiro, como o solo se apresentava saturado e os açudes cheios, foram registradas as primeiras inundações em várias cidades paraibanas, principalmente naqueles municípios cortados ou margeados pelos rios principais, como os rios Paraíba, Mamanguape, Piancó, ou por seus afluentes. No período de um mês (12/01/04 a 12/02/04), o número de desabrigados na bacia foi de 4.636 pessoas nos municípios ribeirinhos com 13 registros de vítimas fatais (AAGISA, 2004). Uma questão que deve ser ressaltada é que grande parte dos municípios da bacia em questão não apresenta sequer um plano diretor que contemple, entre outros aspectos, um plano de medidas de proteção e controle contra estes eventos que certamente poderão ocorrer novamente. Com base nessas informações, fica clara a importância de se registrar este fenômeno, mapear áreas inundadas e tomar medidas, como planejar o uso e ocupação do solo em áreas ribeirinhas e de risco, de forma a evitar ou pelo menos diminuir os prejuízos provocados por enchentes no Estado.

Para a realização de um trabalho mais minucioso e que efetivamente possa ser colocado em prática, foi escolhido como estudo de caso o município de Alagoa Grande, localizado no médio curso do rio Mamanguape. A população de Alagoa Grande é de 29.169 habitantes (IBGE, 2000), o que representa cerca de 6% da população total da bacia, sendo que cerca de 17.000 está situada na zona urbana. Por estar localizada em cota topográfica baixa, a região mais urbanizada vem apresentando ao longo dos anos problemas com inundações. Em função das fortes chuvas ocorridas em janeiro e fevereiro de 2004, a região se mostrou muito vulnerável quanto à ocorrência de eventos chuvosos que geram inundações, fato este observado em outros municípios do Estado. Desta maneira, a questão é enfatizar a vulnerabilidade da região uma vez que se encontra numa cota topográfica baixa e que é cortada pelo rio Mamanguape o que propicia impactos para a população, seja a nível

econômico, social e ambiental. O município já demonstrou ao longo de sua história que será sempre uma região em potencial para sofrer com os efeitos das inundações urbanas.

Diante do exposto, os estudos que serão apresentados mostram que a ocupação desordenada sem nenhum critério de ocupação de espaço poderá gerar prejuízos ainda maiores dos que já foram registrados.

## **1.2 Objetivos geral e específicos**

O objetivo deste trabalho é propor um conjunto de medidas que contemplem aspectos de proteção e controle de inundações para a bacia hidrográfica do rio Mamanguape, tendo como estudo de caso o município de Alagoa Grande, situado no médio curso do rio Mamanguape.

A realização deste trabalho se dará pelo conjunto de objetivos específicos que serão descritos a seguir:

1. Estudar as características físico-geográficas da bacia a fim de conhecer seu comportamento hidrológico;
2. Observar o comportamento da vazão a montante e a jusante do município de Alagoa Grande através da espacialização da vazão na sub-bacia de Mulungu utilizando dados de precipitação e vazão observados nos postos pluviométrico e fluviométrico de Mulungu, e o modelo hidrossedimentológico Kineros2;
3. Analisar os hidrogramas de cheias a partir da implantação de reservatório de amortecimento na sub-bacia de Mulungu;
4. Elaborar mapa de inundação para a área urbana de Alagoa Grande sendo considerado o grau de risco em função da topografia e da ocupação atual e futura;
5. Elaborar um relatório de medidas estruturais e/ou não-estruturais para a proteção e controle das inundações que possa subsidiar os órgãos públicos responsáveis pelo planejamento e gerenciamento na execução de projetos, possibilitando a redução dos impactos decorrentes das cheias, identificando áreas de risco e estabelecendo as regras de assentamento da população juntamente com as prefeituras.

### 1.3 Descrição dos capítulos

O **Capítulo 1** trata da introdução onde são apresentados, de forma geral, os conceitos de inundações urbanas além da justificativa e dos objetivos geral e específicos. O **Capítulo 2** traz a caracterização da área de estudo, localização e generalidades. O **Capítulo 3** apresenta uma revisão bibliográfica dos principais temas abordados nesta dissertação: processo de evolução urbana e os problemas com inundação. Este item trata do processo de desenvolvimento urbano de forma desordenada e as conseqüências associadas a problemas com as inundações urbanas. Também serão apresentadas características quanto aos processos de inundação em áreas ribeirinhas e em áreas urbanizadas, princípios de abordagem do controle de inundação através de medidas estruturais e não-estruturais. Os conceitos de modelagem hidrológica serão sucintamente apresentados já que não é do escopo deste trabalho explorar este campo da hidrologia. No **Capítulo 4** serão mostradas as ferramentas utilizadas para o desenvolvimento da pesquisa, descrevendo a base conceitual do modelo utilizado. O **Capítulo 5** apresenta características da área do estudo de caso e o comportamento histórico da precipitação na região, bem como, os prejuízos associados ao evento chuvoso de 2004. O **Capítulo 6** apresenta os resultados da aplicação dos modelos através de cenários gerados para a propagação de cheia, mostrando as possíveis intervenções ao longo do rio possibilitando a redução dos picos de cheias observados. O **Capítulo 7** apresenta uma proposta para elaboração de um relatório de medidas estruturais e/ou não-estruturais de proteção e controle das inundações, contendo diversas informações a fim de reduzir os impactos provocados pelas chuvas e controlar as ocupações futuras através do zoneamento e construção de mapa de inundação. O **Capítulo 8** apresenta as conclusões e recomendações do trabalho.

## 2 ÁREA DE ESTUDO

### 2.1 Bacia Hidrográfica do Litoral Norte

O Estado da Paraíba encontra-se inserido na bacia hidrográfica do Atlântico Norte/Nordeste, ocupando cerca de 5,47% da área, segundo a divisão adotada pela Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL e pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE.

A Política Estadual de Recursos Hídricos instituída pela Lei Nº 6308 de 02 de julho de 1996, que visa assegurar o uso integrado e racional destes recursos, para a promoção do desenvolvimento e do bem estar da população apresenta, entre outros princípios, que a bacia hidrográfica é uma unidade básica físico-territorial de planejamento e gerenciamento dos Recursos Hídricos. Desta forma, a divisão do Estado da Paraíba em bacias hidrográficas facilita as ações de planejamento e gestão de recursos hídricos (Figura 2.1).

De uma maneira geral, o processo de planejamento busca mudar, ao menor custo possível, de um cenário tendencial para um cenário desejável (Campos e Sousa, 2003). Uma definição de planejamento é dada por Dror (1968) *apud* Campos e Sousa (2003): “É o processo que consiste em preparar um conjunto de decisões tendo em vista agir, posteriormente, para atingir determinados objetivos”.

A Figura 2.2 apresenta a área de atuação dos comitês de bacias hidrográficas no Estado da Paraíba. O comitê de bacia hidrográfica do Litoral Norte é formado pelas bacias dos rios Mamanguape, Camaratuba e Miriri, abrangendo uma área de 4597,10 km<sup>2</sup> (AAGISA, 2004). A Lei Federal Nº 9.433/97 que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos dispõe dentro do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos a criação dos Comitês de Bacia Hidrográfica tendo como área de atuação a totalidade de uma bacia hidrográfica ou grupo de bacias. Sendo assim a área de atuação do comitê das Bacias do Litoral Norte é composta pelos municípios inseridos total ou parcialmente na área geográfica das bacias dos rios Mamanguape, Camaratuba e Miriri (Tabela 2.1).

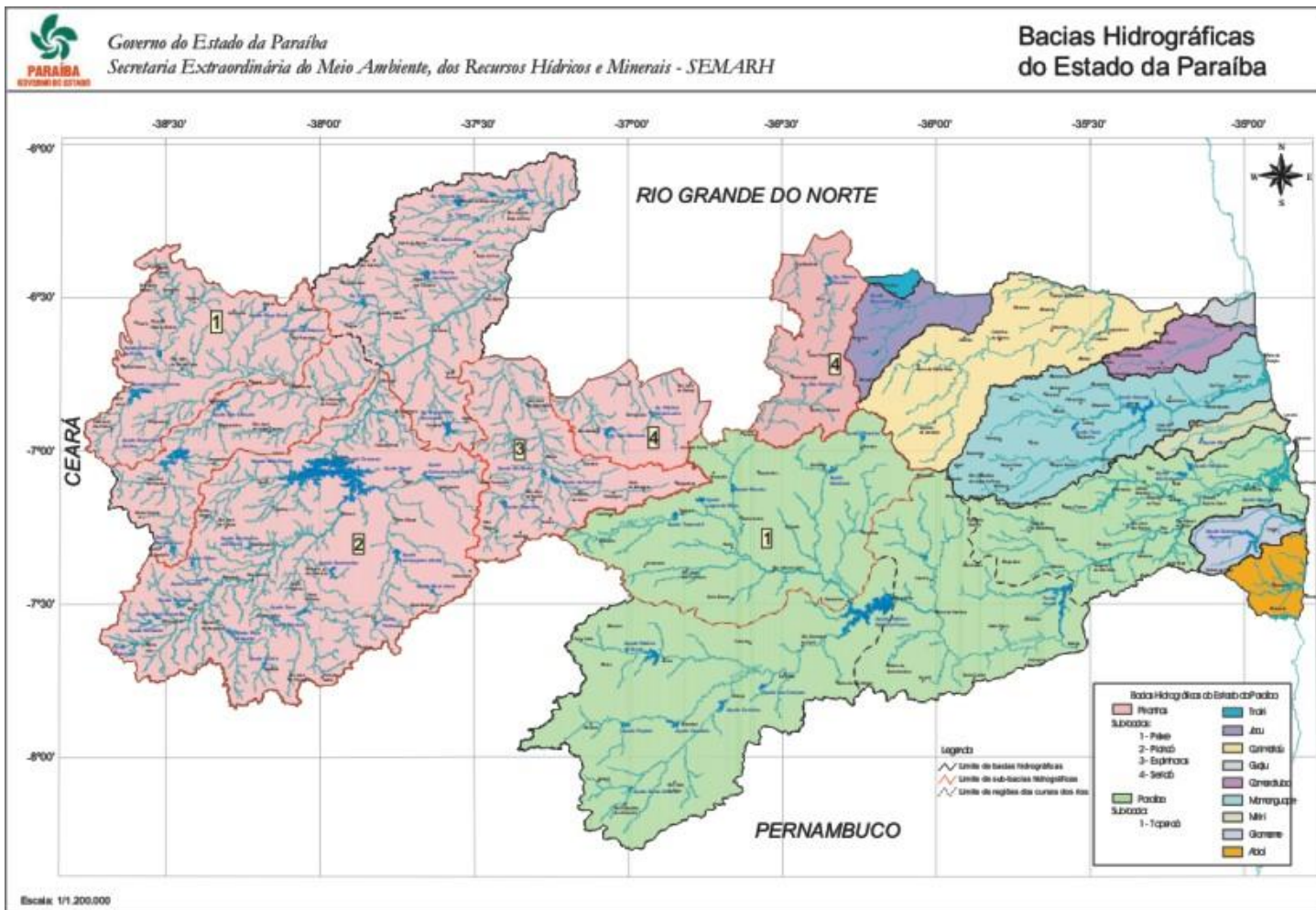


Figura 2.1 - Bacias hidrográficas do Estado da Paraíba.

Tabela 2.1 - Localização e população dos municípios inseridos nas Bacias do Litoral Norte

Município	Longitude	Latitude	Altitude (m)	População residente		
				Total	Urbana	Rural
Alagoa Nova	-07°09'30"	35°37'48"	143,0	29.169	14.195	14.974
Alagoa Grande	-07°09'30"	35°37'48"	143,0	29.169	16.847	12.322
Alagoinha	-06°57'00"	35°32'42"	133,0	11.833	5.820	6.013
Algodão de Jandaíra	-06°54'24"	36°00'25"	450,0	2.209	866	1.343
Araçagi	-06°51'11"	35°22'52"	57,0	18.095	5.921	12.174
Arara	-06°49'42"	35°45'30"	467,0	11.530	7.587	3.943
Areia	-06°57'48"	35°41'30"	618,0	26.131	13.471	12.660
Areial	-07°03'41"	35°55'33"	695,0	6.039	3.715	2.324
Baía da Traição	-06°41'18"	35°56'09"	3,0	6.483	2.972	3.511
Bananeiras	-06°45'00"	35°38'00"	520,0	21.810	7.590	14.220
Belém	-06°41'30"	35°32'00"	149,0	16.605	13.200	3.405
Capim	-06°54'56"	35°10'19"	100,0	4.180	3.656	524
Casserengue	-06°43'39"	35°47'21"	–	6.568	2.566	4.002
Cuité de Mamanguape	-06°54'49"	35°15'00"	50,0	6.124	1.519	4.605
Cuitegi	-06°53'36"	35°31'24"	90,0	7.254	5.678	1.576
Curral de Cima	-06°43'06"	35°15'58"	65,0	5.320	442	4.878
Duas Estradas	-06°41'06"	35°25'06"	144,0	3.818	2.766	1.052
Esperança	-07°01'59"	35°51'26"	631,0	28.166	18.520	9.646
Guarabira	-06°51'17"	35°29'24"	97,0	51.482	44.068	7.414
Itapororoca	-07°18'16"	38°09'16"	81,0	14.633	8.206	6.427
Juarez Távora	-07°06'54"	34°51'47"	145,0	7.069	5.222	1.847
Lagoa de Dentro	-06°40'24"	35°22'44"	154,0	7.086	3.347	3.739
Lagoa Seca	-07°10'15"	35°51'13"	634,0	24.154	8.112	16.042
Mamanguape	-06°50'19"	35°07'34"	35,0	38.772	30.754	8.018
Marcação	-06°46'12"	35°00'48"	91,0	6.203	2.948	3.255
Mari	-07°03'36"	35°19'10"	143,0	20.611	17.366	3.245
Massaranduba	-07°12'01"	35°47'21"	541,0	11.697	3.511	8.186
Mataraca	-06°36'05"	05°03'04"	14,0	5.500	4.818	682
Montadas	-07°08'26"	35°54'46"	713,0	3.969	1.966	2.003
Mulungu	-07°01'28"	35°27'43"	99,0	9.189	4.137	5.052
Pilões	-06°42'00"	35°36'54"	334,0	7.800	2.793	5.007
Pilõesinhos	-06°51'24"	35°31'24"	133,0	5.430	2.298	3.132
Pirpirituba	-06°46'48"	35°29'55"	99,0	10.198	7.518	2.680
Rio Tinto	-06°48'11"	35°04'50"	11,0	22.311	13.284	9.027
Remígio	-07°49'15"	38°09'10"	593,0	14.914	10.196	4.718
São Sebastião de Lagoa de Roça	-07°06'54"	35°51'56"	641,0	10.296	3.776	6.520
Serra da Raiz	-06°41'12"	35°26'38"	331,0	3.436	2.222	1.214
Serraria	-06°50'00"	35°37'30"	533,0	6.678	3.165	3.513
Serra Redonda	-07°10'42"	35°40'30"	391,00	7.307	3.125	4.182
Sertãozinho	-06°45'00"	35°26'31"	130,0	3.444	2.112	1.332
Solânea	-06°29'18"	35°51'56"	626,0	30.658	17.834	12.824
<b>Total</b>				<b>575.321</b>	<b>333.269</b>	<b>242.054</b>

Fonte: Governo da Paraíba





tornando-se perene até onde chega a influência das marés oceânicas. A largura na foz alcança 4 km. No passado, a navegação era intensa chegando o rio a atingir 70 km de curso navegável, em períodos de chuvas. Atualmente a navegação alcança apenas 16 km através da área dos manguezais, em embarcações pequenas. A bacia hidrográfica do rio Mamanguape situa-se no extremo leste do Estado da Paraíba, entre as latitudes 6°41'57'' e 7°15'58'' sul e longitudes 34°54'37'' e 36° a oeste de Greenwich. Limita-se ao norte com a bacia do rio Curimataú, a oeste com as bacias do Curimataú e do Paraíba, ao sul com a do Paraíba e a leste com o Oceano Atlântico. Seu principal rio é o Mamanguape de regime intermitente, que nasce na microrregião do Agreste da Borborema e desemboca no Oceano Atlântico no município de Rio Tinto. Recebe contribuições de cursos d'água como os rios Guariba, Guandu, Araçagi e Saquaiba. A bacia do rio Mamanguape drena uma área de 3.525 km<sup>2</sup> (Figura 2.4). No interior desta bacia, distribuem-se completa e parcialmente 42 municípios, entre os quais dez situam-se em áreas consideradas de risco de inundação ribeirinha por estarem próximos ao Baixo e Médio Curso do rio Mamanguape e do rio Araçagi: Alagoa Grande, Araçagi, Cuité de Mamanguape, Cuité, Guarabira, Itapororoca, Mamanguape, Marcação, Mulungu, Rio Tinto, conforme mostrado na Figura 2.3.

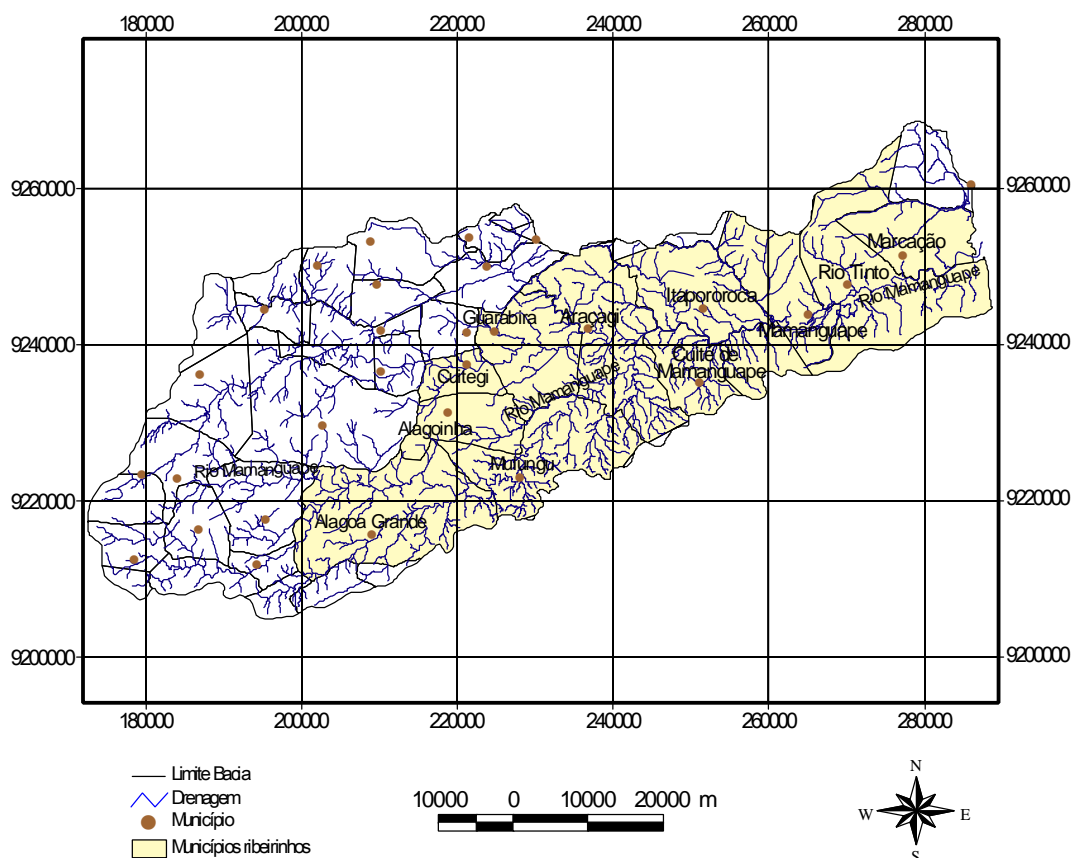


Figura 2.3 – Municípios localizados ao longo do Rio Mamanguape/PB.

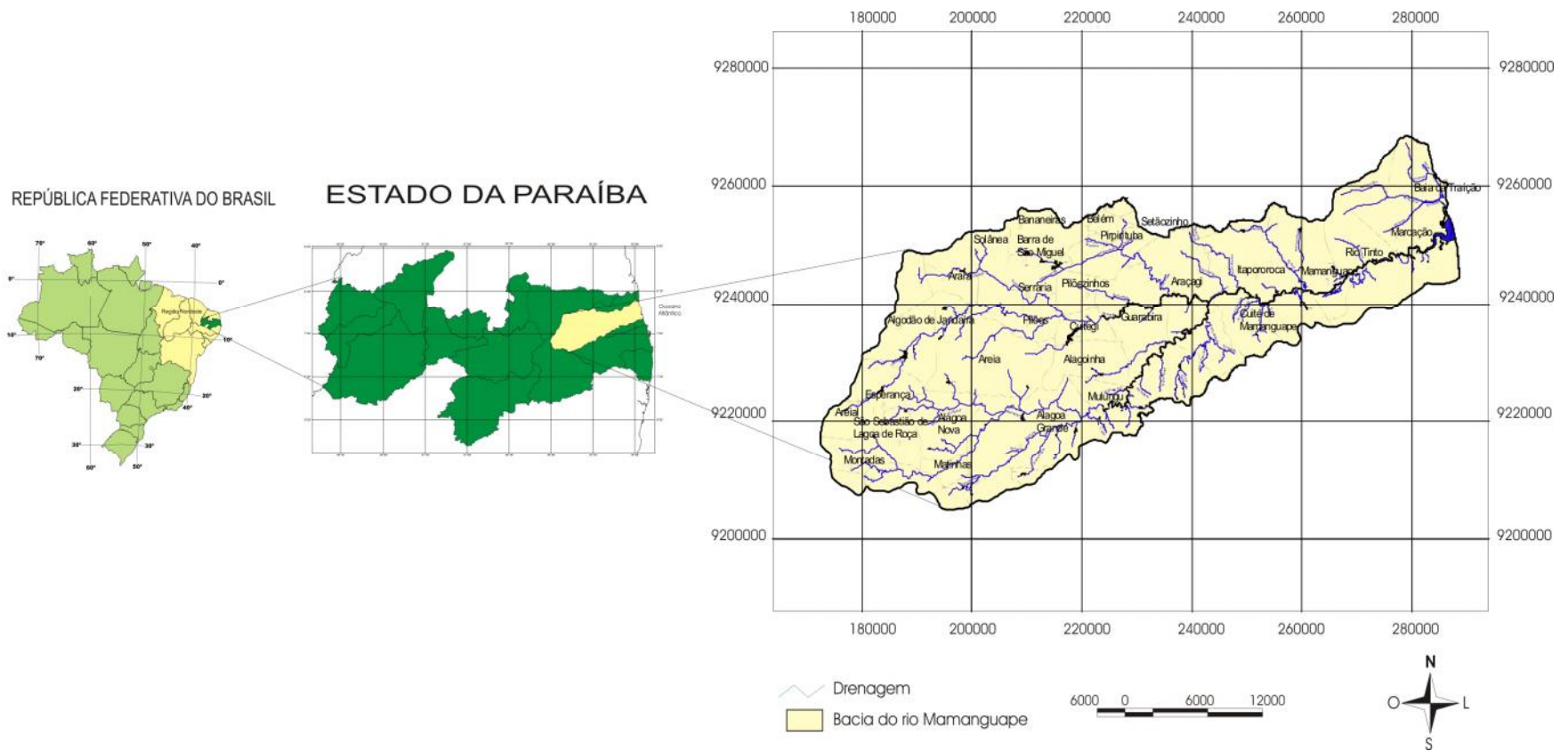


Figura 2.4 – Bacia hidrográfica do rio Mamanguape.

## 2.3 Aspectos físico-climáticos da bacia do rio Mamanguape

### 2.3.1 Relevo e geologia

Na região da bacia do Mamanguape, observa-se a ocorrência de solos do tipo: de várzeas aluviais e hidromórficos; arenosos das praias, restingas e cordões litorâneos; podzólicos com acumulação de argila, sobre rochas cristalinas na depressão periférica e nas serras do setor semi-árido; lateríticos e podzólicos do rebordo úmido da Borborema; brunos não cálcicos; rasos, pouco intemperizados e pedregosos (brunos litólicos).

O comportamento topográfico da bacia do Mamanguape é bastante irregular, principalmente no seu alto curso, como mostrado na Figura 2.5. O relevo da bacia apresenta altitudes que variam de 0 até 750 metros. Partindo-se do litoral em direção à nascente, as altitudes vão aumentando até atingir o Planalto da Borborema.

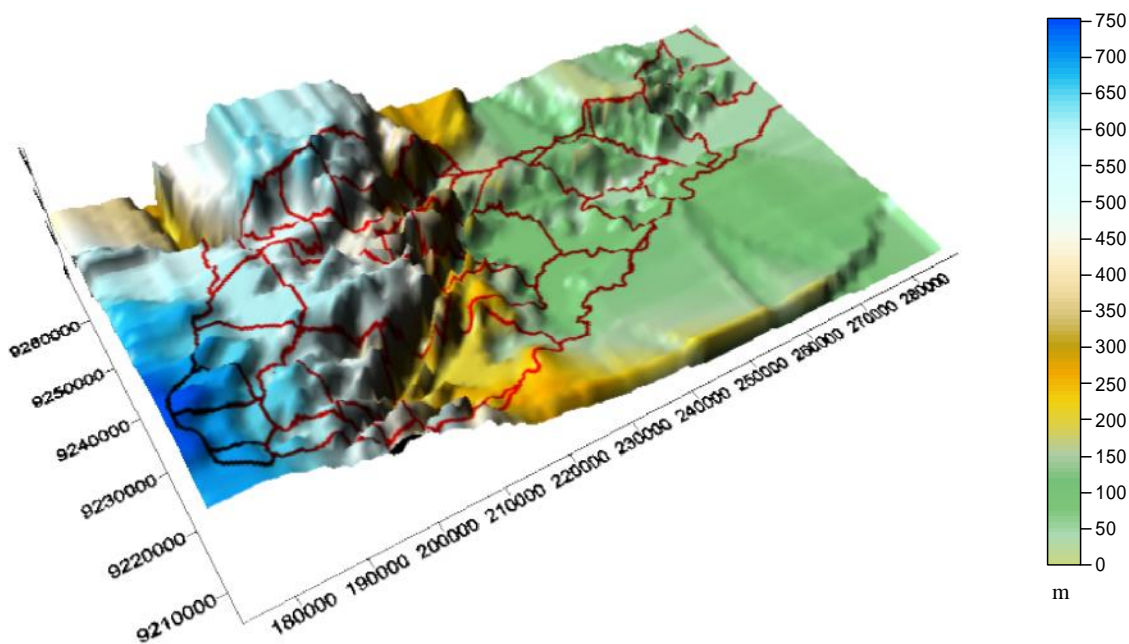


Figura 2.5 – Modelo digital de elevação da bacia do rio Mamanguape/PB.

Do ponto de vista geológico, a litologia da bacia do Mamanguape apresenta uma predominância de terrenos sedimentares, pertencentes ao Grupo Barreiras, além de mangues e de terrenos que sofrem influência das marés. Observam-se ainda ocorrências de arenitos variegados e calcários do Grupo Paraíba.

### 2.3.2 Hidrografia

O rio Mamanguape nasce na Lagoa Salgada, uma lagoa temporária, situada numa área entre o Brejo e o Cariri, a mais de 500 metros de altitude, no planalto da Borborema. De lá, segue com seu leito escavado em profundo vale, descendo a serra da Borborema, quando alcança a cidade de Alagoa Grande, no Brejo. Após 35 quilômetros de percurso, o rio Mamanguape alcança níveis inferiores aos 200 metros, e atravessa o boqueirão de Alagoa Grande entre as serras Paquevira e do Boi. O médio curso do rio Mamanguape inicia-se após Alagoa Grande, seguindo de Mulungu, até a Fazenda Telha, no Município de Itapororoca. A parte situada no baixo curso do rio Mamanguape apresenta altitudes que não ultrapassam os 200 metros, tratando-se de uma região baixa, drenada por rios intermitentes e perenes, de vales abertos e pouco profundos (Figura 2.6).

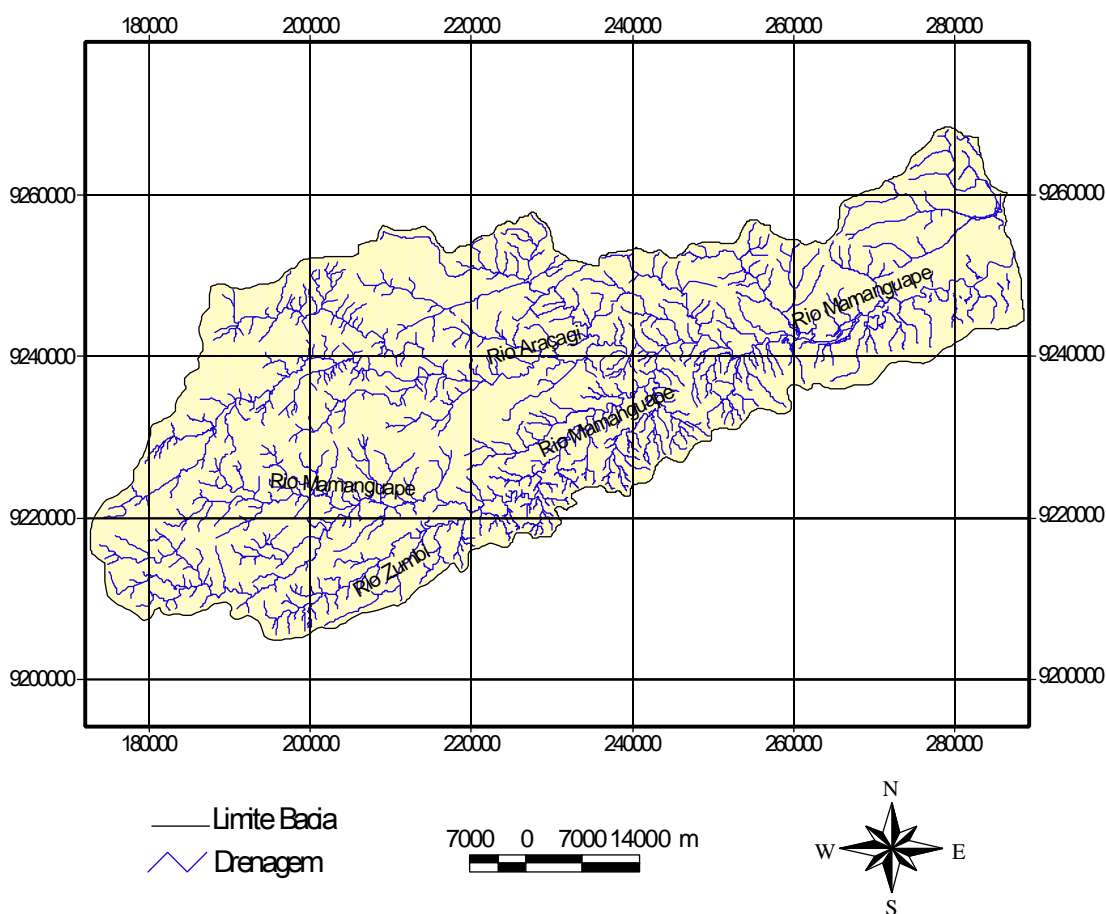


Figura 2.6 – Drenagem da Bacia do rio Mamanguape.

### 2.3.3 Dados pluviométricos

Os dados pluviométricos indicam que a região apresenta precipitações médias anuais que variam entre 700 e 1600 mm, sendo o mês de maio o mais chuvoso e o de outubro o mais seco. Na Figura 2.8 são apresentados os dados médios de precipitação anual na Bacia.

Tabela 2.2 - Dados de precipitação anual (mm) na bacia do rio Mamanguape

Código	Posto Pluviométrico	Precipitação anual (mm)			Nº de anos completos com dados
		Média	Mínimo	Máximo	
3930312	Baía da Traição	1621,1	940,0	2470,3	4
3839655	Itapororoca	1035,4	673,2	1834,9	5
3839345	Jacaraú	1058,8	245,8	1925,6	24
3839176	Mamanguape/ASPLAN	1119,7	952,9	1210,5	3
3839679	Mamanguape	1511,6	537,6	3301,6	68
3839291	Mataraca	1659,8	824,6	2240,0	27
3839687	Rio Tinto	1310,8	791,0	2181,1	4
3839292	Rio Tinto/Usina Agicam	1521,5	1048,4	2262,9	5
3848174	Alagoa Grande	973,0	342,8	1587,6	40
3838896	Alagoinha	1042,0	513,1	1485,2	7
3839727	Araçagi	946,5	350,9	2037,8	32
3839402	Belém	923,8	654,8	1399,0	6
3838897	Cuitegi	993,7	537,3	1640,9	3
3839704	Guarabira	1158,3	203,5	2817,4	48
3839325	Lagoa de Dentro	705,8	285,1	1166,4	4
3849006	Mulungu	820,4	346,6	1674,3	51
3838696	Pilõezinhos	965,3	388,6	2239,1	5
3848366	Serra Redonda	794,5	391,8	1370,1	4
3839313	Serra da Raiz	1080,1	706,9	1780,7	5
3848145	Alagoa Nova	1260,3	323,3	3155,5	78
3838962	Areia	1390,4	832,4	2127,1	72
3838575	Bananeiras	1178,7	255,2	2172,6	63
3838681	Borborema	1200,2	751,7	1889,0	4
3838778	Pilões	1120,2	776,3	1790,9	5
3839503	Pirpirituba	967,6	562,9	1520,4	4
3838675	Serraria	1367,0	675,2	2166,4	35
3848132	São Seb. de L. de Roça	772,6	427,6	1205,3	4
3837796	Algodão de Jandaíra	364,3	73,4	724,2	31
3848028	Areial	621,0	278,5	992,2	7
3838526	Casserengue/Salgado	403,5	86,3	1081,5	33
3848022	Esperança	719,5	389,6	1161,3	5
3838939	Esperança/São Miguel	812,7	449,4	1176,0	2
3848652	Lagoa Seca/EMEPA	833,1	442,9	1364,7	6
3848356	Massaranduba	1003,1	501,4	1528,1	7
3838941	Remígio	845,7	552,7	1322,2	5
3838571	Solânea	1184,1	679,5	1695,6	7

Fonte: (AAGISA, 2004)

### 2.3.4 Clima

Na bacia do rio Mamanguape o clima é caracterizado como quente e úmido com chuvas de outono a inverno e estiagem no verão e primavera (Figura 2.7). Em geral, o período seco na porção mais próxima ao oceano Atlântico tem duração de apenas dois meses alcançando quatro meses na medida em que a bacia se interioriza.

A umidade relativa do ar, em termos de valores médios anuais, varia de 80 a 85%. A insolação ao longo do ano apresenta uma variação nos meses de janeiro a julho de 7 a 8 horas diárias e nos meses de agosto a dezembro de 8 a 9 horas diárias. Quanto à velocidade média do vento, esta não apresenta valores significativos oscilando entre 2,50 a 3,50 m/s.

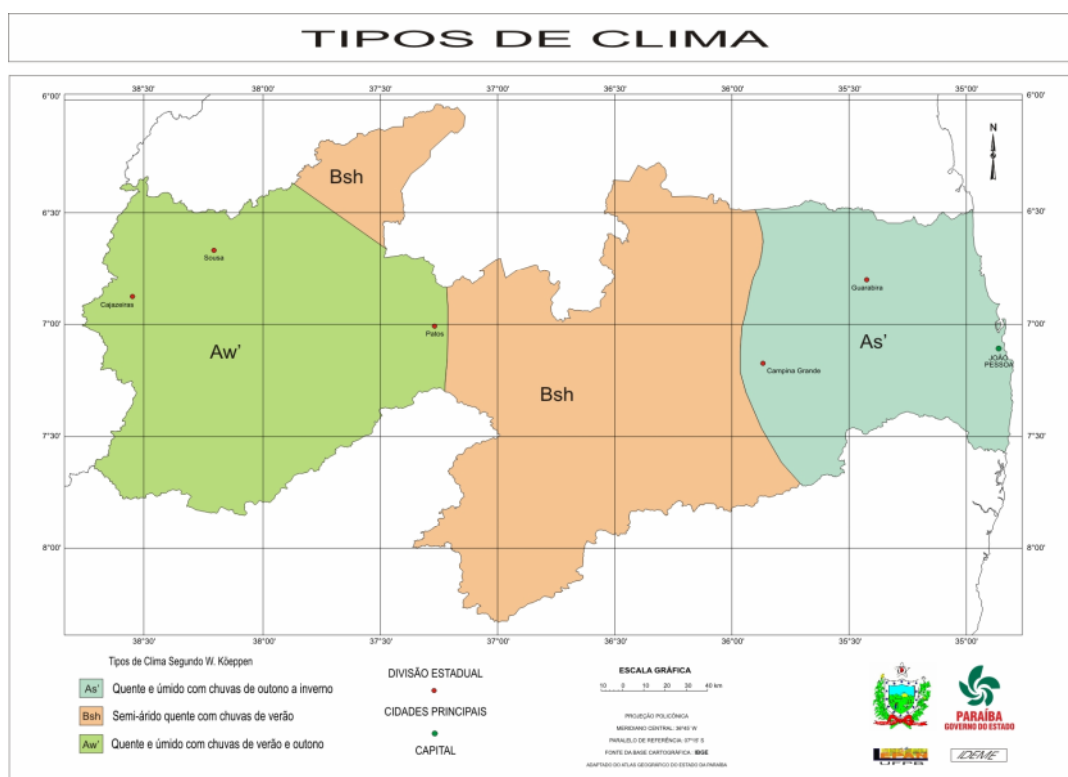


Figura 2.7 - Divisão climática do Estado da Paraíba segundo W. Köpper.

### 2.3.5 Evapotranspiração

Conforme os dados apresentados na Tabela 2.3 a evapotranspiração média anual na bacia do rio Mamanguape varia entre 1.100 a 1.600 mm.

Tabela 2.3 - Dados de evapotranspiração média anual (mm) na bacia do rio Mamanguape

<b>Estação</b>	<b>Total Anual (mm)</b>
Alagoa Nova	1.252,0
Areia	1.139,0
Guarabira	1.523,0
Mamanguape	1.384,0
Mulungu	1.528,0
<b>Média</b>	<b>1.365,2</b>

Fonte: (AAGISA, 2004)

### **3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Este capítulo trata: (1) do processo de desenvolvimento urbano de forma desordenada e as conseqüências associadas a problemas com as inundações urbanas; (2) das características quanto ao processo de inundação em áreas ribeirinhas e em áreas urbanizadas; (3) dos princípios de abordagem do controle de inundação; e (4) também são abordados conceitos e aspectos de aplicabilidade dos modelos hidrológicos.

#### **3.1 Evolução urbana e os problemas de inundação**

A urbanização é um dos processos antrópicos que mais provocam impactos ao meio, principalmente nos países em desenvolvimento e subdesenvolvidos. Trata-se de um conjunto de ações que têm conseqüências preocupantes, tanto sociais quanto ambientais (Oliveira et al., 2004).

O crescimento urbano nos países em desenvolvimento tem sido realizado de forma insustentável com deterioração da qualidade de vida e do meio ambiente. A urbanização é espontânea, o planejamento urbano é realizado apenas para a parte da cidade ocupada pela população de média e alta renda, enquanto que para as áreas de baixa renda e de periferia o processo se dá de forma irregular ou clandestina. Este processo é ainda mais significativo na América Latina onde 77% da população é urbana (48% a nível mundial). Atualmente existem 44 cidades da América Latina com população superior a 1 milhão de habitantes (de um total de 389 cidades do mundo, UNITED, 2003, *apud* Tucci, 2004).

Os impactos causados pela urbanização em um ambiente natural podem ser constatados a partir da análise do ciclo hidrológico. Qualquer meio natural tem sua forma determinada principalmente pela ação das águas entre outros condicionantes físicos. As águas pluviais são dissipadas através da evapotranspiração, infiltração e escoamento superficial. Com o crescimento dos centros urbanos, todos estes processos são reduzidos drasticamente, o que faz aumentar o escoamento, encurtando o seu tempo de concentração, causando graves reflexos nos cursos de drenagem natural, provocando erosão, assoreamento e enchentes. As enchentes aumentam sua freqüência e intensidade devido à ocupação do solo com superfícies impermeáveis e construções inadequadas como pontes e aterros. Leopold (1968) mostrou que o aumento da vazão média de cheia chega a valores de seis vezes ao das condições naturais e



Tucci (1996) ratificou este resultado para uma bacia urbana de 42 km<sup>2</sup> com 60% de áreas impermeáveis em Curitiba.

O Programa de Gerenciamento de Cheias, criado em 2001 pela Organização Meteorológica Internacional (WMO), instituição ligada a UNESCO, juntamente com Parceiros Globais da Água (*Global Water Partnership*), organização especialmente subsidiada por países como Canadá, Suécia, Dinamarca e Holanda, é um programa que visa promover a discussão mundial em torno do problema das inundações e as formas de resolvê-las. Na América do Sul, o Brasil faz parte do grupo de discussão juntamente com integrantes de mais sete países: Argentina, Bolívia, Chile, Colômbia, Paraguai, Peru e Uruguai.

Tucci et al. (1995) destacam as enchentes urbanas como um dos principais impactos sobre a sociedade. Esses impactos podem ocorrer devido à urbanização ou à inundação natural da várzea ribeirinha. Esta última ocorre, principalmente, pelo processo natural no qual o rio ocupa o seu leito maior, de acordo com os eventos chuvosos extremos, em média com tempo de retorno superior a dois anos. Os impactos sobre a população são causados, principalmente, pela ocupação inadequada do espaço urbano. Essas condições ocorrem, em geral, devido às seguintes ações:

1. Como, no Plano Diretor Urbano da quase totalidade das cidades brasileiras, não existe restrição alguma quanto ao loteamento de áreas de risco de inundação, a seqüência de anos sem enchentes é razão suficiente para que empresários loteiem áreas inadequadas;
2. Invasão de áreas ribeirinhas, que pertencem ao poder público, pela população de baixa renda;
3. Ocupação de áreas de médio risco, que são atingidas com freqüência menor, mas que quando o são, sofrem prejuízos significativos.

Quanto aos impactos devido à urbanização, existe uma visão limitada do que é a gestão integrada dos recursos hídricos e grande parte dos problemas gerados no espaço urbano é devido ao desenvolvimento da infra-estrutura de forma setorizada, ou seja, consideram-se apenas a regulamentação do uso do solo e o tráfego no planejamento urbano, sem avaliar o impacto da infra-estrutura de água. A falta de conhecimento generalizado sobre o assunto por parte da população e dos profissionais de diferentes áreas que não possuem informações adequadas sobre os problemas e suas causas, tem levado a decisões muitas vezes onerosas, onde algumas empresas se apóiam para aumentar seus lucros. Por exemplo, o uso de

canalização para drenagem é uma prática difundida no Brasil, mesmo representando custos altos e que geralmente tendem a aumentar o problema que pretendiam resolver. A própria população, quando possui algum problema de inundação, solicita a execução de um canal para o controle desse evento. Com o canal, a inundação é apenas transferida para jusante afetando outra parte da população.

Nos países desenvolvidos, o abastecimento de água e o tratamento de esgoto e controle quantitativo da drenagem urbana estão, de forma geral, resolvidos através de mecanismo de investimento e legislação. Na drenagem urbana e nas inundações ribeirinhas foi priorizado o controle através de medidas não-estruturais (legais) que obrigam a população a controlar na fonte os impactos devido à urbanização. O principal problema nos países desenvolvidos é o controle da poluição difusa devido às águas pluviais urbanas e rurais. Por outro lado, o controle nos países em desenvolvimento ainda se encontra no estágio do tratamento do esgoto. Em alguns países, como o Brasil, o abastecimento de água que poderia estar resolvido, devido à grande cobertura de abastecimento, volta a ser um problema devido a forte contaminação dos mananciais pela expansão urbana e falta de tratamento de esgoto. Inundações ribeirinhas, drenagem urbana e resíduos sólidos são processos sem política de gestão nos países em desenvolvimento. A combinação de todos estes fazem com que os rios e aquíferos urbanos estejam contaminados, a população sofra freqüentes inundações com conseqüências diretas sobre a saúde, além da deterioração ambiental. A Tabela 3.1 apresenta uma comparação dos cenários de desenvolvimento dos aspectos da água no meio urbano entre países desenvolvidos e países em desenvolvimento.

### **3.2 Impacto devido ao escoamento urbano**

O processo de inundação ocorre quando as águas dos rios, riachos, galerias pluviais saem do leito de escoamento devido à falta de capacidade de transporte de um destes sistemas e ocupam áreas onde a população utiliza para moradia, transporte, recreação, comércio, indústria e outros. Estes eventos podem ocorrer devido ao comportamento natural dos rios ou ampliados pelo efeito da alteração produzida pelo homem na urbanização pela impermeabilização das superfícies e a canalização dos rios. Na medida em que a população impermeabiliza o solo e acelera o escoamento através de condutos e canais, a quantidade de água que chega ao mesmo tempo no sistema de drenagem aumenta produzindo inundações mais freqüentes do que as que existiam quando a superfície era permeável e o escoamento se dava pelas ravinas naturais. Os impactos no meio urbano resultantes da inundação dependem

do grau de ocupação da várzea pela população (inundações ribeirinhas) e da impermeabilização e canalização da rede de drenagem (drenagem urbana). As inundações ribeirinhas têm sido registradas junto com a história do desenvolvimento urbano. As inundações devido à urbanização têm sido mais frequentes neste século, com o aumento significativo da população nas cidades e a tendência dos engenheiros atuais de fazerem projetos com uma visão pontual do problema, ou seja, drenarem o escoamento pluvial o mais rápido possível das áreas urbanizadas (Tucci, 2003). A Figura 3.1 apresenta o conjunto dos processos que se origina no uso do solo e culminando com o aumento do escoamento na drenagem.

Tabela 3.1 - Comparação dos aspectos da água no meio urbano

<b>Infra-estrutura urbana</b>	<b>Países desenvolvidos</b>	<b>Brasil</b>
Abastecimento de água	Resolvido, cobertura total	Grande parte atendida, tendência de redução da disponibilidade devido à contaminação, grande quantidade de perdas na rede
Saneamento	Grande cobertura na coleta e tratamento dos efluentes	Falta de rede e estações de tratamento; as que existem não conseguem coletar esgoto como projetado
Drenagem Urbana	Controlados os aspectos quantitativos; Desenvolvimento de investimentos para controle dos aspectos de qualidade da água	Grandes inundações devido à urbanização; Controle que agrava as inundações através de canalização Aspectos de qualidade da água nem mesmo foram identificados
Inundações Ribeirinhas	Medidas de controle não-estruturais como seguro e zoneamento de inundação	Grandes prejuízos por falta de política de controle

Fonte: (Tucci, 2003)

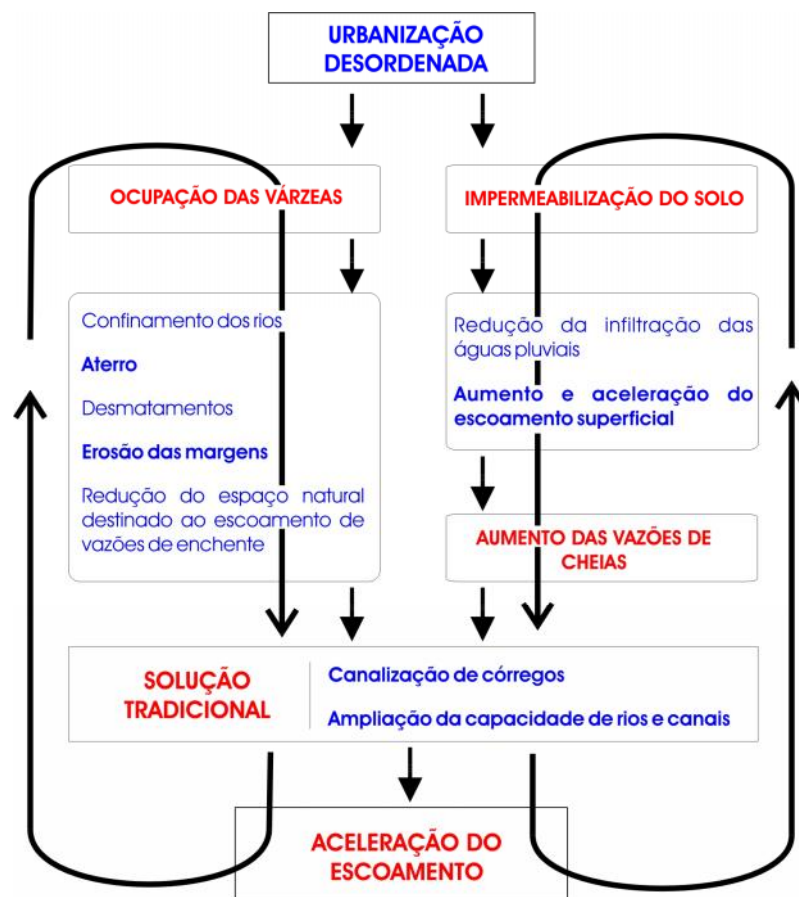


Figura 3.1 – Processo de impacto da drenagem urbana (Sudersha, 2002). Adaptado

### 3.2.1 Inundações de áreas ribeirinhas

As inundações podem ocorrer em áreas ribeirinhas, onde os rios geralmente possuem dois leitos: o leito menor onde a água escoar na maioria do tempo e o leito maior que é inundado em média a cada dois anos. Este tipo de evento ocorre, normalmente, em bacias grandes (maior do que 500 km<sup>2</sup>), sendo decorrência do processo natural do ciclo hidrológico.

Os problemas resultantes da inundação dependem do grau de ocupação da várzea pela população e da frequência com a qual ocorrem as inundações (Tucci, 2003). A ocupação de áreas de riscos de inundação provoca impactos sociais relevantes. Esta ocupação se dá principalmente pela falta de uma política pública, pois as áreas hoje desocupadas devido a inundações sofrem pressões para serem ocupadas. Isto pode ser evitado através do planejamento do uso do solo, regulamentada no Plano Diretor Urbano das cidades. Os principais impactos sobre a população são:

1. Prejuízos de perdas materiais e humanas;
2. Interrupção da atividade econômica das áreas atingidas, gerando ônus para a região;
3. Contaminação por doenças de veiculação hídrica como leptospirose, cólera, entre outros;

O que se observa normalmente é a forma como é tratada esta questão, pois o gerenciamento atual não incentiva a prevenção destes problemas, uma vez que quando ocorre a inundação o município declara estado de calamidade pública e recebe recursos a fundo perdido, isto é, não necessitando realizar concorrência pública para gastar o recurso. Outra questão importante é uma falta de conscientização por parte da população, já que a maioria das soluções sustentáveis passa por medidas não-estruturais que envolvem restrições à população, e acaba optando por medidas estruturais aumentando o custo da obra e, em alguns casos, transferindo o problema para jusante. Para buscar modificar este cenário é necessário um programa a nível estadual voltado à educação da população, além de atuação junto aos bancos que financiam obras em áreas de risco.

### 3.2.2 Inundações devido à urbanização

O processo de urbanização das grandes cidades tem provocado impactos significativos para a população e para o meio ambiente. Este desenvolvimento se deu de forma desordenada, o que desencadeou um aumento significativo na frequência e nos níveis das inundações, refletindo na qualidade de vida da população e nos prejuízos associados a estes eventos. De fato, com o desenvolvimento urbano, as alterações hidrológicas correspondentes são inevitavelmente observadas: aumento considerável nos volumes escoados e alterações nos hidrogramas de cheias, principalmente devido ao crescimento de áreas impermeáveis. A filosofia de escoar a água precipitada o mais rápido possível da área em questão através de canalização, apenas transfere o problema para jusante afetando outra parte da população. O volume que escoava lentamente através da superfície do solo e que era retido pela vegetação ou tinha sua velocidade reduzida pela própria rugosidade do solo, com a urbanização passa a escoar no canal, exigindo maior capacidade de escoamento das seções, gerando um maior custo de manutenção para redução dos picos de vazão. A Figura 3.2 representa o efeito sobre as variáveis do ciclo hidrológico devido à urbanização.

Diversas causas podem estar associadas ao processo de urbanização. A Tabela 3.2 apresenta algumas destas causas e seus impactos.

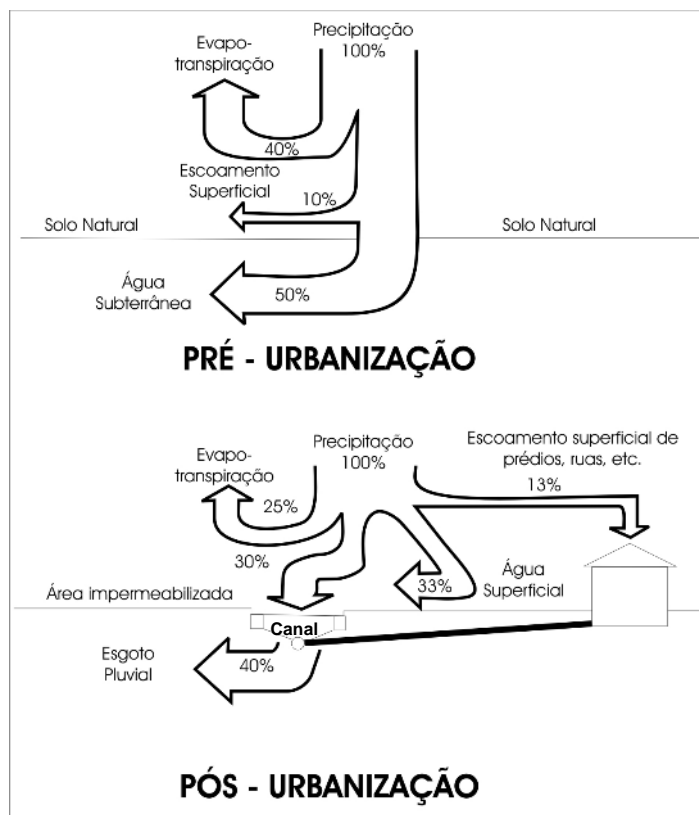


Figura 3.2 – Características do balanço hídrico numa bacia urbana (Tucci e Bertoni, 2003).

Adaptado

Tabela 3.2 – Causas e impactos da urbanização sobre as cheias dos rios urbanos

CAUSAS	IMPACTOS
Impermeabilização	- Maiores picos de cheia e vazões em rios
Redes de drenagem	- Maiores picos de cheia a jusante
Lixo	- Degradação da qualidade da água - Entupimento de bueiros e galerias pluviais
Redes de esgotos sanitários deficientes	- Degradação da qualidade da água - Doenças de veiculação hídrica
Desmatamento e desenvolvimento indisciplinado	- Maiores picos de cheia e volumes escoados - Maior erosão - Assoreamento em canais e galerias
Ocupação de várzeas	- Maiores prejuízos ao patrimônio por enchentes - Maiores picos de cheias - Maiores custos de utilidades públicas

Fonte: Bollmann (2004)

### 3.3 Inundação Repentina (*Flash Flood*)

As enchentes repentinas ou *flash flood* são os tipos mais perigosos de inundações, porque elas combinam o poder destrutivo de uma inundação, associada a uma velocidade incrível e imprevisível. Estas inundações podem acontecer repentinamente com quase nenhum aviso e as águas da inundação podem alcançar o pico de cheia em apenas alguns minutos.

Vários fatores podem estar relacionados com a causa de uma enchente repentina. Geralmente eles são resultados de chuvas pesadas concentradas em uma pequena área, tempestades tropicais e furacões. Outra situação de característica improvável é o rompimento de represas ou barragens, diques, que certamente causam prejuízos incalculáveis para a região atingida. A união dessas situações também pode ocorrer; isto é, tempestades tropicais e furacões seguidos do rompimento de barragens ou diques, este último ocorrido, recentemente, em Nova Orleans, EUA.

A mudança rápida do comportamento do fluxo do rio é o principal fator surpresa para a população, tornando este tipo de evento muito perigoso. Qualquer inundação está relacionada com o comportamento do nível do rio e extravasamento do seu curso natural. No caso de uma enchente repentina é um tipo específico de inundação que surge e se desloca em grande velocidade sem que haja qualquer advertência do seu grau de destruição.

Quando uma represa ou dique se rompe, um grande volume de água é liberado repentinamente a jusante, destruindo tudo que esteja em seu caminho. Este tipo de enchente apresenta como característica, portanto, grandes velocidades de escoamento, podendo mover pedregulhos, arrancar árvores, destruir casas ou qualquer outro tipo de estrutura que não seja projetada para suportar este impacto. Conseqüentemente, o controle das inundações envolve uma previsão hidrológica e meteorológica.

Existem também vários fatores que podem gerar inundação em decorrência do uso do solo, ocupação de planícies de inundação, além dos tipos de inundação já descrita anteriormente, isto é, inundação em áreas ribeirinhas e inundação devido à urbanização, estes mais comumente encontrados no Brasil. Outros tipos de inundação são apresentados a seguir relacionados a sua característica:

1. Inundação no litoral: furacões e tempestades tropicais podem produzir chuvas pesadas, ou levar água de oceano para o continente. Praias e casas litorâneas podem ser varridas pela água. Este tipo de inundação também pode ser produzido

através de ondas gigantes denominadas *tsunamis*, ondas relativa às marés gigantescas que são criadas por erupções de vulcões ou terremotos no oceano;

2. Enchentes repentinas em riachos efêmeros: é um canal ou um riacho seco característico de regiões áridas ou desérticas. Quando ocorre uma tempestade nestas áreas, os cortes de água de chuva na terra seca criam um rio pequeno com escoamento rápido. Enchente repentina em um riacho pode acontecer em poucos minutos, com poder suficiente para arrancar seções de pavimento;

### **3.4 Medidas de controle**

As medidas para o controle das inundações podem ser classificadas em estruturais, quando o homem modifica o rio, e em não-estruturais, quando o homem convive com o rio. No primeiro caso, estão as medidas de controle através de obras hidráulicas como barragens, diques e canalização, entre outros. No segundo caso, encontram-se medidas do tipo preventivas, tais como zoneamento de áreas de inundação, sistema de alerta ligada a Defesa Civil e seguros. Não se pode achar que as medidas poderão controlar totalmente as inundações; as medidas sempre visam minimizar as suas conseqüências. Para o controle de inundação de forma eficiente torna-se necessária a associação de medidas estruturais e não-estruturais, de modo que garanta à população o mínimo de prejuízo possível além de possibilitar uma convivência harmoniosa com o rio. Para as populações ribeirinhas, essa convivência é fundamental para evitar perdas materiais e até, em alguns casos, perdas humanas. As construções de barragens, diques, canalizações em muitos dos casos são necessários, porém, as ações de cunho social, econômico e administrativo também têm seu papel decisivo, através da educação e principalmente da conscientização por parte da população e do poder público. A tomada de decisão é definida em função das características do rio, do benefício da redução das enchentes, além dos aspectos sociais do seu impacto.

No Brasil não existe programa sistemático de controle de enchentes que envolvam seus diferentes aspectos. O que se observa são ações isoladas por parte de algumas cidades. Estrela, no Rio Grande do Sul, implementou, dentro do seu Plano Diretor, a legislação de zonas de uso especial, definidas pela restrição de ocupação e de construções abaixo de determinadas cotas, estabelecidas no zoneamento de inundação previamente elaborado (Rezende e Tucci, 1979).

A necessidade de viabilizar tecnicamente o sistema de drenagem existente passa, forçosamente, pela adoção de medidas compensatórias no ciclo hidrológico, conforme



discutido em Baptista e Nascimento (1996) *apud* Baptista et al. (1998). A adoção de técnicas alternativas, favorecendo o armazenamento e a infiltração das águas pluviais, implica em novas estratégias de planejamento e de gestão do sistema urbano, em maior consonância com os princípios de sustentabilidade de desenvolvimento. Em termo de gestão, eles implicam, igualmente, em uma maior interação do serviço de manutenção do sistema de drenagem, com outros serviços urbanos, como a limpeza pública, por exemplo.

Dentro desta visão tecnológica e institucional, torna-se evidente a necessidade de ações em diversas áreas:

1. Científico-tecnológica: Implantação de programas de monitoramento hidrosedimentológico e ambiental visando o melhor conhecimento dos processos hidrológicos em meio urbano; desenvolvimento de estudos de viabilidade de implantação de soluções alternativas; capacitação e treinamento dos quadros técnicos municipais para as novas abordagens propostas;
2. Econômica: Disponibilização de investimentos para implantação de sistemas adequados de coleta e tratamento de esgotos e lixo, bem como, manutenção dos sistemas de drenagem urbana;
3. Político-Institucional: Compatibilização da Legislação para regulamentar o uso e ocupação do solo com a adoção de medidas compensatórias no ciclo hidrológico;
4. Cultural e Educacional: Implementação de programas de treinamento formal e formação continuada nas diferentes áreas relativas à gestão ambiental urbana; implantação de programas de educação ambiental para a população em geral.

A adoção destes procedimentos em um quadro de uso racional dos recursos públicos passa, certamente, pela elaboração de um Plano Diretor de Drenagem Urbana consistente e perfeitamente afinado com os planos de ocupação urbano, capaz de integrar as diferentes percepções dos problemas, a fim de propor um ordenamento racional e coerente das ações que se fazem necessárias.

A ocupação de planícies de inundação pode oferecer vantagens, ao contrário do que muitas pessoas pensam. Todo plano de mitigação de desastres é baseado em restrições aos assentamentos em planícies de inundação, as quais limitam as possibilidades de aproveitamento dessas áreas para o desenvolvimento sócio-econômico. É fundamental encontrar um equilíbrio entre necessidades e riscos.

A Gestão Integrada de Enchentes (GIE), segundo o Programa Associado de Gestão de Enchentes (2004), envolve o uso do solo e os recursos hídricos de uma bacia hidrográfica, sendo um marco mais amplo da gestão integrada dos recursos hídricos (GIRH), com o objetivo de maximizar o uso eficiente das planícies de inundações e reduzir ao mínimo o número de vítimas. A GIE tem por finalidade a adaptação de medidas integradas apropriadas para a gestão das enchentes.

No Plano de Execução da Cúpula Mundial sobre Desenvolvimento Sustentável (CMDs), realizado em Johannesburgo na África do Sul, entre os meses de agosto e setembro de 2002, destacava-se a necessidade de:

... mitigar os efeitos de secas e inundações mediante a adoção de medidas como o uso mais eficiente das informações e as previsões climática e meteorológica, os sistemas de alerta, a gestão do uso e ocupação do solo e dos recursos naturais, as práticas agrícolas e a conservação dos ecossistemas tendo como fim conter as tendências atuais e reduzir ao mínimo a degradação dos solos e dos recursos hídricos... (APMF, 2004, p. 6)

Os alertas de inundação e as medidas de emergência oportunas são aspectos complementares de todas as formas de intervenção. A disseminação de mensagens de alerta claras e precisas e a maior conscientização da população são os aspectos que mais contribuem para a eficácia na redução dos prejuízos associados à inundação.

#### 3.4.1 Medidas estruturais

A escolha de medidas de controle e proteção de inundações deve ser bem analisada para o melhor aproveitamento das áreas vulneráveis. As medidas estruturais são medidas físicas de engenharia desenvolvidas pela sociedade para reduzir o risco de enchentes. Essas medidas podem ser extensivas ou intensivas. As medidas extensivas são aquelas que agem na bacia, procurando modificar as relações entre precipitação e vazão, como modificação da cobertura vegetal no solo, que reduz e retarda os picos de enchente e controla a erosão da bacia. Em geral, os diques e os reservatórios são mais apropriados em planícies de inundação que são utilizadas de forma mais intensiva. Nessas áreas, as estruturas a prova de inundação e as medidas de proteção das linhas de comunicação podem reduzir seus efeitos debilitantes para a economia. As medidas intensivas são aquelas que agem no rio e podem ser

de três tipos: (a) medidas que aceleram o escoamento; (b) medidas que retardam o escoamento; (c) desvio do escoamento.

A seguir serão apresentadas algumas estruturas que tem como função reduzir os riscos de inundação:

1. Reservatório e bacias de amortecimento: A construção destas estruturas (Figura 3.3) tem dois propósitos principais:

- Amortecer o pico de cheias para um evento chuvoso intenso, garantindo o controle para jusante das áreas vulneráveis;
- Armazenamento de água para abastecimento, irrigação e outros fins.

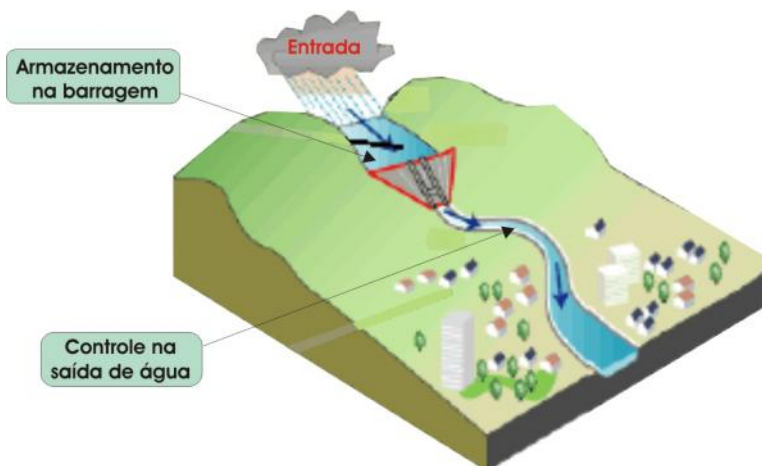


Figura 3.3 – Desenho representativo do reservatório de amortecimento.

2. Diques: Aumento da capacidade de descarga dos rios e corte de meandros (Figura 3.4).

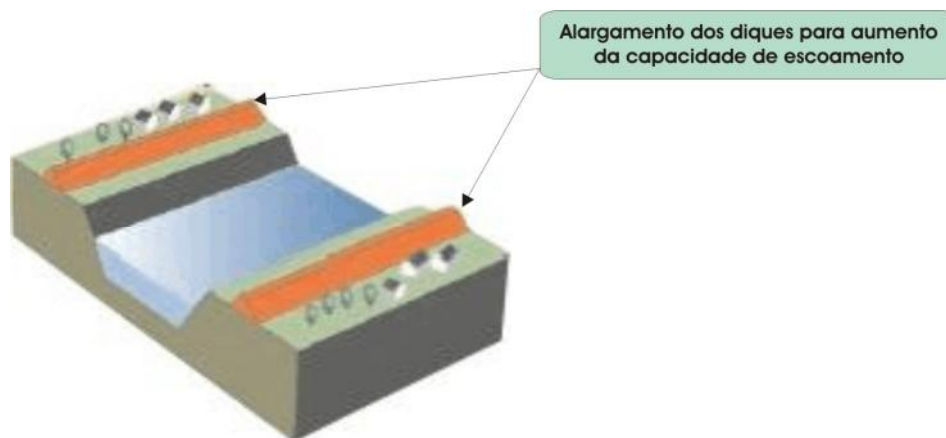


Figura 3.4 – Desenho representativo de um dique de proteção.

3. Alargamento da calha principal do rio: Aumento da capacidade de descarga e conseqüente diminuição do nível de água (Figura 3.5).

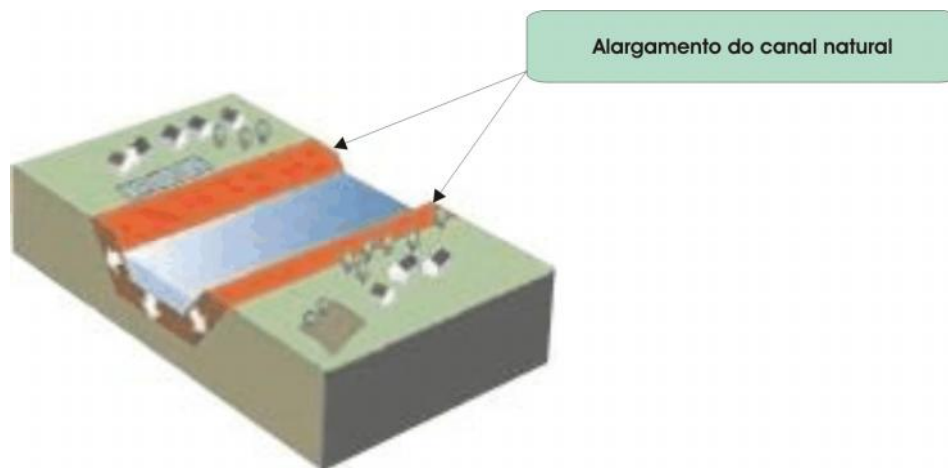


Figura 3.5 – Desenho representativo de um alargamento de canal.

4. Reflorestamento nas margens dos rios (Figura 3.6):

- Amortecimento da vazão e controle de erosão;
- Preservação do meio ambiente.

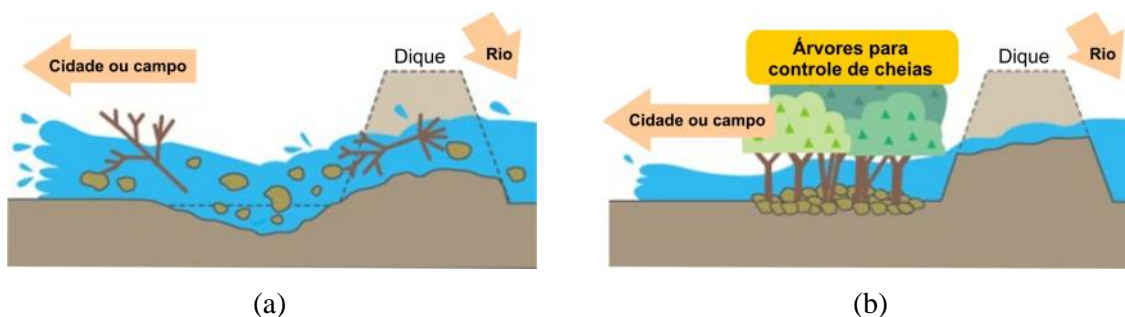


Figura 3.6 – (a) Comportamento do rio antes da implementação da medida; (b) comportamento do rio após a implementação da medida.

Estas medidas são essenciais e necessárias para a solução de grande parte dos problemas de inundações urbanas. Porém, além de onerosas, não representam por si só soluções eficazes e sustentáveis dos problemas mais complexos de drenagem urbana. As melhores soluções são alcançadas através de compreensão mais integrada do ambiente urbano e das relações entre os sistemas que o compõem.

Outra questão que deve ser ressaltada diz respeito aos riscos associados na implantação dessas estruturas, a nível sócio-econômico e ambiental. A Tabela 3.3 abaixo apresenta os riscos potenciais das barragens para seus diversos fins. A cor azul denota os aspectos positivos e a cor vermelha as conseqüências negativas:

Tabela 3.3 – Possível dimensão dos efeitos positivos (azul) e negativos (vermelho) das barragens para os diversos grupos de interesse

Efeito	Investidores e financiamentos	Empresas de construção	Instituições de abastecimento	Consumidor Final	Pessoas reassentadas	Usuários a montante/jusante	Grupos de proteção ambiental
Custo de capital/administrativo/operacional	Grande	Grande	Grande	Média	Pequena	Pequena	Pequena
Novos postos de trabalho	Pequena	Grande	Grande	Pequena	Pequena	Pequena	Pequena
Faturamento	Grande	Grande	Grande	Pequena	Pequena	Pequena	Pequena
Produção de energia e/ou abastecimento d'água	Pequena	Pequena	Grande	Grande	Média	Pequena	Pequena
<b>Proteção contra cheias</b>	<b>Pequena</b>	<b>Pequena</b>	<b>Pequena</b>	<b>Média</b>	<b>Pequena</b>	<b>Pequena/Média</b>	<b>Pequena</b>
Desenvolvimento regional	Pequena	Pequena	Média	Grande	Pequena	Pequena	Pequena
Alteração do coeficiente de escoamento	Pequena	Pequena	Pequena	Pequena	Média	Grande	Grande
Reassentamento	Pequena	Pequena	Pequena	Pequena	Grande	Média	Média
Degradação de ecossistemas e extinção de espécies	Pequena	Pequena	Pequena	Média	Média	Grande	Grande
Danos ao patrimônio cultural	Pequena	Pequena	Pequena	Grande	Grande	Grande	Pequena
Desativação da barragem	Pequena	Grande	Grande	Pequena	Média	Grande/Grande	Média

Fonte: (Kull e Krähenbühi, 2003)

As barragens construídas com a finalidade de proteção contra inundações não podem ser avaliadas através de critérios comerciais uma vez que a sua meta é evitar danos – um objetivo econômico mais amplo. A regra de que “o maior é melhor” que, aliás, constitui o princípio da economia de escala, vale também para as barragens, mas apenas até certo tamanho. Nos grandes projetos, os custos, riscos e danos potenciais podem crescer de forma exponencial colocando em dúvida a própria viabilidade econômica do empreendimento. Além dos riscos técnicos, uma série de outros fatores pode também influir na rentabilidade de uma barragem:

1. Riscos sociais e ambientais: um fator de risco que no passado, freqüentemente, passava despercebido era o do custo das possíveis conseqüências sociais e ambientais da realização do projeto. Por exemplo, o custo para reintegrar pessoas reassentadas e de redução ou compensação do impacto ambiental. A avaliação da relação do custo/benefício dos grandes projetos da atualidade envolve abrangentes análises de

impacto ambiental e planos de reassentamento, assim como definem medidas de redução ou compensação de prejuízos;

2. Riscos políticos: em países emergentes ou em desenvolvimento, devido ao longo prazo dos investimentos na construção e operação das barragens, este risco desempenha um papel bem mais importante do que aqueles projetos que podem ser amortizados a médio ou curto prazo;

3. Riscos operacionais: os riscos envolvidos na operação de uma barragem são variados e abrangentes desde danos a parte de equipamentos até mesmo na falta de gerenciamento no controle do volume de água armazenada, no caso de reservatório de amortecimento de cheia.

No passado, nem sempre os projetos de construção de barragens cumpriram os requisitos de sustentabilidade. Problemas técnicos, decisões administrativas equivocadas e planejamento insuficiente causaram resultados negativos. O Banco Mundial e os seguradores de créditos, por sua vez, desenvolveram um conjunto de medidas destinadas a reduzir tais problemas. O desenvolvimento sustentável nos setores hídrico e de produção de energia hidrelétrica inclui a análise de todas as alternativas de possível utilização.

#### 3.4.2 Medidas não-estruturais

As medidas não-estruturais defendem na sua concepção a melhor convivência da população com as cheias. Não são projetadas para dar proteção completa, já que para isso teria que prever o maior evento possível o que não é uma tarefa fácil e nem confiável. Para que estas medidas se tornem, de fato, eficazes, a participação conjunta entre o poder público e a comunidade local é fundamental, de modo que garanta uma convivência tranqüila sem prejuízos materiais e, principalmente, perdas humanas. As medidas não-estruturais para o controle das inundações podem ser agrupadas em:

1. Regulamentação do uso e ocupação do solo: Através do Plano Diretor, planejar áreas a serem desenvolvidas, através do zoneamento, e o controle das áreas atualmente loteadas, evitando a ocupação sem prevenção e previsão. O zoneamento baseia-se no mapeamento das áreas de inundação dentro da delimitação da cheia de 100 anos ou a

maior registrada. Dentro desta faixa, são definidas áreas de acordo com o risco e com a capacidade hidráulica de interferir nas cotas de cheia a montante e a jusante. A regulamentação depende das características do escoamento, topografia e tipo de ocupação dessas faixas. O zoneamento é incorporado pelo Plano Diretor Urbano e regulamentado pela Legislação Municipal específica ou pelo Código de Obras. Para as áreas já ocupadas, o zoneamento pode estabelecer um programa de transferência da população e/ou eventos mais freqüentes. O sistema de alerta tem a função de prevenir, com antecedência de curto prazo, com o intuito de reduzir os prejuízos, pela remoção, dentro da antecipação permitida;

2. Aproveitamento das áreas vulneráveis: Utilização temporária como praças, estacionamentos, parques, áreas de lazer. Um exemplo prático pode ser observado na Figura 3.7 onde uma área de inundação foi aproveitada como área de lazer. Esta medida foi adotada para o rio Tsurumi no Japão como medida para controlar a descarga de saída e reduzir, assim, os prejuízos associados a cada enchente;



Figura 3.7 – Exemplo de utilização temporária (áreas de lazer).

3. Seguro de enchente: Proteção econômica contra inundações diminuindo os prejuízos individuais causados pelas inundações;

4. Rede de Monitoramento e Previsão de Alerta: Sistema utilizado para prevenir a população com antecedência de curto prazo, no caso de eventos raros com o objetivo de evitar o pânico da população (Figura 3.8). Os alertas de enchentes e as medidas de

emergência oportunas são aspectos complementares de todas as formas de intervenção. O sistema de alerta, de forma precisa, e uma maior conscientização da comunidade são determinantes na adoção de medidas preventivas. O conhecimento desses sistemas pela população é muito importante, uma vez que pode reduzir significativamente os prejuízos inerentes aos efeitos causados pelas enchentes. Um estudo de caso realizado na cidade de Sukagawa no Japão mostrou que tal conhecimento dos mapas de perigo por parte da população pode reduzir em até 1 hora o tempo de evacuação se comparado com as pessoas que não conhecem o sistema;



Figura 3.8 – Estrutura esquemática de uma Rede de Monitoramento de controle de inundações.

5. Controle do desmatamento: Além do controle do desmatamento, o reflorestamento deve ser feito em todos os locais possíveis de modo a prevenir contra erosão e o assoreamento;



Outras medidas podem ser observadas na Tabela 3.4 abaixo:

Tabela 3.4 – Medidas não-estruturais para controle de inundações

<b>Medida</b>	<b>Características</b>	<b>Objetivo</b>
Plano Diretor	Planejamento das áreas a serem desenvolvidas e a densificação das áreas atualmente loteadas	Evitar ocupação sem prevenção
Educação ambiental	Para ser realizado junto à população. A conservação das margens dos rios, sua vegetação típica e taludes são essenciais.	Conscientizar a população que sofre ou poderá sofrer com as inundações
Medidas de apoio à população	Lugares seguros para preservar a pessoa e sua família, e construção de abrigos temporários, meios de evacuação, patrulhas de segurança.	Inserir na população que poderá ser atingida pela inundação um senso de proteção
Distribuição de informação sobre as enchentes	Programa de orientação da população sobre as previsões de enchentes para que ela aprenda a se prevenir contra as cheias.	Aprimorar a qualidade da assistência externa e a reduzir falhas como a falta de informações, a má avaliação das necessidades e formas inadequadas de ajuda.
Reassentamento	Reassentamento de residentes ilegais ocupantes das margens de rios, e de residentes legais nas áreas de enchente.	Retirar a população dos locais de risco
Soluções de mitigação	Promover o aumento das áreas de infiltração e percolação e armazenamento temporário.	Aumentar a eficiência do sistema de drenagem a jusante e da capacidade de controle de enchentes dos sistemas.
Construções a prova de enchentes	Pequenas adaptações nas construções.	Reduzir as perdas em construções localizadas nas várzeas de inundação
Sistemas hidrológicos	Histórico hidrológico da bacia e modelos que mostram o comportamento hidráulico e hidrológico do sistema do rio.	Fornecer subsídios para os estudos de comportamento da bacia, assim como previsão de cenários futuros.

FONTE: Enomoto (2004) - Adaptado

### 3.5 Construção de Mapas de Inundação

O mapeamento das áreas de risco de inundação é uma ferramenta auxiliar muito poderosa no controle e prevenção de inundações. Os mapas de inundação estão associados com o grau de risco da inundação e dos prejuízos que podem ser causados. Os mapas de perigo de cheia evidenciam a extensão das planícies de inundação, e os mapas de risco de

cheia evidenciam a extensão das planícies de cheia e bens sob risco de inundação nestas áreas. Segundo Tucci (2003) os mapas de inundação podem ser de dois tipos:

1. Mapa de Planejamento: define as áreas atingidas por cheias de tempos de retorno escolhidos;
2. Mapa de Alerta: informa em cada esquina ou ponto de controle o nível da régua para o qual inicia a inundação. Este mapa permite o acompanhamento da enchente por parte dos moradores, com base nas observações das réguas;

Estes mapas não são apenas necessários para uma avaliação de riscos de cheias, mas podem também facultar informações valiosas para o planejamento de toda uma gama de atividades incluindo as reações de emergência a uma cheia catastrófica. O risco de inundação é o resultado da combinação do perigo de cheia e das conseqüências da cheia. Existem inúmeros fatores que podem afetar o risco de cheia. Estes fatores podem ser agrupados em quatro grandes categorias associados ao grau de risco de inundação (Tabela 3.5).

Tabela 3.5 – Principais fatores que afetam o risco de inundação

<b>CATEGORIAS</b>			
Comportamento da cheia	Topografia	População em risco	Gestão da emergência
Severidade	Vias de evacuação	Número de pessoas	Previsão de cheias
Altura	Ilhas	Número de casas e outros bens	Alerta de cheias
Velocidade	Presença de diques contra cheias	Tipo de uso do solo	Plano de reação às cheias
Taxa de subida	–	Sensibilidade para as cheias	Plano de evacuação
Duração	–	–	Plano de evacuação

Fonte: HR Wallingford (2005)

### 3.5.1 Grau de risco de inundação

O grau de risco de inundação e do impacto social varia de acordo com a dimensão da população que vive nas áreas de riscos ou depende dela para sobrevivência. Uma análise de vulnerabilidade, que identifica a população sob maior risco de inundação, pode ser igualmente utilizada para identificar as respostas dos serviços de emergência que podem ser necessárias,

incluindo a necessidade de abrigos temporários e meios de evacuação. A análise é igualmente importante para as decisões sobre o nível de proteção contra as cheias. As decisões baseiam-se no conhecimento da rentabilidade das várias opções.

### 3.5.2 Elaboração do mapa de risco de inundação

Os mapas de risco de inundação são ferramentas bastante úteis, uma vez que permitem espacializar as áreas de risco de modo a tornar perceptível o espaço urbano e o sistema de drenagem como um todo. Sua elaboração de forma técnica, porém, de fácil entendimento por parte da população, funciona como suporte na política de prevenção e controle de inundações possibilitando a integração a programas de educação ambiental.

Para elaboração destes mapas são necessárias algumas informações como as descritas a seguir:

1. Informação sobre cheias históricas;
2. Mapas de solo;
3. Fotografias aéreas;
4. Imagens de satélites;
5. Modelagem de dados sobre o comportamento hidráulico do rio;
6. Utilização de modelos digitais de terreno e níveis de água.

Segundo Nascimento et al. (1998), para mostrar os mapas à população alguns itens devem aparecer:

1. Localização dos nomes de pontos altamente conhecidos;
2. Uso de logotipos e ícones fáceis de identificar;
3. Declividades, com áreas de alta declividade identificadas por sombras progressivas de cores;
4. Rodovias principais e secundárias;
5. Áreas de inundação (de acordo com dados atuais e probabilidade de ocorrência);

A elaboração do mapa de inundação, na prática, é muito difícil uma vez que necessita de muitas informações o que torna o trabalho demorado e muitas vezes deficiente. No Brasil as bases de dados não são tão precisas e muitas vezes pouco confiáveis. Portanto, é

conveniente dividir o estudo em duas fases. Na primeira, dita preliminar, seriam delimitadas com precisão reduzida às áreas de inundação com base em mapas topográficos existentes e marcas de enchentes. Na segunda fase, com a delimitação aproximada das áreas de inundação, a topografia com maior detalhe seria realizada nas áreas definidas, juntamente com a batimetria do rio, e calculado com precisão os dois mapas referidos.

O desenvolvimento destes mapas envolve a necessidade de investimento por parte do município ou do órgão responsável pelo gerenciamento no controle de enchentes, para a realização do levantamento topográfico, a batimetria do local, o que torna o trabalho um pouco oneroso. Para regiões onde os dados de vazão e de chuva são escassos, em geral, utilizam-se dados obtidos através de modelos hidrológicos, de acordo com o tempo de retorno a ser utilizado e a duração da precipitação.

Como resultado final, o mapa de inundação é formatado, normalmente, com o auxílio de uma ferramenta de geoprocessamento que pode agrupar um grande número de informações, como: arruamento, vegetação, hidrografia, área impermeável, etc.

### **3.6 Modelagem hidrológica**

#### **3.6.1 Modelos hidrológicos**

O modelo hidrológico é uma ferramenta que a ciência desenvolveu, para melhor entender e representar o comportamento da bacia hidrográfica e prever condições diferentes das observadas. É usado em pesquisas de bacias hidrográficas para estruturar dados, estudar as respostas do local, selecionar e avaliar parâmetros, estudar a significância da variabilidade espacial e temporal das características físicas e determinar observações necessárias para encontrar um grau de precisão em um período específico de tempo (De Coursey, 1985) *apud* (Buchianeri, 2004). É utilizado também para antecipar os eventos e representar o impacto da urbanização de uma bacia antes que ele ocorra, e que medidas preventivas podem ser tomadas. Pode ser utilizada para previsão de uma enchente em tempo real, ocorrência de eventos extremos estatisticamente possíveis, impactos da alteração de um rio como derivações e construções de barragens.

A partir da década de 60, iniciou-se formalmente a era dos modelos hidrológicos, com o desenvolvimento do modelo Stanford (Crawford e Linsley, 1966), que originou toda uma geração de modelos conceituais nos quais os processos físicos são representados através de

um conjunto de reservatórios, cada qual descrevendo uma fase da parcela terrestre do ciclo hidrológico. Ainda nessa década iniciou-se a pesquisa por procedimentos automáticos para a calibração desses modelos Dawdy e O'Donnell (1965) *apud* Xavier (2002), entendida como a busca pelo conjunto de parâmetros do modelo que, a partir de determinado critério, permitisse que o modelo obtivesse uma resposta que se aproximasse ao máximo das séries naturais observadas. Na década de 70 o esforço mundial no sentido de desenvolver modelos a fim de estudar os procedimentos adequados de calibração foi árduo devido, principalmente, à limitação na capacidade de processamento dos computadores da época. A década de 80, ainda com grande esforço na direção de se conseguir uma calibração eficiente e aceitável Sorooshian e Dracup (1980), entre outros, destacaram-se pela preocupação com a qualidade dos dados de entrada, especialmente da precipitação, e de seu efeito na calibração e resposta dos modelos hidrológicos. Santos et al. (2003) modificaram um algoritmo genético para otimizar os parâmetros de um modelo hidrossedimentológico de base física e obtiveram excelentes resultados concluindo que a ferramenta proposta poderia ser considerada uma ferramenta robusta porá otimização de parâmetros. Nos anos 90 inúmeros modelos foram criados apresentando resultados satisfatórios. Cabe ressaltar ainda que ao longo da década buscou-se uma integração maior entre modelos atmosféricos e modelos hidrológicos, estes associados a esquemas de transferência solo-vegetação-atmosfera (SVAT), como apontado por Eagleson (1986) e O'Connell e Todini (1996), etapa fundamental para o desenvolvimento dos modelos hidrológicos como resposta ao desafio de se melhor compreender as mudanças climáticas a que esteve e a que estará sujeito o planeta. Galvão et al. (2005) apresentaram os resultados da aplicação do aninhamento de um modelo atmosférico de alta resolução em modelos hidrológicos para predição de vazão diária e o seu uso para a simulação de reservatórios. Os resultados mostraram que as informações produzidas por este processo de previsão poderiam ser úteis para o processo de tomada de decisão em operação de reservatórios, apesar das incertezas associadas. Recentemente, Silva (2005) desenvolveu um sistema de previsão hidrometeorológica para uso em sistemas de informações para ser usado por comitês de bacias hidrográficas. O sistema trata-se de um acoplamento entre modelo atmosférico e modelos hidrossedimentológico. Na atualidade, diversos estudos utilizando modelos hidrológicos são realizados para melhor compreender os processos físicos numa bacia hidrográfica: estudos de prevenção de inundações, operação de reservatórios, planejamento e uso dos recursos hídricos, estudos de impactos antrópicos em bacias urbanas e rurais, drenagem urbana, entre outros.

### 3.6.2 Classificação dos Modelos Hidrológicos

A simulação é o processo de utilização de modelo, existindo em geral três fases: uma de calibração (ou ajuste do modelo), outra de validação (ou verificação) e previsão. A calibração ou estimativa de parâmetros é a fase de simulação em que os parâmetros são determinados; a verificação (ou validação) é a simulação do modelo com os parâmetros estimados em que se verifica a validade do ajuste realizado; e a previsão é a simulação do sistema pelo modelo com parâmetros ajustados para quantificação de suas respostas a diferentes entradas. O ajuste de parâmetros depende da disponibilidade dos dados históricos, medições da amostra, e determinação da característica física do sistema.

De acordo com Tucci (1998), os métodos utilizados para as estimativas de parâmetros são:

1. Estimativas sem dados históricos: quando não existem dados sobre as variáveis do sistema, podem-se estimar os valores dos parâmetros baseando-se em informações das características do sistema. Em geral, cada parâmetro possui um intervalo de variação possível, obtido pela literatura;
2. Ajuste por tentativas: é o processo em que existindo valores das variáveis de entrada e saída, são obtidos por tentativa os parâmetros que melhor representem os valores observados através do modelo utilizado;
3. Ajuste por otimização: utiliza os mesmos dados do processo por tentativa, mas, por métodos matemáticos, otimiza uma função objetivo que retrata a diferença entre os dados observados e calculados pelo modelo.

Segundo Cleary (1998) *apud* (Buchianeri, 2004), os modelos alargam informações, mas não produzem números inquestionáveis. Eles tentam representar uma versão simplificada do que freqüentemente é um sistema complexo. Assim, seus resultados são imperfeitos. De qualquer modo, quando se usam em conjunto com experiências e com dados de campo, eles ajudam a tomar decisões técnicas melhor do que seria possível por outros meios. Eles são particularmente úteis, quando muitas alternativas são comparadas dentro de uma mesma idéia (dados, parâmetros físicos estimados, etc), de modo que, enquanto os dados numéricos de qualquer alternativa única podem não ser exatos, o resultado comparativo são usualmente válidas.

Dois grandes grupos de modelos dentro do processo de simulação hidrológica podem ser vistos a seguir:

1. Modelos Estocásticos: se a chance de ocorrência das variáveis é levada em conta, e o conceito de probabilidade é introduzido na formulação do modelo, o processo e o modelo são ditos estocásticos (Chow, 1964). Normalmente estes modelos fazem uso de séries observadas de vazões em determinados pontos e, a partir de certas hipóteses sobre seu comportamento, permitem que estas sejam representadas por um dos diversos tipos de modelos de séries temporais normalmente utilizados; e
2. Modelos determinísticos: quando o modelo segue uma lei definida que não a lei das probabilidades, o modelo e os processos são ditos determinísticos. O objetivo destes modelos é de representar o sistema físico natural, isto é, os processos do ciclo hidrológico, considerando que, a partir dos dados de entrada tais como precipitação, umidade do solo, cobertura vegetal, entre outros, possam ser fornecidas as séries de vazões. Estes modelos são denominados modelos chuva-vazão (Xavier, 2002).

Quanto à forma com que o modelo representa a variabilidade espacial dos processos, estes podem ser:

1. Modelos distribuídos: quando as variáveis e parâmetros do modelo dependem do espaço e do tempo. Estes modelos permitem que toda a área seja discretizada por elementos regulares ou irregulares, considerando seus aspectos de homogeneidade. Permite, ainda espacializar a precipitação de acordo com sua variabilidade espacial o que torna a simulação mais próxima da realidade local;
2. Modelos concentrados: quando não leva em conta a variabilidade espacial; isto é, os parâmetros físicos relacionados com o solo, a vegetação e a chuva são considerados homogêneos para toda a bacia. A precipitação média de uma bacia é um exemplo de integração espacial de variável de entrada.

Segundo Buchianeri (2004), os modelos ainda são classificados de acordo com suas formulações, isto é, se leva em conta os processos físicos envolvidos no processo ou apenas através de conceitos sem representação explícita dos processos físicos:

1. Modelos conceituais: estes modelos procuram descrever todos os processos envolvidos no fenômeno estudado. Estão basicamente fundamentados em formulações físicas, por exemplo, equações de conservação da massa, energia e quantidade de

movimento;

2. Modelos empíricos: estes, por sua vez, ajustam os valores calculados aos dados observados através de função que não tem nenhuma relação com os processos físicos envolvidos.

A escolha do modelo hidrológico a ser utilizado na solução de problemas relacionados à gestão de recursos hídricos depende de uma avaliação preliminar envolvendo os seguintes aspectos:

1. Objetivos do estudo para qual o modelo vai ser utilizado;
2. Características climáticas e físicas da bacia e do rio;
3. Disponibilidade de dados;
4. Familiaridade da equipe de projeto com o modelo.



## 4 METODOLOGIA: MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia empregada para execução da dissertação tem como idéia principal elaborar um conjunto de medidas ou soluções que possibilitem os aspectos de prevenção e controle de inundações em áreas de riscos, a fim de contribuir junto ao poder público no gerenciamento e na tomada de decisão para amenizar dos efeitos provenientes das ações antrópicas no meio urbano. Como base de dados foi utilizado o relatório técnico elaborado pela AAGISA – Agência de Águas, Irrigação e Saneamento do Estado da Paraíba, atualmente AESA – Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba, sobre a *Elaboração do mapa de inundações: Bacia do rio Mamanguape/PB* desenvolvido em decorrência dos efeitos das fortes chuvas ocorridas no início de 2004. Os procedimentos para realização do trabalho estão descritos a seguir:

1. Levantamento de dados e informações: ocorrência de eventos chuvosos na região de grande magnitude ao longo das últimas décadas; obtenção de informações relativas às cheias de janeiro de 2004 através de entrevistas com a população local a fim de identificar marcas de cheias e prejuízos decorrentes; Dados complementares junto à Prefeitura e Defesa Civil sobre as enchentes e seus efeitos.
2. Obtenção do mapa topográfico e de inundação: foram utilizadas as cartas altimétricas da SUDENE, com escalas de 1.100.000, em formato digital, com curvas de nível equidistantes de 40m. Algumas aproximações tiveram que ser realizadas para a obtenção de curvas de níveis com espaçamento desejado para este tipo de estudo. Foi elaborado, também, o Modelo Digital de Elevação da bacia do rio Mamanguape.
3. Obtenção dos dados de pluviometria e fluviometria: os dados observados de precipitação e vazão foram obtidos junto à ANA – Agência Nacional de Águas e ao LMRS – Laboratório de Meteorologia e Sensoriamento Remoto do Estado da Paraíba.
4. Análise do comportamento pluviométrico na região: a análise da série de chuva através da Transformada *Wavelet* com o objetivo de identificar, através da frequência de sinal, os períodos secos e chuvosos no município de Alagoa Grande.

5. Escolha do modelo hidrológico utilizado na pesquisa: o modelo físico distribuído KINEROS2 foi utilizado para gerar a vazão espacializada e simular os hidrogramas em diferentes seções da bacia.
6. Elaboração de um plano para o controle de inundações: este plano tem por objetivo propor medidas de proteção e ações para o controle das inundações dando subsídio para a Prefeitura local e aos órgãos responsáveis pela estruturação do Plano Diretor de Drenagem Urbana.

#### 4.1 A Transformada *Wavelet*

O conceito da Transformada *Wavelet* foi formalizado pela primeira vez na década de 1980 em uma série de artigos de Grossman e Morlet (1984), tornando-se uma ferramenta alternativa à Transformada de Fourier. Entretanto, já em 1910, o físico Alfred Haar introduzira um sistema completo de funções ortogonais com muitas das propriedades e características que fazem das *wavelets* uma ferramenta matemática com vasto campo de aplicações nas mais diversas ciências. A *wavelet* vem sendo utilizada em várias áreas, como economia, astronomia, acústica, compressão de dados, engenharia nuclear, codificação de sub-bandas, processamento de sinais e de imagem, neurofisiologia, música, imagem de ressonância magnética, reconhecimento de voz, sistema ótico, fractais, radar, visão humana, matemática pura, geofísica, entre outros.

Santos et al. (2001) demonstraram que a Transformada *Wavelet* pode ser utilizada para análises de séries temporais de precipitação e uma aplicação também da Transformada *Wavelet* em estudos de regionalização de vazões pode ser encontrada em Santos et al. (2002). A análise de dados de acordo com escalas variáveis no domínio do tempo e da frequência é a idéia básica da utilização da teoria de *wavelet*. As *wavelets* são funções matemáticas que ampliam intervalos de dados, separando-os em diferentes componentes de frequência, permitindo a análise de cada componente em sua escala correspondente. A aplicação da *wavelet* permite a análise de séries não-estacionárias e, neste caso, é apropriada para estudos de eventos irregularmente distribuídos.

A escala da *wavelet* pode ser variada mudando a largura da *wavelet* básica. Esta é a real vantagem da análise de *wavelet* em relação ao espectro móvel de Fourier.

A análise da Transformada *Wavelet* mantém a localização do tempo e da frequência em uma análise de sinal pela decomposição ou transformação de uma série temporal unidimensional numa imagem difusa de tempo e frequência, simultaneamente. Assim, é possível obter informações da amplitude de quaisquer sinais periódicos dentro da série, bem como informações de como esta amplitude varia com o tempo.

A Figura 4.1 mostra exemplos de *wavelets* básicas ou *wavelets*-mãe, como é chamada na literatura. Estas *wavelets* têm a vantagem de incorporar uma onda de um determinado período, e de serem finitas na extensão.

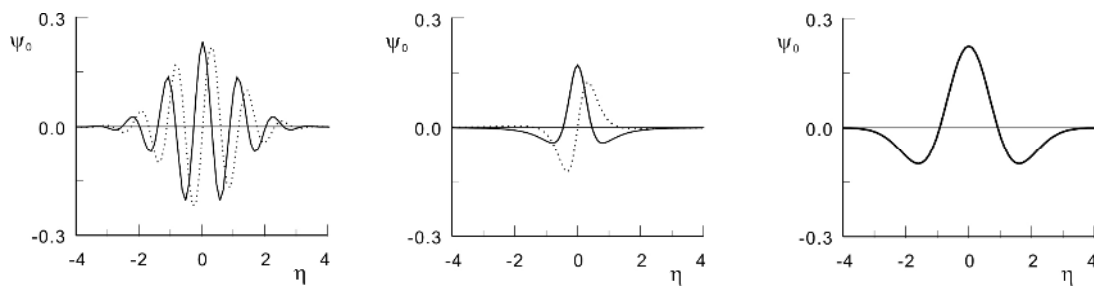


Figura 4.1 - *Wavelets*-mãe: (a) Morlet, (b) Paul e (c) Derivada Gaussiana- DOG.

Deslizando uma destas *wavelet* ao longo da série, uma nova série da amplitude de projeção contra o tempo pode ser construída. Finalmente, a escala da *wavelet* pode ser variada mudando-se sua largura. Além da amplitude de qualquer sinal periódico, vale a pena obter informação sobre sua fase. Neste trabalho foi utilizada a *wavelet* de Morlet (Figura 4.1a) pelo fato da mesma apresentar uma boa definição no espaço espectral, fornecendo uma maior precisão no valor da frequência, a qual é definida com um produto de uma onda exponencial complexa e um envelope Gaussiano:

$$\psi_o(\eta) = \pi^{-0,25} e^{i\omega_o\eta} e^{-0,5\eta^2} \quad (4.1)$$

onde  $\psi_o(\eta)$  é o valor da *wavelet* no tempo adimensional  $\eta$ , e  $\omega_o$  é a frequência adimensional, igual a 6, neste estudo, a fim de satisfazer à condição de admissibilidade.

## 4.2 Modelo Hidrossedimentológico Kinos2

O Kinos2 (Woolhiser et al.,1990) é um modelo hidrológico chuva-vazão-erosão do tipo cinemático, distribuído de base física, orientado a evento, que apresenta uma rede de planos e canais representando os cursos d'água na bacia (Figura 4.2). O modelo simula os processos de interceptação, infiltração, escoamento superficial e erosão de pequenas bacias rurais e urbanas. As equações diferenciais descrevem o escoamento, onde o transporte de sedimentos e a erosão nestes planos e canais são resolvidos pela técnica de diferenças finitas. As equações abaixo descrevem de maneira sucinta como o modelo Kinos2 é fundamentado no que se refere ao processo de escoamento superficial. As expressões que regem o processo de erosão na bacia não serão apresentadas, uma vez que tal processo não é do escopo deste trabalho. O modelo representa a bacia num esquema de uma cascata de planos e canais, descrevendo dessa forma as equações pertinentes a cada um desses elementos.

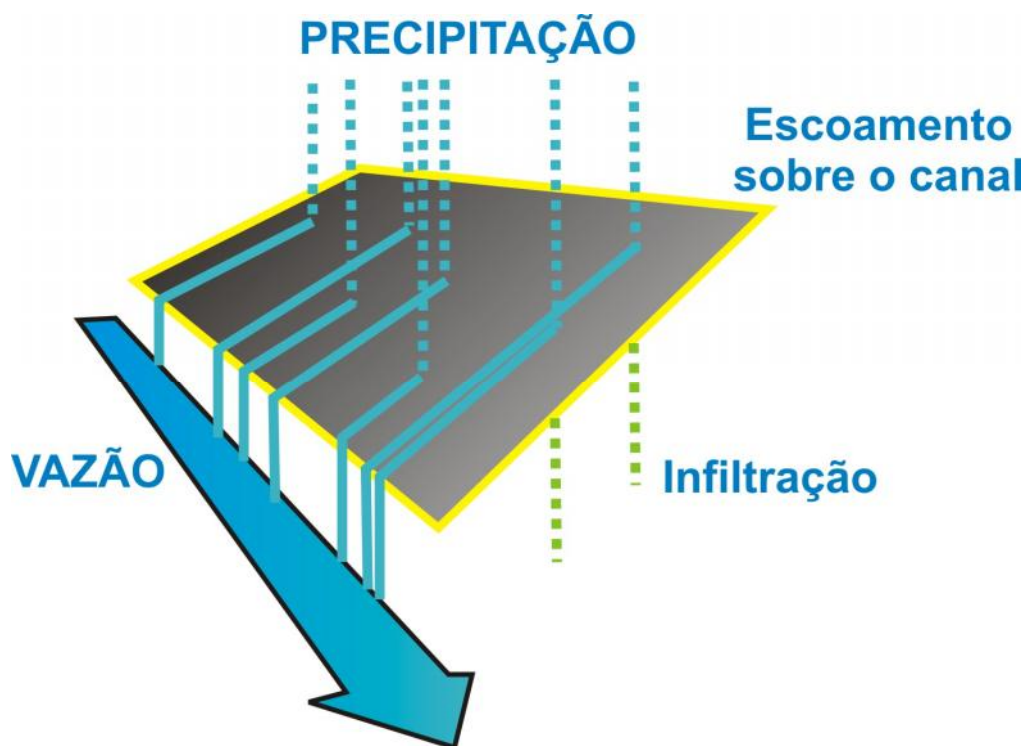


Figura 4.2 – Planos e canais que representam os cursos d'água da bacia.

#### 4.2.1 Modelo de infiltração do solo

A infiltração é o processo de penetração da água da superfície no solo. Muitos fatores influenciam a taxa de infiltração, incluindo a condição da superfície e sua cobertura vegetal, as propriedades do solo, tais como sua porosidade e condutividade hidráulica, e o conteúdo úmido corrente do solo. O modelo de infiltração usado pelo Kineros2 permite uma redistribuição de água no solo, incluindo a recuperação da capacidade de infiltração durante os intervalos entre as chuvas, determinando as taxas de infiltração durante e após esse intervalo de estiagem. A taxa de infiltração  $f_c$  é função da lâmina acumulada de infiltração  $I$  e de outros parâmetros básicos que descrevem as propriedades de infiltração no solo: condutividade hidráulica saturada efetiva  $K_s$  (m/s), valor efetivo do potencial de capilaridade  $G$  (m), porosidade do solo  $\phi$ , e o índice de distribuição dos tamanhos dos poros  $\alpha$ . Existe também um parâmetro opcional  $C_v$  que descreve a variação aleatória espacial da condutividade hidráulica saturada do solo, assim como um parâmetro que representa a porcentagem de rochas, **ROCK**. Existe também uma variável que depende do evento de precipitação, a saturação relativa inicial do solo  $S_i$  ( $m^3/m^3$ ). O cálculo da taxa de infiltração  $f_c$  (m/s) é feito pela seguinte equação de infiltração, segundo Smith et al. (1994):

$$f_c = K_s \left[ 1 + \frac{\alpha}{e^{\alpha I/B} - 1} \right] \quad (4.2)$$

sendo  $B = (G + h)(s_s - s_i)$ , combinando os efeitos do potencial efetivo de capilaridade,  $G$ , profundidade do fluxo,  $h$  (m), e da capacidade de armazenamento de água do solo,  $s_s = (s_s - s_i)$ , onde  $s_s$  é a umidade de saturação do solo ( $m^3/m^3$ ). O parâmetro  $\alpha$  representa o tipo de solo;  $\alpha$  se aproxima de zero para uma areia, e neste caso, a equação (4.2) aproxima-se à equação de Green-Ampt; e  $\alpha$  aproxima-se de 1 para um solo franco bem uniforme, neste caso a equação (4.2) representa a equação de infiltração de Smith-Parlange.

#### 4.2.2 Escoamento superficial no plano

A modelagem do escoamento superficial em bacias hidrográficas é baseada na resolução de equações diferenciais parciais que descrevem o fluxo e a profundidade do nível da água como funções do tempo e do espaço. Visto em uma escala muito pequena, o escoamento

superficial é um processo tridimensional extremamente complexo. Em uma escala maior, entretanto, pode ser visto como um processo unidimensional do fluxo, onde o fluxo é relacionado ao armazenamento por unidade de área por uma relação simples:

$$Q = \alpha h^m \quad (4.3)$$

sendo  $Q$  a vazão ( $\text{m}^3/\text{s}$ ),  $h$  é o armazenamento de água por unidade de área. Os parâmetros  $\alpha$  e  $m$  estão relacionados com a declividade, rugosidade da superfície e o regime do escoamento. O escoamento superficial é resultado da interação da precipitação com a bacia hidrográfica. A equação da continuidade é expressa da seguinte forma:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial t} = q(x, t) \quad (4.4)$$

sendo  $q$  a entrada lateral do escoamento ( $\text{m}^2/\text{s}$ ),  $x$  a coordenada espacial (m) e  $t$  a coordenada temporal (s). Para escoamento superficial, a equação (4.3) pode ser inserida na equação (4.4) para obter-se:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \alpha m h^{m-1} \frac{\partial h}{\partial x} = q(x, t) \quad (4.5)$$

As equações de ondas cinemáticas são simplificações das equações de Saint-Venant, e não preservam todas as propriedades das equações mais complexas, tais como o remanso e a atenuação da difusividade da onda.

#### 4.2.3 Escoamento superficial no canal

A equação da continuidade para um canal com entrada lateral de fluxo é:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q(x, t) \quad (4.6)$$

sendo  $A$  a área da seção transversal ( $\text{m}^2$ ),  $Q$  a vazão no canal ( $\text{m}^3/\text{s}$ ), e  $q(x, t)$  o fluxo lateral por unidade de comprimento do canal ( $\text{m}^2/\text{s}$ ). A relação entre a vazão no canal e a área de sua seção transversal é dada por:

$$Q = \alpha R^{m-1} A \quad (4.7)$$

sendo  $R$  é o raio hidráulico (m),  $\alpha = S^{1/2}/n$  e  $m = 5/3$ , onde  $S$  é a declividade e  $n$  é o coeficiente de rugosidade de Manning. As equações de fluxo para os canais são resolvidas por uma técnica implícita definida em quatro pontos similares àquela apresentada para o escoamento superficial no plano.

#### 4.2.4 Dados de entrada do modelo Kineros2

##### 4.2.4.1 Dados de entrada

O arquivo de entrada para o modelo Kineros2 está relacionado com os dados de precipitação e os dados dos parâmetros para cada elemento discretizado da bacia. O arquivo de precipitação é formado pelos seguintes dados e seu modelo pode ser visto no Quadro A.1 do Apêndice A:

1. Intensidade da precipitação  $I$  (mm/h) ou altura de chuva  $Depth$  (mm);
2. Tempo de precipitação  $Time$  (minutos);
3. Número de eventos de chuva  $N$ .

##### 4.2.4.2 Parâmetros de entrada do modelo

Os parâmetros do modelo Kineros2 dividem-se em dois grupos: o primeiro grupo é formado pelos parâmetros globais associados às características físicas da bacia sendo homogêneos para toda a bacia; o segundo representa os parâmetros dos planos e canais como será visto em seguida.

###### 4.2.4.2.1 Parâmetros globais

Os parâmetros globais estão descritos abaixo e os dados de entrada e o formato do arquivo para a simulação da bacia em estudo podem ser visto no Quadro A. 2 do Apêndice A:

- *Units*: sistema de unidades utilizadas para todos os parâmetros (métrico ou inglês);
- *Clen*: comprimento característico, cujo valor é dado pelo comprimento do maior canal ou da maior cascata de planos;

- *Temperature*: temperatura em graus Celsius (°C) ou Fahrenheit (°F);
- *Diameters*: diâmetros representativos das partículas do solo, em milímetros ou polegadas, onde o limite máximo é de cinco classes;
- *Densities*: valores das massas específicas dos diâmetros das classes acima determinadas.

#### 4.2.4.2.2 Parâmetros dos planos

Os parâmetros de entrada dos planos estão descritos abaixo e os valores utilizados para cada elemento discretizado da bacia podem ser visto no Quadro A.3 do Apêndice A.

- *Identifier*: número de identificação do plano;
- *Upstream*: número de identificação do plano a montante (se houver);
- *Length*: comprimento, em metros ou pés;
- *Width*: largura, em metros ou pés;
- *Slope*: declividade do plano;
- *Manning*: coeficiente de rugosidade de *Manning*;
- *Chezy*: coeficiente de *Chézy*;
- *Relief*: altura média do relevo da microtopografia, em milímetros ou polegadas;
- *Spacing*: distância média do relevo da microtopografia, em metros ou pés;
- *Interception*: interceptação vegetal, em milímetros ou polegadas;
- *Canopy cover*: fração da superfície ocupada por vegetação;
- *Saturation*: saturação inicial relativa do solo, razão entre a umidade inicial e a porosidade do solo;
- $C_v$ : coeficiente de variação da condutividade hidráulica saturada efetiva;
- $K_s$ : condutividade hidráulica saturada efetiva, medida em mm/h ou polegadas/h;
- $G$ : valor efetivo do potencial de capilaridade do solo, em mm ou polegadas;
- *Distribution*: índice de distribuição do tamanho dos poros;
- *Porosity*: porosidade do solo;
- *Rock*: fração volumétrica de rochas;
- *Splash*: parâmetro relacionado à erosão causada pelo impacto das gotas de chuva no solo;
- *Cohesion*: coeficiente de coesão do solo;
- *Fractions*: fração de cada classe de diâmetros representativos do solo.



#### 4.2.4.2.3 Parâmetros dos canais

Os parâmetros de entrada dos canais estão descritos abaixo e os valores utilizados para cada elemento discretizado da bacia podem ser visto no Quadro A.3 do Apêndice A:

- *Upstream*: número de identificação do elemento (plano ou canal) à montante;
- *Lateral*: número de identificação dos planos que contribuem lateralmente para o canal;
- *Length*: comprimento, em metros ou pés;
- *Width*: largura, em metros ou pés;
- *Slope*: declividade do canal;
- *Manning*: coeficiente de rugosidade de *Manning*;
- *Chezy*: coeficiente de *Chézy*;
- *SS1, SS2*: declividades laterais do canal;
- *Saturation*: saturação inicial relativa do solo, razão entre a umidade inicial e a porosidade do solo;
- $C_v$ : coeficiente de variação da condutividade hidráulica saturada efetiva;
- $K_s$ : condutividade hidráulica saturada efetiva, medida em mm/h ou polegadas/h;
- $G$ : valor efetivo do potencial de capilaridade do solo, em mm ou polegadas;
- *Distribution*: índice de distribuição do tamanho dos poros;
- *Porosity*: porosidade do solo;
- *Rock*: fração volumétrica de rocha;
- *Cohesion*: coeficiente de coesão do solo;
- *Fractions*: fração de cada classe de diâmetros representativos do solo.

## 5 ESTUDO DE CASO: MUNICÍPIO DE ALAGOA GRANDE/PB

### 5.1 Localização e generalidades

O município de Alagoa Grande está localizado na microrregião do Brejo Paraibano, distando 110 km da capital João Pessoa, inserido na bacia hidrográfica do rio Mamanguape nas coordenadas 07°09'30" S e 35°37'48" W latitude e longitude, respectivamente, e a 143 metros do nível do mar. Possui uma área de 332,6 km<sup>2</sup>, sendo que 285,3 km<sup>2</sup> inseridos na bacia, o que representa 85,8% da área dentro da bacia (Figura 5.1). Sua população é de 29.169 habitantes, onde 16.847 residem na área urbana (58%) e 12.322 na área rural (42%), de acordo com o censo de 2000 do IBGE. A Figura 5.1 a mostra os dados pluviométricos observados no posto de Alagoa Grande no período de 1963 a 1989, estes dados históricos de chuva mostram uma variação de 700 mm a 1.600 mm por ano na região, sendo o mês de maio o mais chuvoso e o de outubro o mais seco.

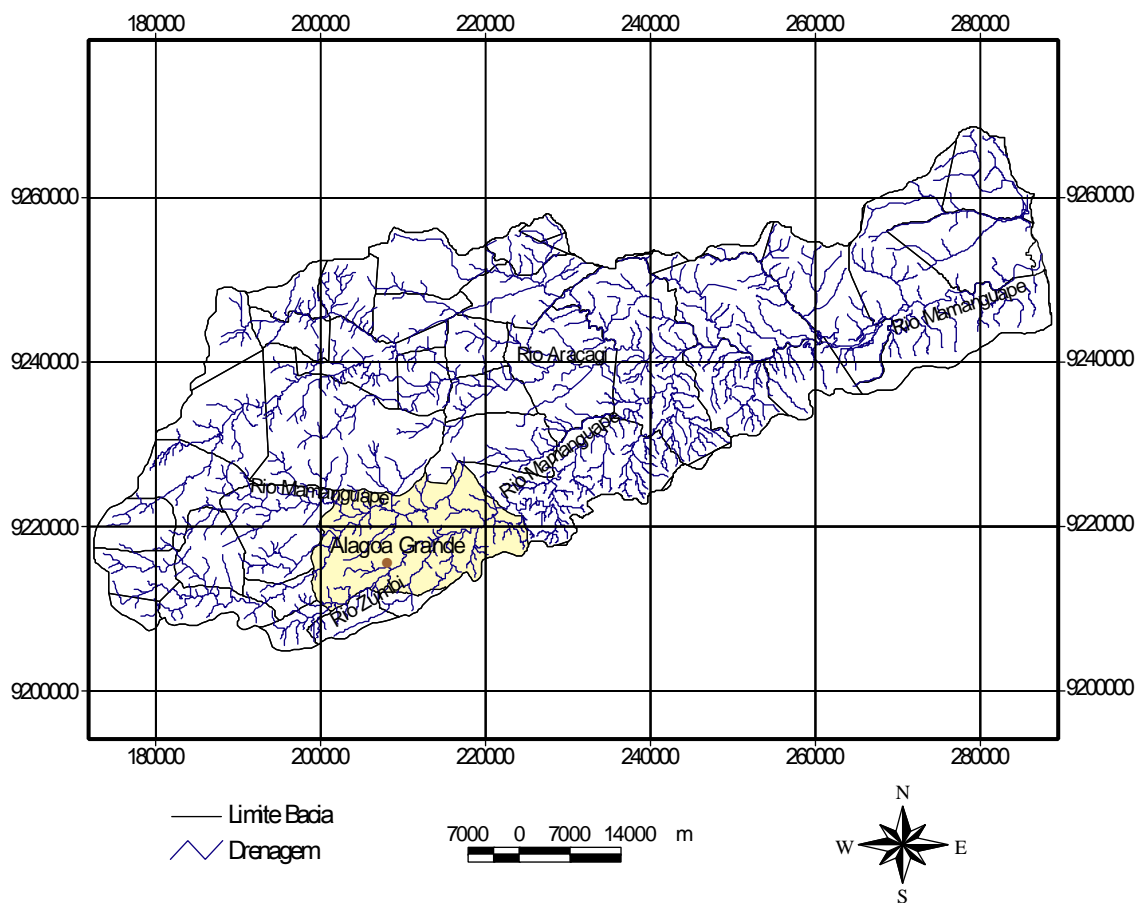


Figura 5.1 – Localização do município de Alagoa Grande.

O município de Alagoa Grande tem apresentado, ao longo dos últimos anos, problemas com enchentes. Como está localizada às margens do rio Mamanguape, a cidade sofre com as inundações, principalmente na sua zona mais baixa, onde está localizada grande parte da população urbana, causando sérios prejuízos materiais e, em alguns casos, perdas humanas. O último evento relevante ocorreu no início de 2004, relacionados com os eventos chuvosos de janeiro/fevereiro. Em junho do mesmo ano, ocorreu o rompimento da barragem Camará, causando prejuízos ainda maiores. O rompimento da barragem elevou o nível do rio Mamanguape em mais de cinco metros, inundando tanto Alagoa Nova como Alagoa Grande. Neste, em alguns pontos, a água atingiu quase dois metros de altura dentro das casas. A ponte que ligava a cidade aos municípios de Areia e Alagoa Nova foi destruída e levada pelas águas. Mulungu e Alagoa Grande, que têm ao todo cerca de 45 mil moradores, ficaram sem água, luz e telefone. O total de desabrigados foi calculado em aproximadamente 1.600 pessoas.

## **5.2 Análise da frequência de precipitação através da Transformada *Wavelet***

Para a análise através da transformada *wavelet* foi utilizado o programa desenvolvido por Torrence & Compo (1998), usando os dados do total de precipitação mensal do posto pluviométrico de Alagoa Grande para o período correspondente de 01/1963 a 12/1989 (Figura 5.2a), dados estes obtidos da Agência Nacional de Águas - ANA. Para a análise dos resultados são apresentados quatro gráficos distintos, como mostra a Figura 5.2.

O espectro de potência da *wavelet* (Figura 5.2b) representa o valor absoluto ao quadrado da Transformada *Wavelet* para a chuva em Alagoa Grande/PB. Este valor dá a informação da potência relativa numa determinada escala e num certo tempo, mostra as oscilações reais das *wavelets* individuais, isto é, apresenta para cada período a magnitude da respectiva *wavelet*. Pode-se observar que as maiores concentrações da potência estão na faixa de 8–16 meses o que mostra a frequência anual da série estudada, e as épocas em que a ocorrência desta frequência anual é maior podem ser bem identificadas, as quais são 1964–1966, 1968–1971, 1973–1974 e 1984–1988, sendo de suma importância salientar que o último período apresenta uma região situada fora do “cone de influência”, que é a região definida pela linha amarela (Figura 5.2b), onde os efeitos de borda devem ser levados em consideração, uma vez que a série de precipitação é finita e foi preenchida com zeros até ficar com o tamanho da potência de dois subseqüentes, neste caso o valor de 256, o que ocasiona erros no início e no fim do seu espectro de potência.

Nesta figura, os contornos brancos são os níveis de significância de 5%, usando o espectro de fundo de ruído vermelho. O ruído vermelho é o processo auto-regressivo univariado de ordem um ( $\alpha_1$ ). A variável  $\alpha_1$  é a correlação entre a série e ela mesma, mas deslocada de uma unidade de tempo, neste caso, um mês. Os valores de  $\alpha_1$  maiores que 0,40 são considerados altos e, assim o efeito do ruído vermelho deve ser levado em conta na modulação, senão seria levado em conta o ruído branco ( $\alpha = 0,00$ ). Ao levar em conta o ruído vermelho, a autocorrelação verdadeira pode ser calculada por  $\alpha = (\alpha_1 + \alpha_2^{1/2})/2$ , em que  $\alpha_2$  é o mesmo que  $\alpha_1$  sendo que deslocado de dois meses. Os valores de  $\alpha_1$  e  $\alpha_2$  encontrados foram de 0,3767 e 0,1842, respectivamente, assim o valor verdadeiro foi assumido como sendo  $\alpha = 0,4029$ . Se um pico no espectro de potência da *wavelet* estiver acima deste espectro de fundo, então, deve-se considerá-lo como uma característica verdadeira com 95% de confiança, ou seja, significância ao nível de 5%. Esta confiança de 95% implica que 5% da potência da *wavelet* deve estar acima deste nível, mais detalhes em Santos et al. (2001).

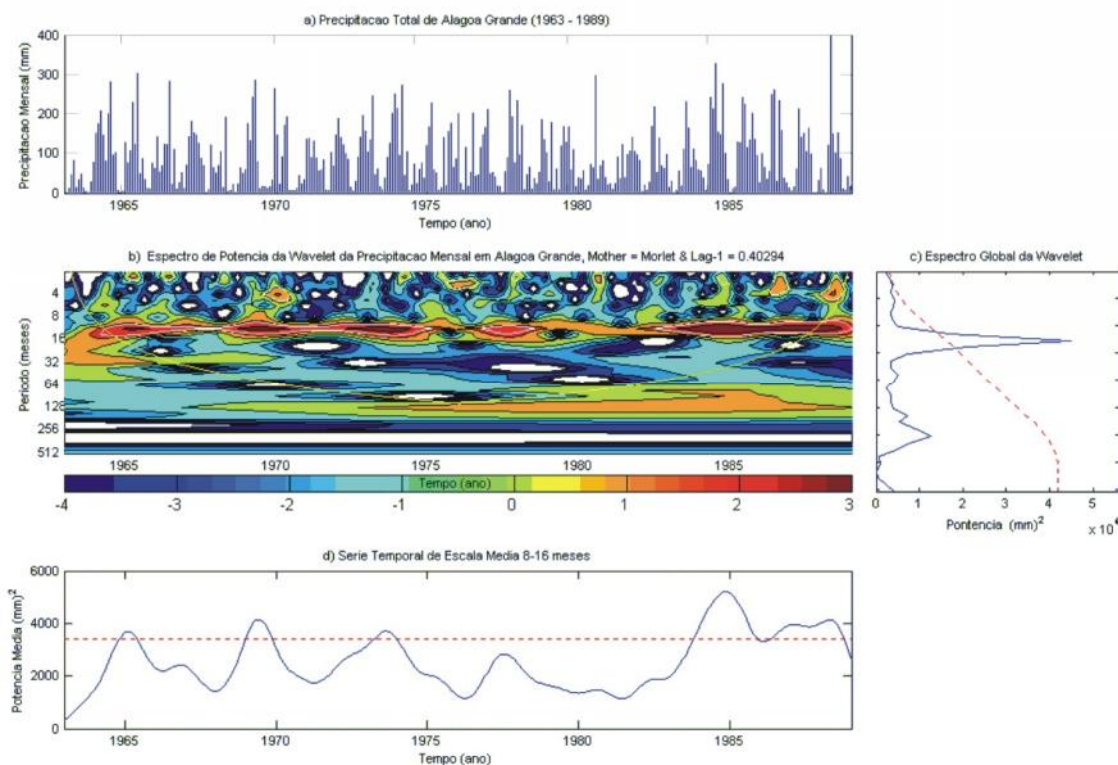


Figura 5.2- (a) Precipitação mensal total Alagoa Grande no período de 1963-1989. (b) Espectro wavelet de potência normalizado usando a wavelet de Morlet. (c) Espectro global de potência da wavelet. (d) Série temporal da escala-média da faixa de 8–16 meses. As linhas tracejadas em (c) e (d) são a significância para o espectro global da wavelet, assumindo o mesmo nível de significância e espectro de fundo como em (b).

A Figura 5.2c representa o espectro global da *wavelet* que fornece uma estimativa não tendenciosa e consistente do espectro de potência verdadeiro da série, mostrando quais os sinais de frequência presentes no sinal bruto. Os espectros globais podem ser usados para resumir uma variabilidade temporal da região e compará-los com o regime pluviométrico de outras regiões podendo, assim, caracterizar a variabilidade da série. Nesta figura, pode-se observar que o sinal bruto de precipitação em Alagoa Grande apresenta apenas um pico significativo acima do nível de confiança de 95%, o qual corresponde à frequência anual (12 meses). Outra frequência que chega quase a superar o nível de confiança de 95% é uma frequência mais baixa de 3 meses, a qual pode estar relacionada à duração da época chuvosa na região.

A *wavelet* de potência de escala-média (Figura 5.2d) é uma série temporal da variação média na faixa entre 8 e 16 meses; ela é usada para examinar a modulação destas frequências dentro da série. Esta figura é obtida a partir da média da Figura 5.2b de todas as escalas entre 8–16 meses, que fornece a medida da variação média do ano contra o tempo. Nesta figura, confirma-se o observado no espectro da *wavelet*, ou seja, verificam-se as variações ocorridas na faixa de 8–16 meses. As reduções importantes da potência nesta faixa representam os períodos secos e os picos que ultrapassam o limite definido pela linha de significância representam os períodos chuvosos e, assim, as épocas chuvosas podem ser facilmente identificadas, confirmando que se tratam dos períodos 1964–1966, 1968–1971, 1973–1974 e 1984–1988. O período que corresponde ao intervalo de 1975–1983 representa, de acordo com o teste de significância de 5%, o período seco mais longo.

A análise estatística através da Transformada *Wavelet* para a série histórica de precipitação, possibilita identificar os períodos secos e chuvosos da região. Alguns dos períodos considerados chuvosos foram confirmados, através de visita no município de Alagoa Grande, entre eles alguns que causaram prejuízos em virtude das inundações geradas. Esta análise é importante, uma vez que o conhecimento dessas informações pode auxiliar no processo de tomada de decisão, desde que o plano para o gerenciamento dessas áreas de risco de inundações seja bem elaborado e executado.

### **5.3 Chuvas de janeiro e fevereiro/2004**

No início de 2004, fortes chuvas causaram inúmeros transtornos à população dos municípios localizados na bacia do rio Mamanguape, gerando os primeiros desabrigados e desalojados nos municípios de Mulungu e Gurinhém num total de 230 famílias. Em 23 de

janeiro do mesmo ano, com a continuidade das chuvas, a Defesa Civil entrou em alerta máximo. No início de fevereiro, como o solo já se apresentava saturado e os açudes cheios, foram registradas as primeiras inundações em várias cidades paraibanas, principalmente naqueles municípios cortados ou margeados pelos rios principais, como os rios Paraíba, Mamanguape, Piancó, ou por seus afluentes. No período de um mês (12/01/04 a 12/02/04), o número de desabrigados foi de 4.636 nos municípios que margeiam o rio principal (Mamanguape) com 13 registros de vítimas fatais (AAGISA, 2004).

Analisando o comportamento histórico das chuvas ocorridas no município de Alagoa Grande, observa-se que a média pluviométrica mensal para o período de janeiro e fevereiro é em torno de 100 mm. Nota-se, portanto, que o evento ocorrido no ano de 2004 foi atípico já que apresentou um acréscimo médio de chuva de quatro vezes, atingindo no mês de janeiro 494,9 mm e no mês de fevereiro 377,3 mm, segundo informações do LMRS – Laboratório de Meteorologia, Recursos Hídricos e Sensoriamento Remoto da Paraíba. A Figura 5.3 apresenta uma comparação entre a precipitação média mensal, de 1963 a 1989, e o evento chuvoso do ano de 2004 para o posto pluviométrico de Alagoa Grande.

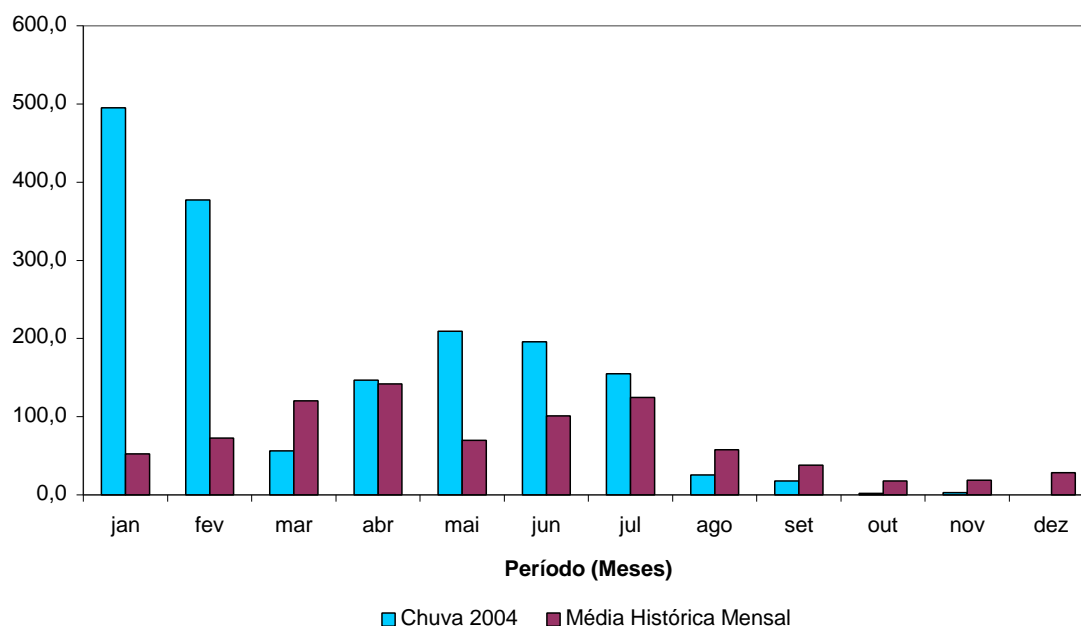


Figura 5.3 – Comparação da precipitação média mensal histórica (1963 a 1989) com a precipitação do ano de 2004.

O Governo do Estado, através da SEMARH – Secretaria do Meio Ambiente, Recursos Hídricos e Minerais e AAGISA – Agência de Águas, Irrigação e Saneamento do Estado, realizou visitas técnicas no período de 6 a 12/02/04 nos municípios da bacia do rio

Mamanguape e fez um levantamento dos prejuízos ocorridos em cada município. A Figura 5.4 apresenta uma seqüência de fotos, tiradas durante as visitas técnicas, de pontos estratégicos da cidade de Alagoa Grande.

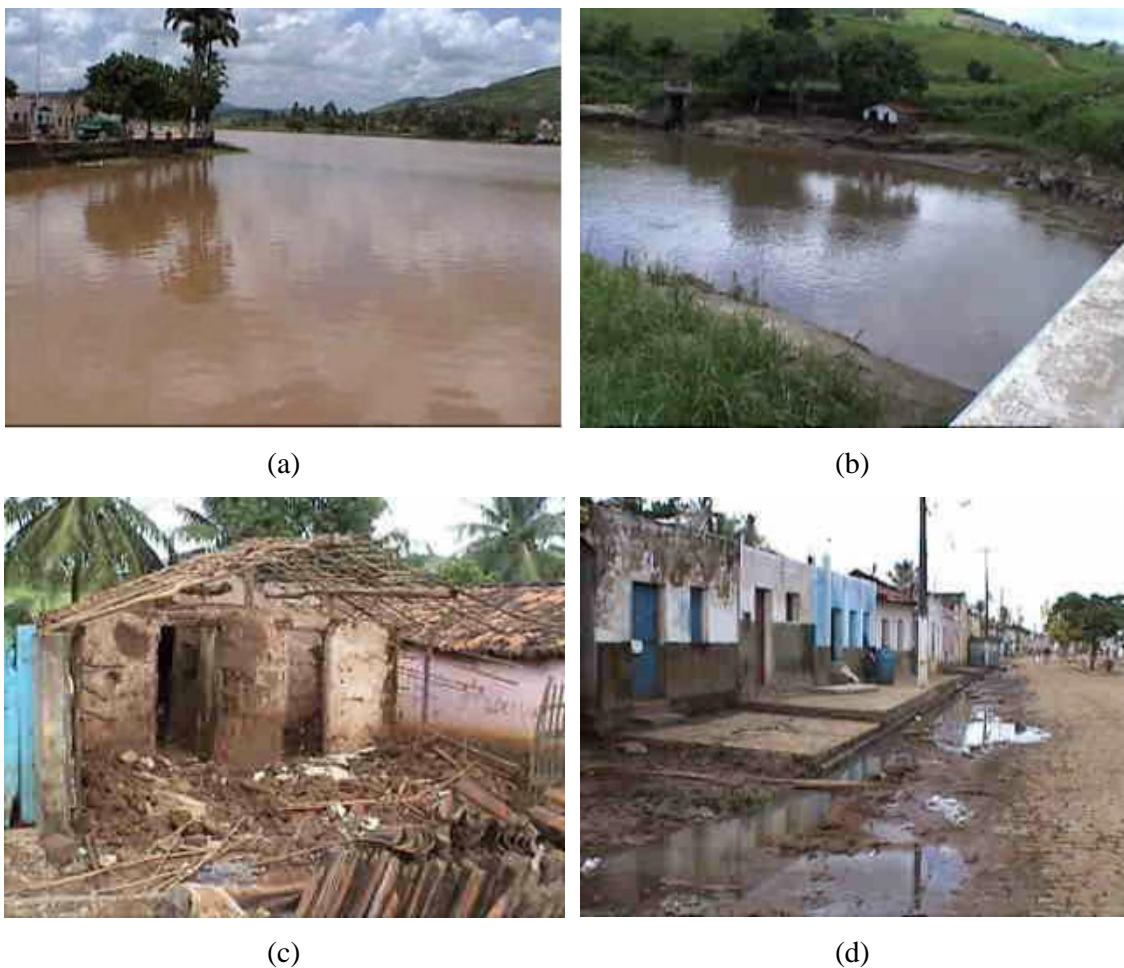


Figura 5.4 – Fotos da área urbana do município de Alagoa Grande em janeiro/fevereiro de 2004. (a) Lagoa no centro do município. (b) Ponte sobre o rio Mamanguape – Jusante. (c) Casa destruída pelas chuvas – Canafístula. (d) Rua que ficou completamente alagada (FONTE: AAGISA, 2004).

A seguir serão apresentados alguns dos danos gerados pela chuva neste período no município de Alagoa Grande e as principais ações realizadas pelos Governos Municipal e Estadual:

1. Rios que transbordaram: Rio Mamanguape, Rio Zumbi, Açude Lagoa;
2. População desabrigada: 460 pessoas e uma vítima fatal;

3. Prejuízos decorrentes das inundações: Destruição de casas, pontes, ruas, calçamento, paralisação do sistema de abastecimento d'água por dois dias;
4. Ações do Governo Estadual: Defesa civil, Corpo de Bombeiros (botes), distribuição de cestas básicas, cobertores, colchões;
5. Ações do Governo Municipal: Relatório de danos e desabrigados e distribuição de medicamentos, atendimento médico, socorro imediato, transporte de pessoas e de mobília das casas, alojamento para os desabrigados.

#### **5.4 Rompimento da Barragem Camará**

A barragem Camará, localizada no município de Alagoa Nova no Brejo paraibano a 145 km de João Pessoa - PB (Figura 5.5), teve sua construção iniciada no ano de 2000 e concluída em dois anos. Possuía uma capacidade de acumulação de 26.581.614 m<sup>3</sup> com área da bacia de hidrográfica de 229,18 km<sup>2</sup>. A construção, de acordo com seu projeto original, iria atender ao abastecimento d'água dos municípios de Alagoa Nova, Alagoa Grande, Areia, Remígio e mais sete cidades, beneficiando uma população de cerca de 220 mil habitantes.

O rompimento da barragem Camará, ocorrido no mês de junho de 2004 é um exemplo recente de enchente repentina ou *flash flood*, de acordo com as características deste fenômeno descrito no item 3.3 do Capítulo 3.

Este evento ocorreu após o rompimento de parte da estrutura da barragem (Figura 5.6) quando a mesma apresentava um volume de 17.000.000 m<sup>3</sup> o que representava 65% de sua capacidade máxima. Todo o trecho do rio a jusante da barragem foi drasticamente destruído e, em pouco tempo, o volume de água atingiu o município de Alagoa Grande e áreas adjacentes deixando mais de 1.300 desabrigados e matando cinco pessoas.

Diversos prejuízos foram registrados devido ao rompimento da barragem, desde impactos no meio rural como no meio urbano. O leito do rio Mamanguape foi modificado devido à erosão e assoreamento dos córregos ribeirinhos (Figura 5.6c e 5.6d). No meio urbano, diversos prejuízos foram observados:

1. Destruição das edificações (residenciais, comerciais, industriais, etc.): impactos econômico e psicológico;
2. Destruição da infra-estrutura pública (pavimentação, galerias pluviais, esgotos, muros de contenção, pontes, escolas, postos de saúde, etc.).



O número de desabrigados foi de 1.342 pessoas, de acordo com o levantamento feito pela prefeitura local. O gasto com a recuperação apenas da infra-estrutura do município (pavimentação, muros de contenção e de contorno, praças, calçadões e reabertura do canal extravasor) foi estimado em R\$ 860.000,00. Para recuperação de unidades escolares estima-se que serão necessários cerca de R\$ 80.000,00. (Secretaria de Infra-estrutura e Desenvolvimento Urbano de Alagoa Grande, 2004).

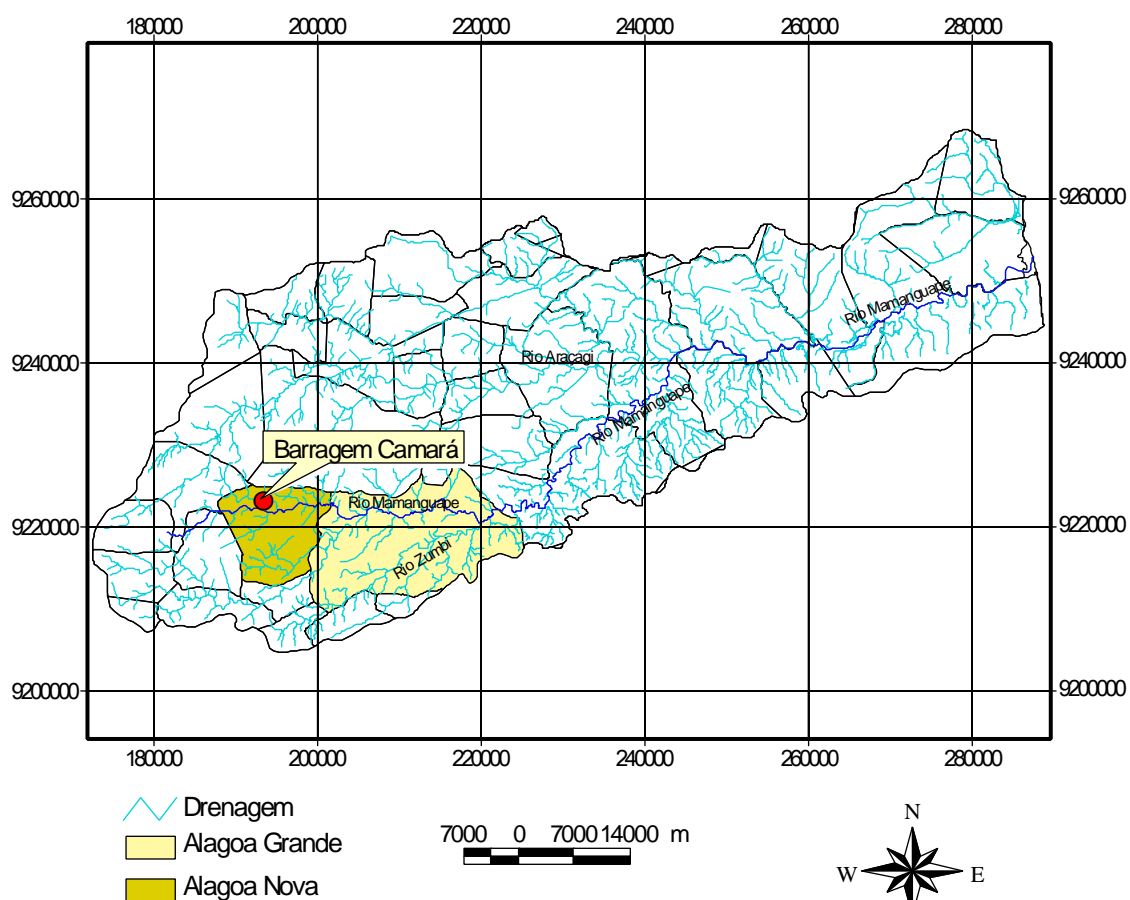


Figura 5.5 – Localização da barragem Camará.



Figura 5.6 - (a) Vista a jusante da parte da barragem rompida. (b) Vista da parede rompida pela força da água. (c) Foto a jusante da barragem. (d) Trecho destruído em virtude da força da água levando vegetação e rochas (junho de 2004).

## 5.5 Sub-bacia de Mulungu

O município de Mulungu está localizado a 17 km a jusante do município de Alagoa Grande nas coordenadas  $-07^{\circ}01'46''$  e  $35^{\circ}28'05''$  latitude e longitude, respectivamente. O trecho do rio Mamanguape que corta o município supracitado é monitorado pela ANA – Agência Nacional de Águas através de um posto pluviométrico e outro fluviométrico. A existência dessas séries hidrológicas neste ponto da bacia do rio Mamanguape, contribuiu para a escolha da sub-bacia de Mulungu (Figura 5.7) para ser estudada.

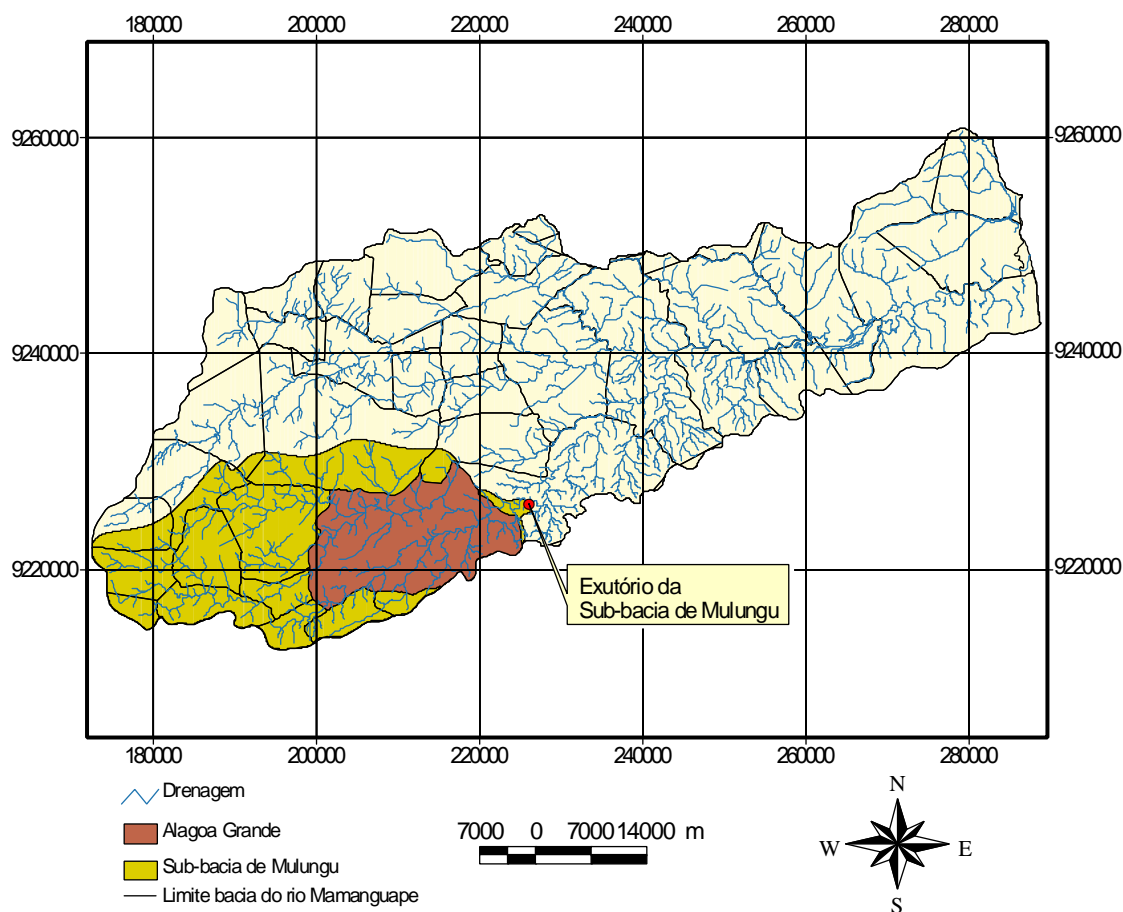


Figura 5.7 – Localização da Sub-Bacia de Mulungu.

Como publicado em Santos e Barbosa (2005), verificou-se que para um tempo de recorrência de apenas dois anos, a vazão máxima mensal da sub-bacia Mulungu pode ser igual a  $641,00 \text{ m}^3/\text{s}$ , dependendo da metodologia adotada, o que representa um valor quatro vezes maior do que a vazão média mensal do período de 1973 a 2002 que foi igual a  $148,10 \text{ m}^3/\text{s}$ .

O estudo para a análise dos hidrogramas de cheia na sub-bacia do rio Mulungu foi, então, realizado a partir dos dados diários de precipitação e vazão do posto de Mulungu para dois eventos: o que representa um ano característico na região, isto é, com chuvas distribuídas apresentando índices pluviométricos dentro da normalidade; e outro com valores diários de chuva acima do normal, como apresentados no Capítulo 6.

## **6 RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Neste capítulo será apresentado o processo de elaboração do mapa de inundação para a região e sua importância no controle do zoneamento considerando o grau de risco de inundação, tendo em vista a ocupação atual e futura. O item 6.2 mostra a construção de cenários a partir da análise dos hidrogramas em diferentes pontos da sub-bacia de Mulungu considerando dois períodos: um período característico da região com precipitações dentro da normalidade (janeiro/1995 a dezembro/1995) e um período com precipitação acima do normal, este último ocorrido no período de janeiro/2004 a dezembro/2004. No ano de 2004, nos três primeiros meses choveu o equivalente a quatro vezes o volume de água esperado na região. Os dois eventos foram simulados considerando a situação atual e após intervenção através da implantação de um reservatório para o amortecimento de ondas de cheia.

### **6.1 Elaboração do mapa de inundação**

A regulamentação do uso do solo ou zoneamento de áreas de risco de inundação é essencial para garantir condições seguras de ocupação por parte da população. As áreas mais susceptíveis à inundação devem ser criteriosamente determinadas evitando a ocupação podendo, neste caso, ser utilizada para recreação, parques ou estacionamento. Como descrito no Capítulo 3, a construção do mapa de risco de inundação possibilita informações valiosas para o planejamento e ações na redução dos impactos provocados pelas cheias.

Durante o evento chuvoso ocorrido no início de 2004, descrito no item 5.3 do Capítulo 5, foi possível observar os pontos mais vulneráveis do município considerando sua cota e seu grau de ocupação. O levantamento das informações serviu de banco de dados para a elaboração do mapa de inundação, o que possibilitou maior precisão, tendo em vista as dificuldades encontradas devido à carência de informações. Alguns erros encontrados durante a elaboração do mapa foram minimizados com visitas no local e levantamentos de pontos característicos.

O Governo do Estado da Paraíba, através da AAGISA – Agência de Águas, Irrigação e Saneamento do Estado, realizou visitas na bacia do rio Mamanguape para levantamento dos pontos atingidos considerando suas coordenadas, altitude, data e hora da visita, descrição do local e observações coletadas. A Tabela 6.1 mostra os pontos atingidos no município de Alagoa Grande e suas respectivas coordenadas e altitudes.

Para a concepção do mapa de inundação foram considerados alguns critérios que serão descritos abaixo:

1. Delimitação da área: Para escolha da área foram levadas em consideração as características topográficas da região, bem como a área atingida pelas chuvas de janeiro de 2004 que provocaram inundações em alguns pontos da parte mais urbanizada da cidade de Alagoa Grande.
2. Elaboração do Mapa Topográfico: Através dos pontos cotados das cartas topográficas e a inserção dos pontos levantados no início de 2004, foram geradas as curvas de nível no formato desejável, neste caso, espaçamentos de 5m e 5m (Figura 6.1). De posse deste mapa topográfico, alguns erros foram prontamente corrigidos e minimizados através de visita no local e verificação de pontos característicos do levantamento.
3. Geração do Mapa de Inundação: A partir do mapa topográfico foi definido o grau de risco de inundação em função, principalmente, da ocupação atual associada à topografia e a marcas de enchentes, podendo prognosticar as áreas sujeitas a inundações no caso de ocupação futura. O mapa de inundação apresentado na Figura 6.2 mostra as áreas inundáveis de acordo com o grau de risco de inundação decorrente do processo de ocupação desordenado. As áreas definidas como de alto, médio, baixo risco e sem risco foram determinadas a partir do mapa topográfico gerado e de informações locais dos pontos mais vulneráveis da região. A cota 130 m corresponde ao ponto onde o rio se encontra cheio atingindo seu leito maior, ou seja, a partir desta cota o rio passa a transbordar gerando inundação e, em situações críticas, atinge a cota de 136 m, como ocorrido nas chuvas de janeiro e fevereiro de 2004. Observa-se que a faixa vermelha, que representa alto risco, é a mais próxima do rio e é a que apresenta a maior densidade populacional.

Tabela 6.1 – Pontos visitados no município de Alagoa Grande

Ponto	Longitude	Latitude	Altitude	Data Hora	Local	Observação
43	-35,6305	-7,0389		09-02-04 10:55	Lagoa perto da prefeitura	
44	-35,6272	-7,0352	137,8	09-02-04 10:59	Grupo escolar	Alojamento 11 famílias Canafístula
45	-35,5629	-6,9891	150,3	09-02-04 11:13	–	–
46	-35,5623	-6,9888	150,1	09-02-04 11:19	–	Casa caída na rua João Galdino
47	-35,5607	-6,9894	133,3	09-02-04 11:24		Pontes alagadas
48	-35,5614	-6,9901	150,3	09-02-04 11:29	Rua Marechal Joaquim de Carvalho	Pontes alagadas
49	-35,5595	-6,9907	143,6	09-02-04 11:34		Área alagada
50	-35,5588	-6,9904	132,5	09-02-04 11:37	Na tv Rodrigues de Carvalho (canal aberto)	–
51	-35,5590	-6,9900	131,1	09-02-04 11:40	Fírmino Amorim ate a ponte de iluminação foi alagada	–
52	-35,5586	-6,9897	144,8	09-02-04 11:43	Rua Antonio Rodrigues de Carvalho	–
53	-35,5589	-6,9926	124,1	09-02-04 11:48	Rua Teleforo Onofre	–
54	-35,5589	-6,9926	128,0	09-02-04 11:48	–	Pontilhão caído próximo a creche
55	-35,5573	-6,9924	135,4	09-02-04 11:54	Rua do Cruxim	–
56	-35,6305	-7,0431	147,7	09-02-04 12:28	Rua Padre Belize	–
57	-35,6379	-7,1020	142,6	09-02-04 12:47	–	–
58	-35,6379	-7,1021	142,6	09-02-04 12:47	Rua Coronel Joaquim Carlos (zumbi)	–
59	-35,6364	-7,0996	153,9	09-02-04 12:51	Rua da Palmeira	–
60	-35,6391	-7,0987	149,9	09-02-04 12:56	–	Ponte destruída 22 metros rio zumbi
61	-35,6409	-7,1041	159,0	09-02-04 13:06	Riacho afluente do rio Zumbi	–
62	-35,6349	-7,1001	173,6	09-02-04 13:13	Zumbi	–
63	-35,6358	-7,0999	168,4	09-02-04 13:16	Travessa São Jose	–
64	-35,6356	-7,0992	161,9	09-02-04 13:18	Travessa São Jose	Casa destruída
65	-35,6274	-7,0484	131,8	09-02-04 13:38	CEAP I	Casas alagadas
66	-35,6240	-7,0404	135,9	09-02-04 13:45	Vera Cruz	–
67	-35,6224	-7,0408	134,5	09-02-04 13:50	Rio com a Lagoa da Engenhoca	–
68	-35,6222	-7,0387	138,6	09-02-04 13:53	Rua Nova	–
69	-35,6199	-7,0390	134,7	09-02-04 13:59	Jusante da ponte sobre o rio mamanguape	–
70	-35,6253	-7,0382	137,4	09-02-04 14:03	–	–
71	-35,6345	-7,0415	135,0	09-02-04 14:49	Canal	–
72	-35,6495	-7,0549	152,0	09-02-04 14:59	Vila São José	–
73	-35,6529	-7,0577	154,0	09-02-04 15:21	Ponte do arco-via areia sobre o rio Mamanguape	–
74	-35,6367	-7,0314	138,3	09-02-04 15:30	–	–
76	-35,6374	-7,0336	135,0	09-02-04 15:33	–	Casa que desabou 2 pessoas soterradas porém salvas

Fonte: (AAGISA, 2004)

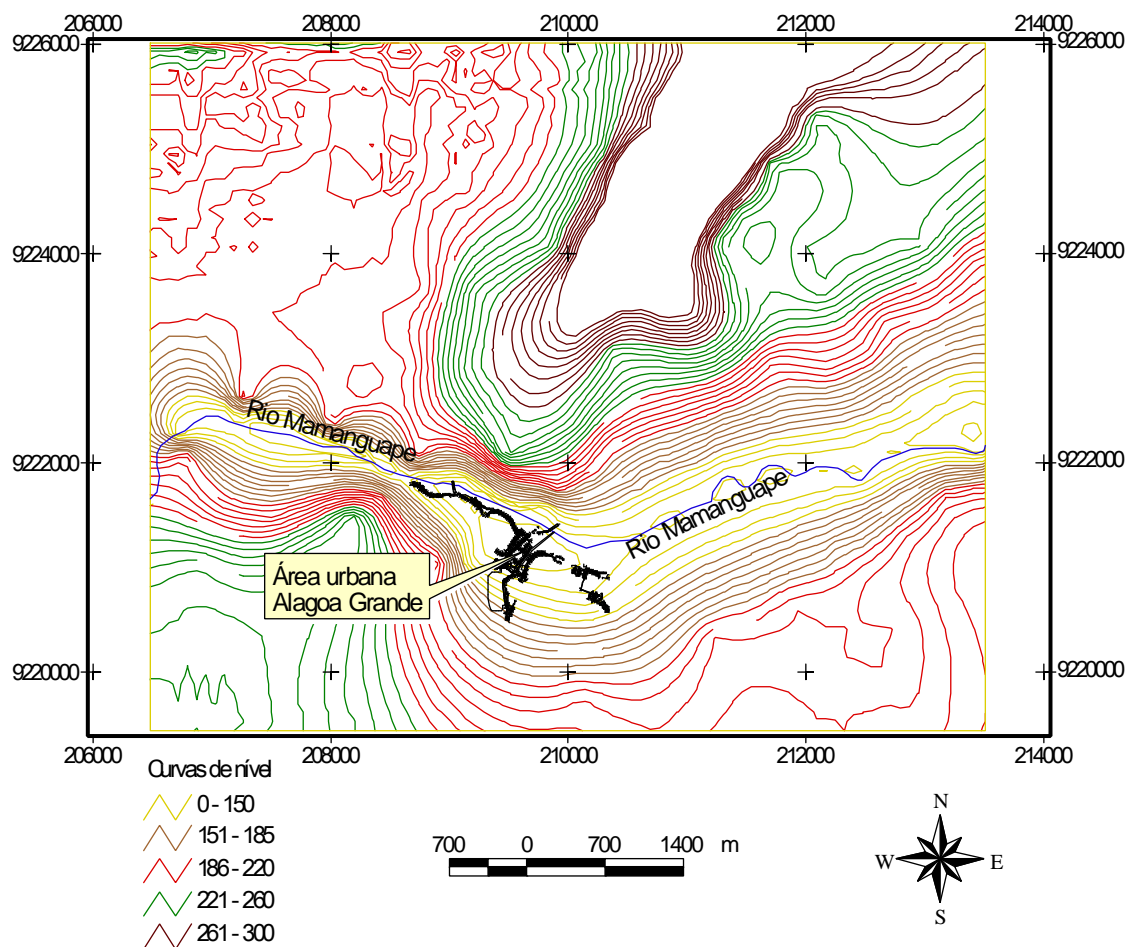


Figura 6.1 – Altimetria do município de Alagoa Grande.

É importante ressaltar que, para a elaboração do mapa de inundação, além da topografia, outras informações são imprescindíveis para a precisão que se deseja alcançar: níveis de enchentes registrados ao longo da história, levantamento batimétrico de seções do rio, além do seu monitoramento em vários pontos ao longo do curso d'água. Para estudos futuros, a partir destas informações, pode-se associar este mapa a uma ferramenta de geoprocessamento, como suporte a decisão no que diz respeito ao controle de enchentes, de modo a agrupar um grande número de informações, como: áreas impermeáveis, arruamento, vegetação, entre outros.

A Figura 6.2 apresenta as áreas de inundação em função da cota obtida a partir do mapa topográfico gerado. Tais áreas de inundação foram determinadas a partir do mapa de inundação representando a área de risco em função da ocupação para o cenário atual. Pode-se

observar que a cota 130 m, que apresenta uma área inundável de 0,34 km<sup>2</sup>, é onde estão situados os pontos mais atingidos na chuva de janeiro de 2004.

Tabela 6.2 – Áreas de inundação no município de Alagoa Grande

Cota (m)	Área de inundação (km <sup>2</sup> )
130 – 135	0,34
136 – 140	1,42
141 – 145	3,23
146 – 150	4,40
151 – 155	5,40
156 – 160	6,32
160 – 165	7,20
166 – 170	8,10
171 – 175	9,00

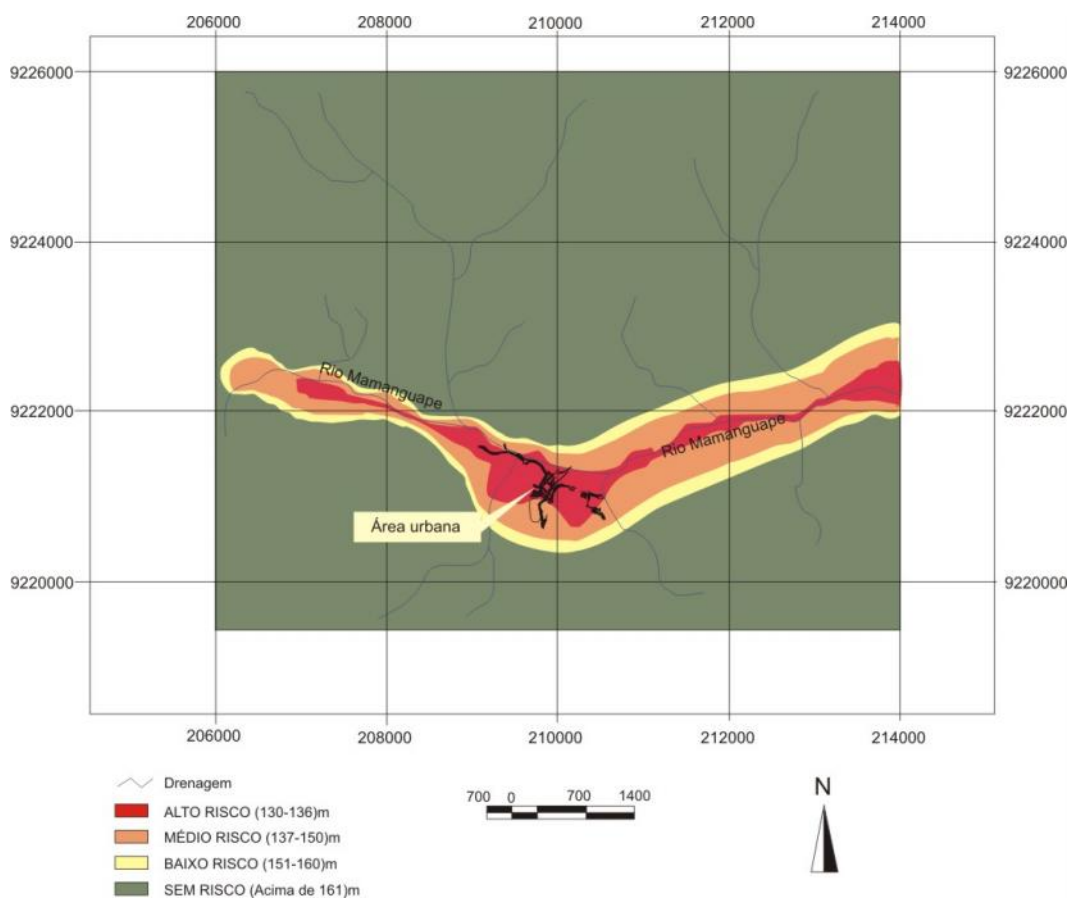


Figura 6.2 – Mapa de inundação da área urbana de Alagoa Grande.



## 6.2 Análises dos hidrogramas de cheias a partir da implantação de reservatório de amortecimento

### 6.2.1 Simulação para o período de janeiro a dezembro de 1995

Para a simulação dos hidrogramas de cheias e análise em diferentes pontos da sub-bacia de Mulungu, foram utilizados os dados pluviométricos mensais do posto de Mulungu no período de janeiro a dezembro de 1995.

A análise dos hidrogramas de cheias possibilita compreender melhor a resposta da bacia quanto à geração de vazão. Para a simulação foram utilizados os dados de chuva e vazão dos postos pluviométrico e fluviométrico de Mulungu (Figura 6.3), respectivamente, para o ano de 1995. A distribuição da precipitação e da vazão para o período considerado pode ser vista na Figura 6.4. Os dados foram obtidos da ANA - Agência Nacional de Águas.

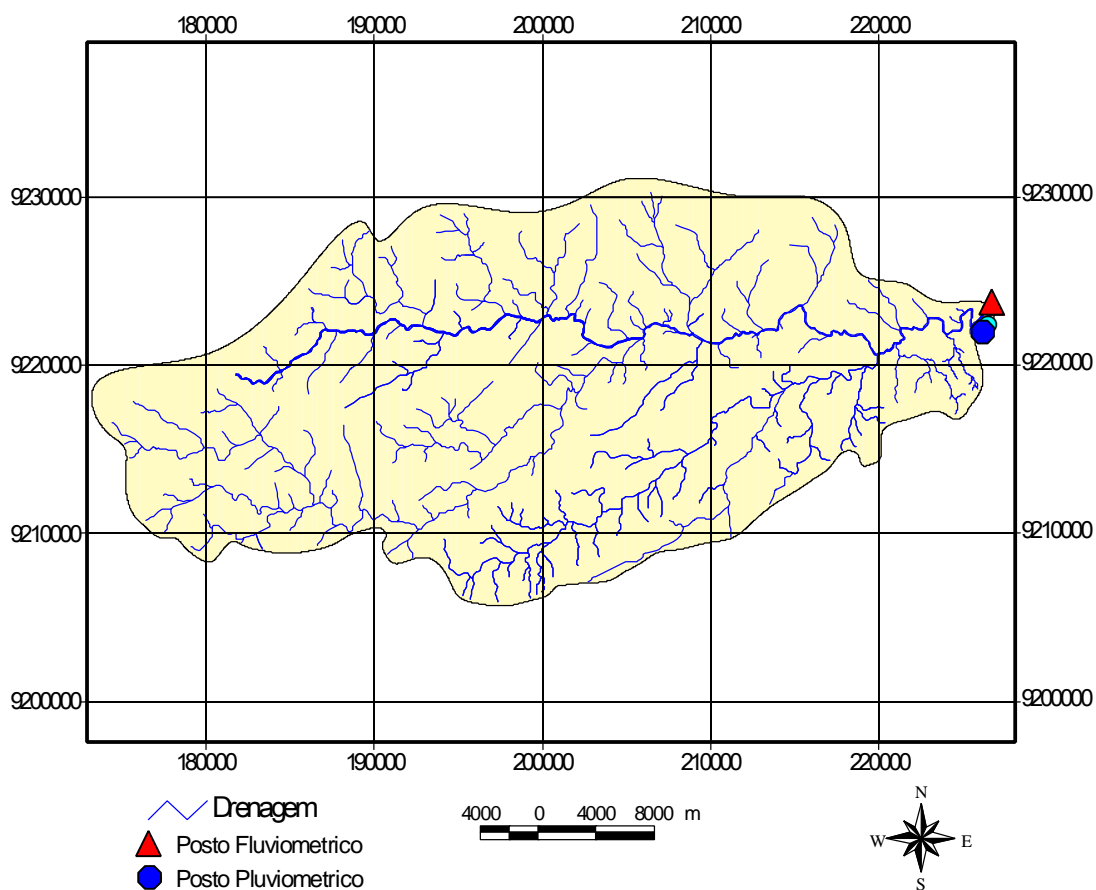


Figura 6.3 – Localização dos postos pluviométrico e fluviométrico de Mulungu.

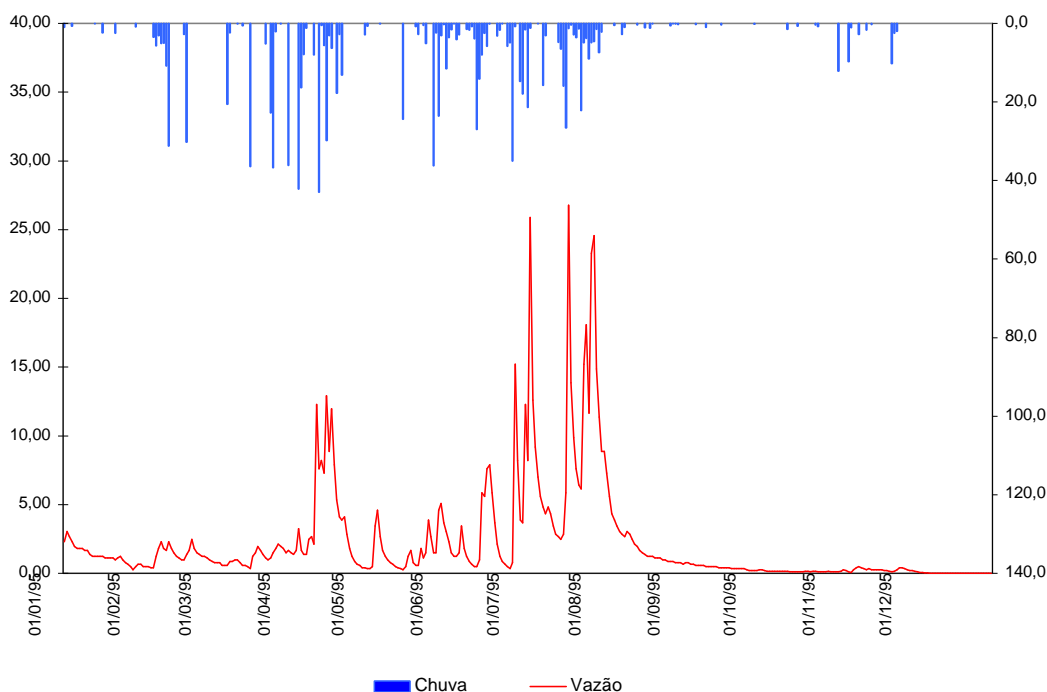


Figura 6.4 – Hietograma e hidrograma observados para o posto de Mulungu no ano de 1995.

#### 6.2.1.1 Aplicação do Modelo Kineros2

Para análise do comportamento da vazão para os anos de 1995 e 2004 foi utilizado o modelo Kineros2, descrito no Capítulo 4. É um modelo distribuído e de base física, o qual possibilita o ajuste dos parâmetros para um ou dois perfis do solo e pode ser utilizado na modelagem da vazão, bem como nos processos de erosão na bacia. É importante ressaltar que o modelo é orientado a eventos, o que permite estudar os períodos críticos observados de cheias ao longo dos anos para uma determinada região e, permite, ainda, analisar o comportamento de cheia em qualquer ponto da bacia através da espacialização da vazão. Esta análise de forma pontual das áreas mais vulneráveis e do comportamento da vazão ao longo da bacia possibilita a tomada de decisão no controle de inundações e a redução dos prejuízos associados a estes eventos.

#### 6.2.1.2 Discretização espacial da sub-bacia de Mulungu

A Figura 6.5 apresenta a discretização espacial da sub-bacia em planos e canais, sendo distribuídos em 24 elementos. Para a discretização foi levada em consideração a declividade dos planos e canais (Quadro B.1 do Apêndice B) e a rede de fluxo definido através da

drenagem para obtenção do comprimento dos planos e canais. Como base de dados foram utilizadas as cartas topográficas da SUDENE com escala 1:100.000, em formato digital, com curvas de nível equidistantes de 40 m. A Figura 6.6 representa uma discretização da bacia numa cascata de planos e canais. A discretização da bacia em planos e canais tem por finalidade possibilitar uma maior representatividade das características físicas da região de forma a permitir resultados mais próximos da realidade. As dimensões de cada elemento foram determinadas a partir do mapa topográfico em formato digital.

Como parâmetro de entrada, o modelo requer as medidas do comprimento e largura de cada plano. No entanto, em virtude das irregularidades naturais do terreno foi utilizado um artifício que transforma esta área irregular em um retângulo, cuja dimensão do comprimento foi determinada seguindo a linha de fluxo definidas pelas curvas de nível do mapa do relevo, enquanto que a largura foi determinada dividindo-se a área do plano pelo comprimento determinado anteriormente. As declividades dos elementos planos e canais foram determinadas pelo cálculo da razão entre a diferença de cota e o comprimento da linha de fluxo. A sub-bacia de Mulungu foi, então, discretizada em 24 elementos, sendo 16 planos e 8 canais e suas características geométricas podem ser vistas no Quadro B.1 do Apêndice B.

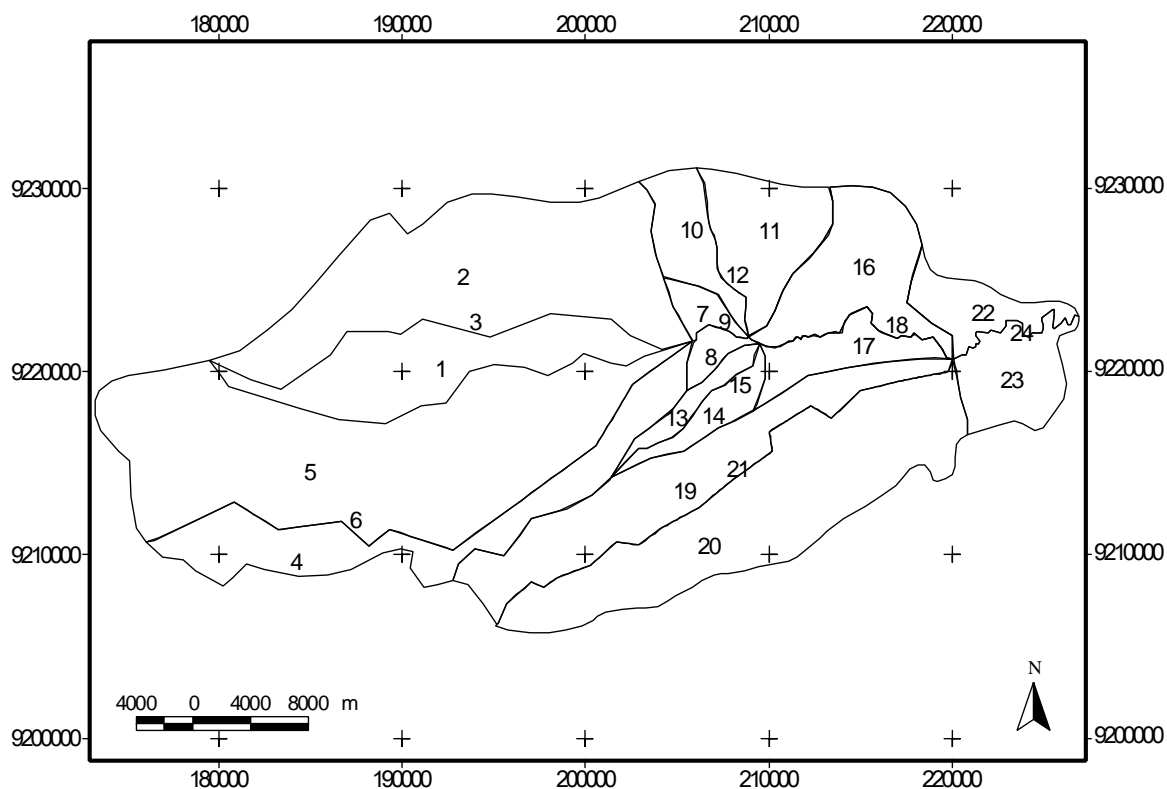


Figura 6.5 – Discretização espacial da sub-bacia de Mulungu.

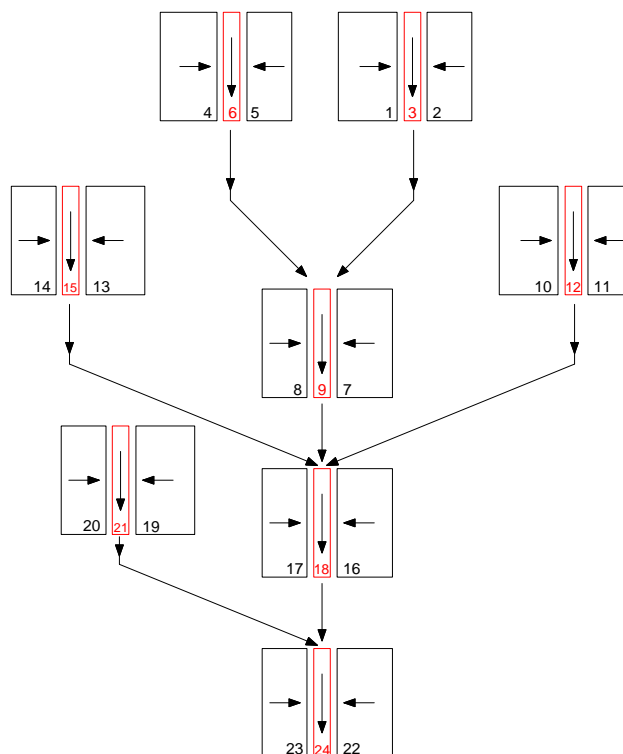


Figura 6.6 – Representação esquemática dos elementos planos e canais na sub-bacia.

### 6.2.1.3 Parâmetros de Entrada

O modelo Kineros2 apresenta uma série de parâmetros de entrada utilizados na modelagem dos processos de escoamento superficial e erosão do solo. Estes parâmetros podem ser determinados através de pesquisas de campo ou em laboratório; através de informações disponíveis na literatura; ou ainda determinados pela calibração do modelo através do método de tentativa e erro. Os parâmetros para a modelagem do escoamento superficial foram determinados através das características físicas da bacia, do tipo de solo e da declividade dos elementos discretizados. Os parâmetros definidos podem ser observados no Quadro A.3 do Apêndice A.

Alguns parâmetros foram considerados, para este estudo, como os mais relevantes e estão descritos a seguir:

1. Porosidade ( $\phi$ ): para a determinação dos valores de porosidade foram considerados os tipos de solo de cada elemento plano e canal discretizado. Estes valores foram baseados de acordo com os recomendados por Rawls et al. (1991), conforme apresentado na Tabela 6.3;

2. Saturação efetiva ( $S_i$ ): os valores propostos por Rawls et al. (1991), Tabela 6.3, foram inicialmente utilizados; entretanto, os resultados obtidos na calibragem ficaram fora dos observados na literatura. Os valores para cada elemento plano podem ser observados no Quadro A.3 do Apêndice A;
3. Capilaridade do solo ( $G$ ): este parâmetro representa o valor efetivo do potencial de capilaridade e foi determinado em função do tipo de solo de acordo com a Tabela 6.3;
4. Condutividade hidráulica saturada do solo ( $K_s$ ): a condutividade hidráulica foi determinada baseada nos estudos de modelagem da vazão elaborados por Santos et al. (2001b) que estimaram seu valor a partir de dados da bacia Ishite, localizada no Japão, com o propósito de avaliar a aplicação futura do modelo para bacias do Nordeste do Brasil com mais de 100 km<sup>2</sup>;
5. Coeficiente de rugosidade de Manning ( $\eta$ ): este parâmetro foi utilizado para o ajuste da vazão nos planos através do método da tentativa e erro com o objetivo de comparar os dados gerados e observados de vazão e o valor determinado após as simulações foi de 0,5.

Tabela 6.3 - Estimativa para propriedades hidráulicas do solo proposto por Rawls et al. (1991)

Classes de solo	Porosidade ( $\phi$ )	Saturação efetiva ( $S_i$ )	Capilaridade do solo ( $G$ ) (cm)
Arenoso	0,437 – 0,063	0,417 – 0,063	5,0
Areia franca	0,437 – 0,069	0,401 – 0,062	7,0
Franco arenoso	0,453 – 0,102	0,412 – 0,129	13,0
Franco	0,463 – 0,088	0,434 – 0,100	11,0
Franco siltoso	0,501 – 0,081	0,486 – 0,092	20,0
Franco argiloso arenoso	0,398 – 0,066	0,330 – 0,095	26,0
Franco argiloso	0,464 – 0,055	0,390 – 0,111	26,0
Franco argiloso siltoso	0,471 – 0,053	0,432 – 0,085	35,0
Argilo arenoso	0,430 – 0,060	0,321 – 0,114	30,0
Argila siltosa	0,479 – 0,054	0,423 – 0,089	38,0
Argila	0,475 – 0,048	0,385 – 0,116	41,0

#### 6.2.1.4 Espacialização da vazão

O processo de geração de vazão na sub-bacia de Mulungu se deu a partir da utilização do modelo Kineros2 através da determinação dos parâmetros físicos para cada elemento discretizado plano e canal. Por ser um modelo distribuído, o Kineros2 possibilita determinar a vazão em qualquer ponto da bacia. Após algumas simulações, através do método da tentativa e erro, foi determinado um conjunto de parâmetros que melhor representasse a bacia.

A distribuição da vazão ao longo da bacia torna possível compreender e entender melhor o comportamento da bacia quanto à resposta a um determinado evento chuvoso. A partir dos dados de entrada do modelo foi possível simular e gerar os dados de vazão diária para a sub-bacia de Mulungu. A Figura 6.7 mostra a espacialização da vazão para o evento chuvoso ocorrido no ano de 1995. Cada sub-bacia discretizada representa a média do volume escoado anualmente na saída do canal que a representa; isto é, o volume no exutório da bacia é representado pela soma das contribuições dos canais a montante.

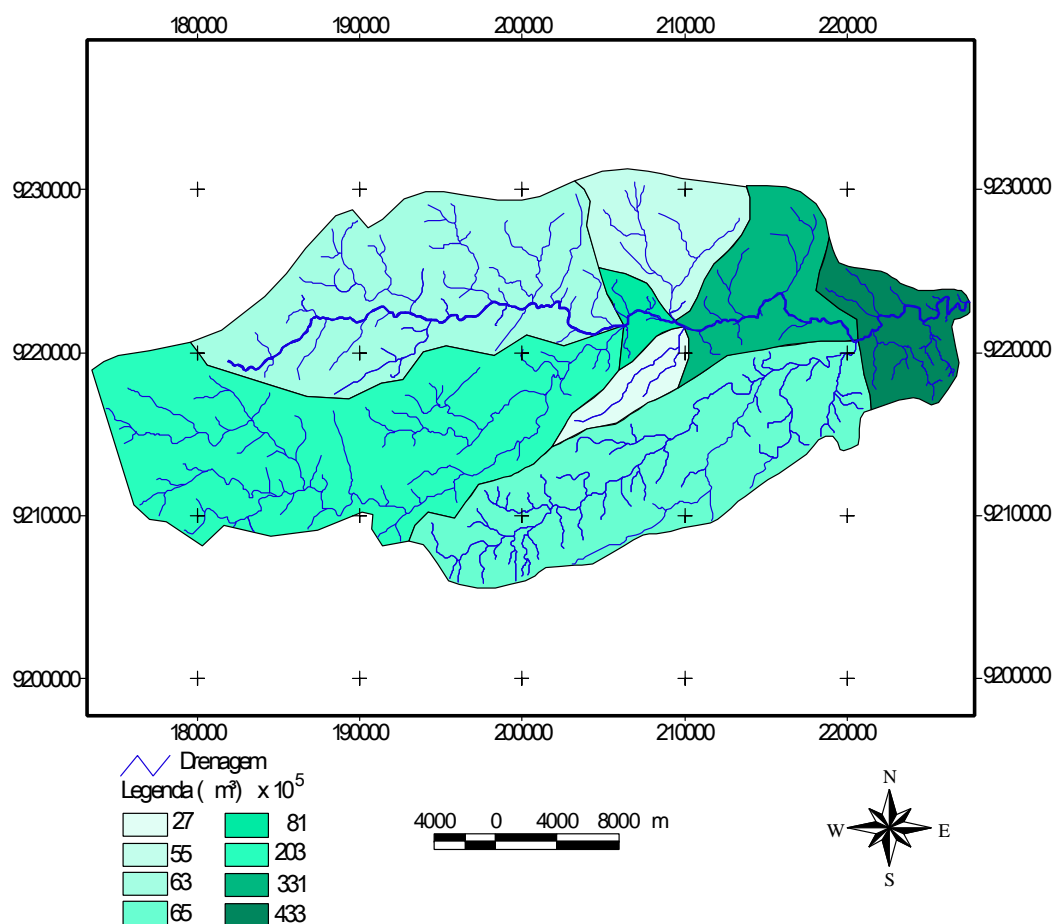


Figura 6.7 – Volume médio escoado por ano para cada sub-bacia discretizada em 1995.

Após uma análise criteriosa dos pontos que apresentavam maior concentração no volume de água, principalmente nas confluências entre o rio principal e seus tributários, foi definido um ponto a montante do município de Alagoa Grande para análise do comportamento da vazão considerando a implantação de um reservatório de amortecimento de cheia. A Tabela 6.4 apresenta a geometria do reservatório de amortecimento. Os dados de volume e área considerados para simulação representam um reservatório com capacidade de armazenamento de 11.724.037 m<sup>3</sup> com uma área de 3.420.000 m<sup>2</sup>.

A Figura 6.8 apresenta a localização do ponto de controle escolhido para implantação do reservatório de amortecimento e outros dois pontos de análises da vazão, um logo após a área urbana do município e outro no exutório do sub-bacia de Mulungu. Para a simulação, foi considerado o volume inicial do reservatório nulo uma vez que para o controle de cheias o reservatório deve estar com sua capacidade mínima para garantir um armazenamento suficiente e um controle na descarga de saída que não gere prejuízos a jusante.

Tabela 6.4 – Dados de entrada do reservatório de amortecimento para o ano de 1995

Volume (m <sup>3</sup> )	Descarga (m <sup>3</sup> /s)	Área (m <sup>2</sup> )
0	0,00	400.000
390.437	0,00	800.000
1.315.437	0,00	1.050.000
2.517.437	0,00	1.354.000
4.084.437	0,00	1.780.000
6.099.437	0,00	2.250.000
8.619.237	0,00	2.789.600
11.724.037	7,00	3.420.000

Deve-se operar o reservatório de tal forma a escoar a vazão natural até que sejam atingidas as cotas limites a jusante; a partir deste momento utiliza-se o volume do reservatório para manter ou reduzir a vazão. A descarga de saída foi considerada como sendo 7,0 m<sup>3</sup>/s para a situação de reservatório cheio. No entanto, após a simulação, observou-se uma vazão máxima de descarga de 6,92 m<sup>3</sup>/s, ou seja, quando o reservatório atingir sua capacidade total a vazão de saída é no máximo de 6,92 m<sup>3</sup>/s. Após a simulação, os resultados mostraram uma redução significativa nos picos de vazão nos trechos analisados podendo ser observados nas Figuras 6.9, 6.10 e 6.11. Estas Figuras representam o comportamento da vazão antes e após a implantação do reservatório de amortecimento. Na Figura 6.9, nota-se uma redução das vazões máximas e um controle na saída do reservatório.

Nas Figuras 6.10 e 6.11, a redução da vazão é proporcional ao volume escoado atingindo cerca de 50% na redução nos picos de vazão. Observa-se uma redução menor para os dois pontos a jusante do reservatório uma vez que estes pontos recebem contribuições laterais dos seus tributários ao longo do trecho. É importante destacar que, mesmo com o barramento a montante dos pontos analisados, o volume escoado superficialmente nos trechos a jusante do município não compromete seu uso para outros fins na região, como irrigação e dessedentação animal.

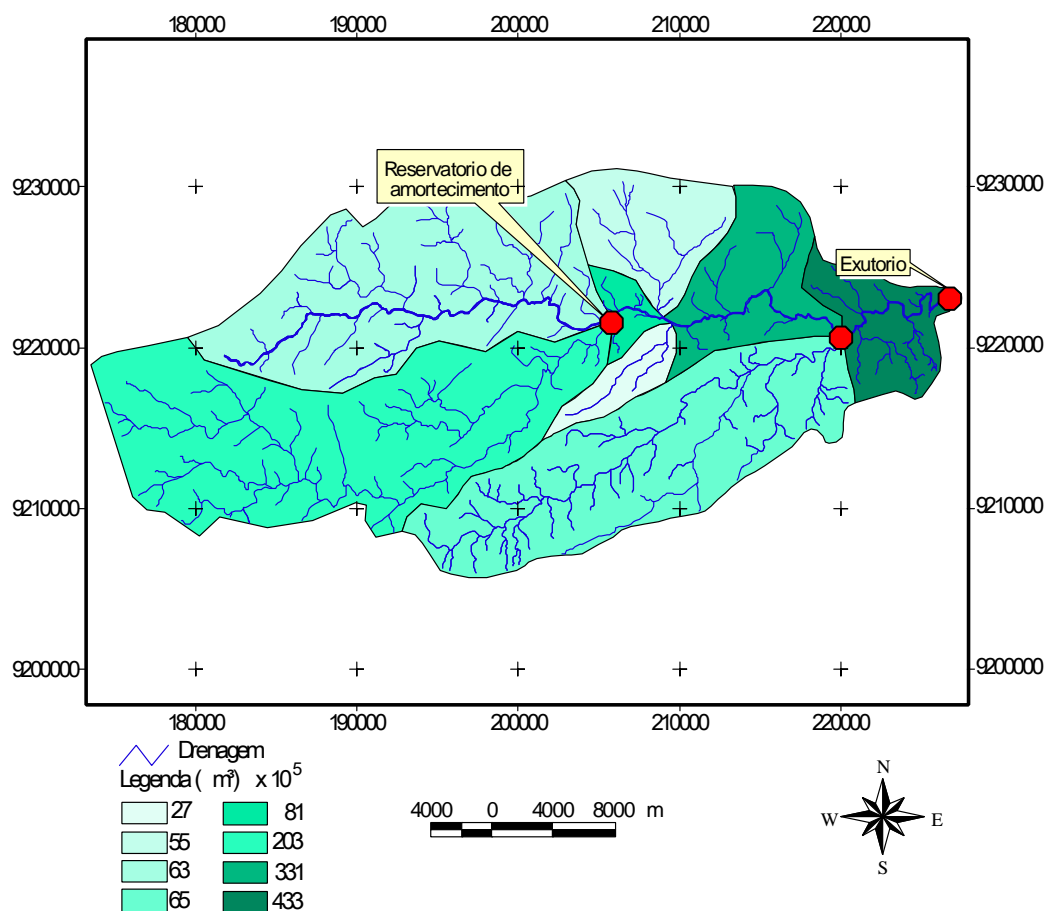


Figura 6.8 – Localização dos pontos analisados na sub-bacia de Mulungu.



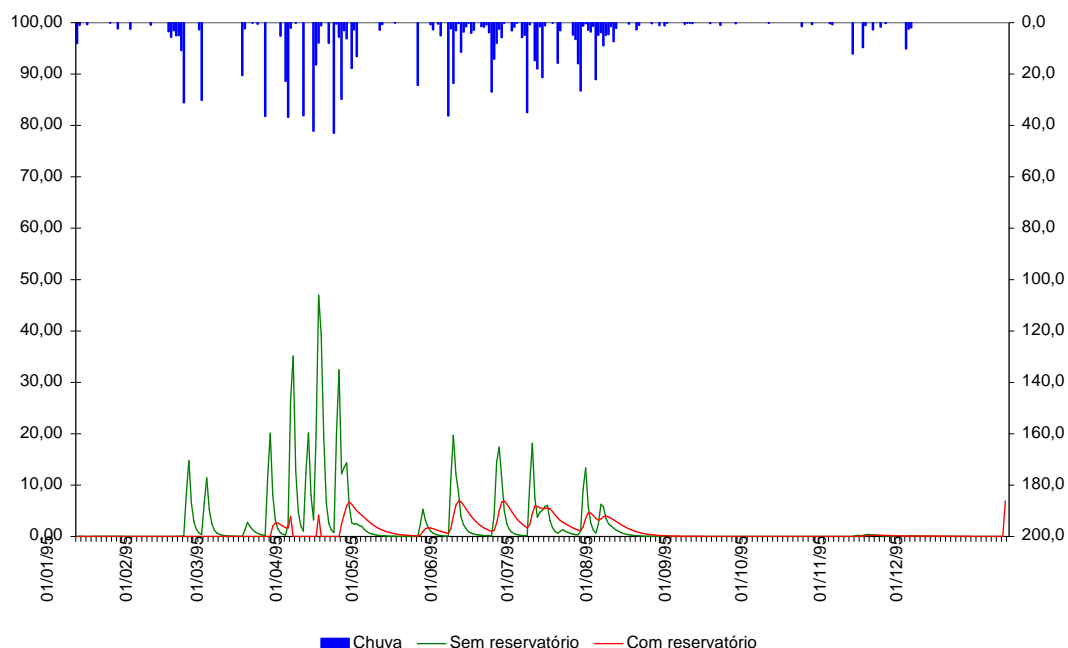


Figura 6.9 – Comportamento da vazão antes e após a implantação do reservatório.

A Tabela 6.5 apresenta o valor do pico da vazão observada para cada mês do ano de 1995 antes e após a implantação do reservatório de amortecimento situado a montante do área urbana do município de Alagoa Grande. Observa-se que o pico máximo da vazão ocorre no mês de abril atingindo  $46,90 \text{ m}^3/\text{s}$ . Após a implantação do reservatório esse valor é reduzido para  $6,70 \text{ m}^3/\text{s}$ ; isto é, uma redução de 85,70% do pico máximo diário observado antes da implantação do reservatório.

Tabela 6.5 - Comparação entre os picos diários da vazão calculada para cada mês do ano de 1995 antes e após a implantação do reservatório de amortecimento

Período	Antes	Após	Redução (%)
	Vazão ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	Vazão ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	
jan	0,0	0,0	–
fev	14,7	0,0	100,00
mar	35,1	3,9	88,85
abr	46,9	6,7	85,70
mai	19,7	6,9	65,16
jun	18,2	6,9	61,91
jul	13,3	5,9	56,05
ago	1,3	2,9	–
set	0,0	0,0	–
out	0,0	0,0	2,96
nov	0,4	0,2	38,68
dez	0,1	0,1	–

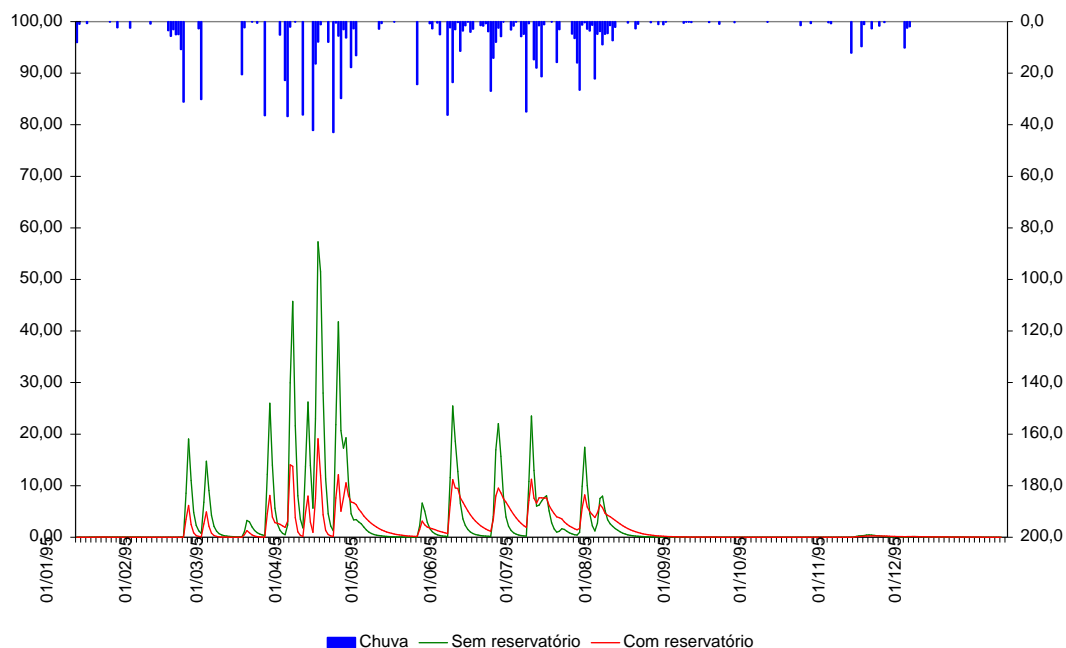


Figura 6.10 - Vazão antes e após a implantação do reservatório a jusante do município.

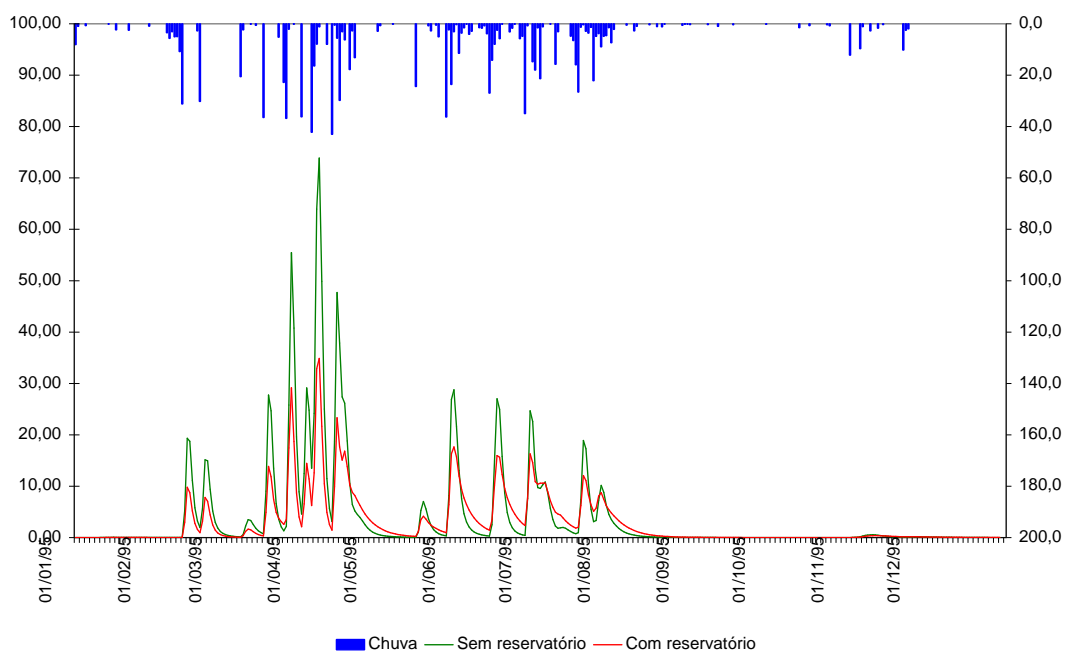


Figura 6.11 - Vazão antes e após a implantação do reservatório no exutório da sub-bacia.

### 6.2.2 Simulação para o período de janeiro a dezembro de 2004

As chuvas ocorridas no verão de 2004 provocaram inundações em todas as regiões do Brasil, com mais intensidade nas regiões Sudeste e Nordeste. As vulnerabilidades das cidades brasileiras atingidas se expressaram especialmente pela precariedade das construções

domiciliares: casas construídas em área de risco; falta de saneamento básico; falta de manutenção dos açudes e barragens. Estes problemas provocaram inundações em grandes extensões de terras, caracterizando uma nítida falta de investimentos na prevenção de desastres.

No município de Alagoa Grande, área do estudo de caso, no período de um mês foi registrada precipitação de até 500 mm, o equivalente a quatro vezes o normal para a região. Em virtude deste acontecimento, a análise do comportamento das ondas de cheia é essencial já que se caracteriza como um período crítico de precipitação, com o propósito de comparar seus resultados com um ano considerado normal, como mostrado anteriormente. A Figura 6.12 apresenta o hietograma e hidrograma para o posto de Mulungu no período de janeiro a dezembro de 2004.

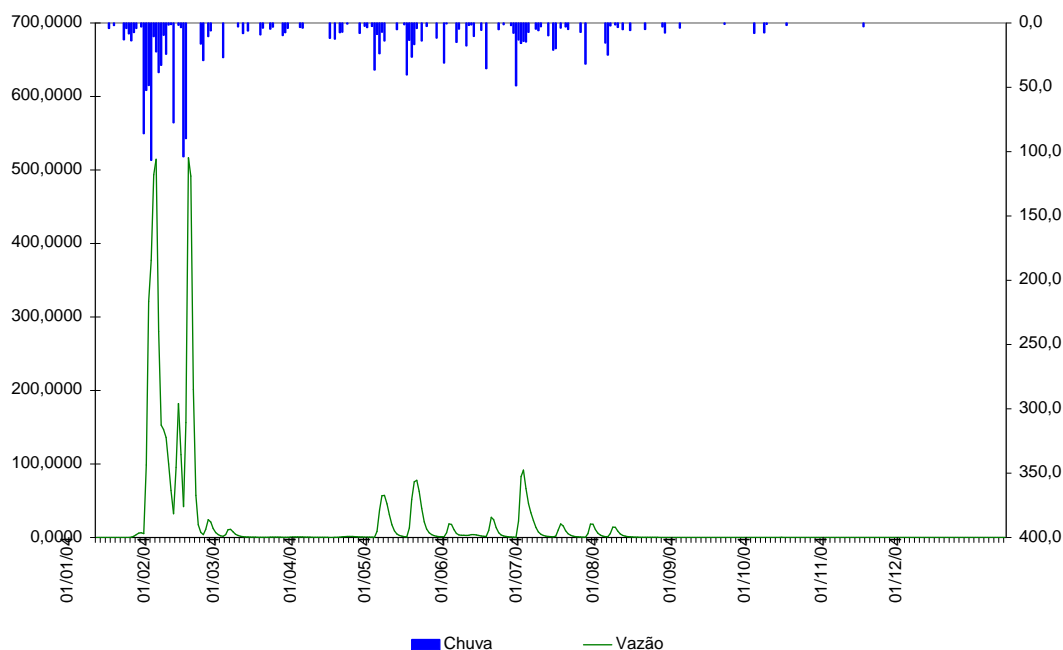


Figura 6.12 – Hietograma e hidrograma observados para o posto de Mulungu no ano de 2004.

Para a simulação através do modelo Kineros2 foi considerado o mesmo procedimento adotado para o ano de 1995. Foi simulado, então, com os mesmos dados de entrada, isto é, mesma capacidade do volume de armazenamento, mesma área hidráulica e mesma descarga. No entanto, como o volume de água foi bem maior quando comparado ao ano de 1995, os valores de descarga tiveram que ser modificados para suportar o volume escoado a montante do reservatório. A Tabela 6.6 apresenta os novos valores para a descarga de saída. Estes valores foram obtidos após as simulações considerando a situação inicial do reservatório

vazio atingindo uma vazão de descarga máxima de 57 m<sup>3</sup>/s. Após análise dos dados obtidos, observou-se uma vazão máxima atingida de 56,91 m<sup>3</sup>/s, isto é, nove vezes maior que a descarga máxima para o ano de 1995.

Tabela 6.6 – Dados de entrada do reservatório de amortecimento para o ano de 2004

Volume (m <sup>3</sup> )	Descarga (m <sup>3</sup> /s)	Área (m <sup>2</sup> )
0	0,00	400.000
390.437	0,00	800.000
1.315.437	0,00	1.050.000
2.517.437	0,00	1.354.000
4.084.437	2,00	1.780.000
6.099.437	10,00	2.250.000
8.619.237	20,00	2.789.600
11.724.037	57,00	3.420.000

A Figura 6.13 apresenta o comportamento da vazão antes e após a implantação do reservatório de amortecimento. Observa-se uma redução para os picos de vazão a jusante do reservatório, próxima a área urbana de Alagoa Grande nos meses de janeiro e fevereiro de 2004, bastante considerável. Para o restante do ano o comportamento da vazão está dentro do esperado para a região. A Tabela 6.7 apresenta o valor do pico da vazão observado para cada mês do ano de 2004 antes e após a implantação do reservatório de amortecimento situado a montante da área urbana do município de Alagoa Grande. Nota-se que o pico máximo da vazão no mês de janeiro após a implantação do reservatório é de 55,47 m<sup>3</sup>/s; isto é, uma redução de 81,66% do pico máximo observado antes da implantação do reservatório que é de 302,42 m<sup>3</sup>/s. Para o mês de fevereiro essa redução é de 83,82%.

O volume de água escoado no período de um mês, janeiro de 2004, provocou uma inundação que atingiu a cota de 135,51 m que, de acordo com o mapa de inundação apresentado anteriormente, refere-se à área de inundação considerada de alto risco. O período de inundação na cidade de Alagoa Grande ocorreu entre os dias 21/01/04 e 08/02/04, apresentando uma vazão acima de 57,00 m<sup>3</sup>/s, como pode ser observado na Figura 6.13. Com a implantação do reservatório de amortecimento, com uma vazão de controle de 57,00 m<sup>3</sup>/s, a cota de inundação foi reduzida para 129,67 m, ficando abaixo da cota mínima que é de 130 m.

Através dos resultados obtidos, torna-se possível observar o comportamento da vazão para períodos críticos e antecipar as decisões, no intuito de reduzir os possíveis impactos decorrentes do volume de água transportado para as áreas mais vulneráveis. As Figuras 6.14 e 6.15 representam o comportamento da vazão antes e após a implantação do reservatório de

amortecimento no ponto a jusante do município e no exutório da sub-bacia de Mulungu, respectivamente. Com esta implantação, obteve-se em média uma redução, nos primeiros dois meses do ano, de 30% nos picos de vazão do hidrograma de jusante do município de Alagoa Grande (Figura 6.14) e cerca de 50% dos picos de vazão do hidrograma do exutório da sub-bacia de Mulungu (Figura 6.15).

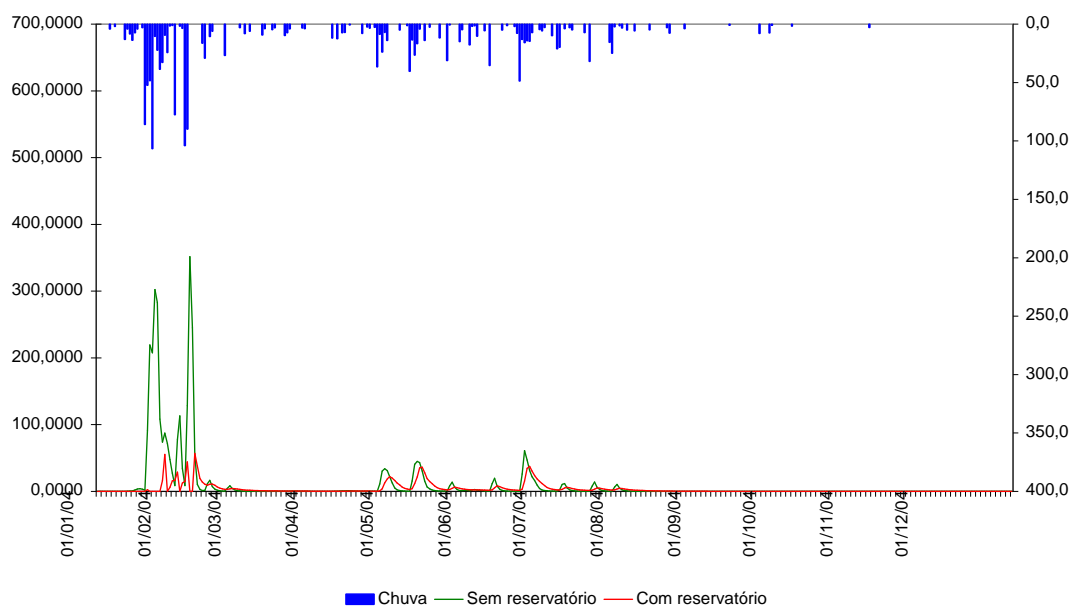


Figura 6.13 – Comportamento da vazão antes e após a implantação do reservatório de amortecimento.

Tabela 6.7 – Comparação entre os picos de vazão mensal observados antes e após a implantação do reservatório de amortecimento para o ano de 2004

<b>Período</b>	<b>Antes</b> Vazão (m³/s)	<b>Após</b> Vazão (m³/s)	<b>Redução</b> (%)
jan	302,42	55,47	81,66
fev	351,69	56,91	83,82
mar	0,46	2,11	—
abr	34,07	22,12	35,07
mai	61,11	37,58	38,50
jun	61,11	37,58	38,50
jul	14,10	6,06	57,00
ago	0,65	3,07	—
set	0,09	0,14	—
out	0,07	0,05	26,71
nov	0,00	0,01	—
dez	0,00	0,00	—

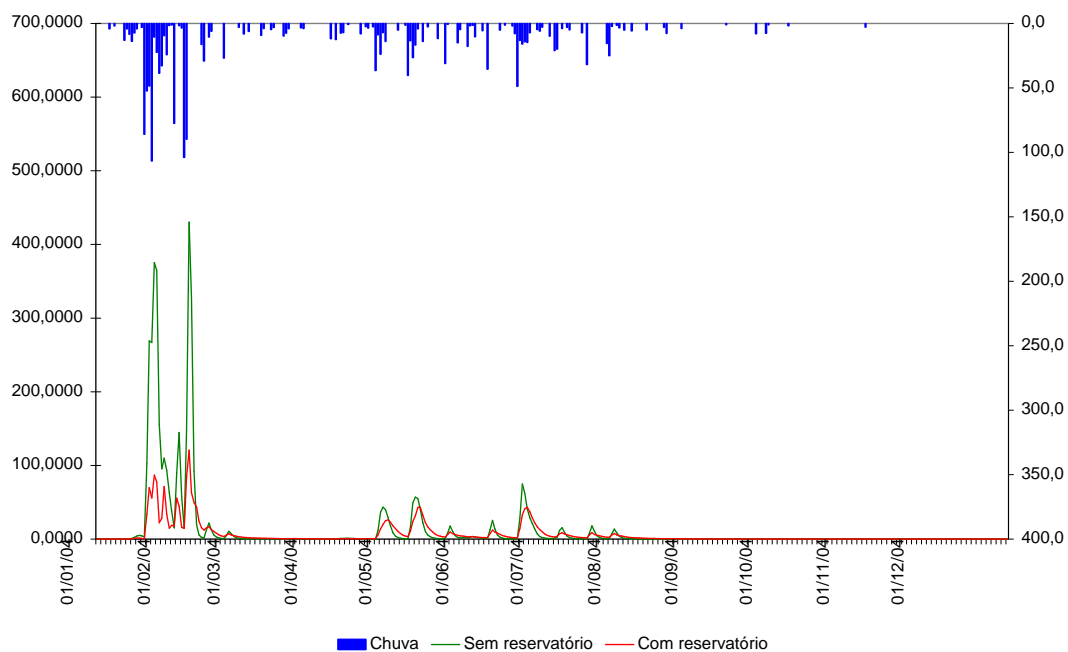


Figura 6.14 - Vazão antes e após a implantação do reservatório no ponto a jusante do município.

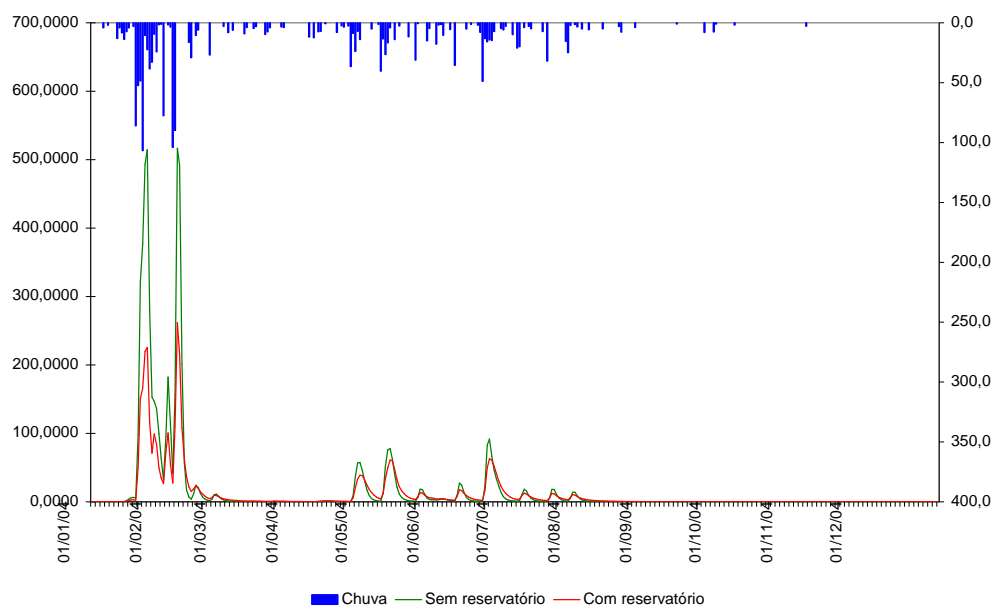


Figura 6.15 - Vazão antes e após a implantação do reservatório no exutório da sub-bacia.

### 6.2.3 Discussão

O mapeamento das áreas de risco de inundação é uma importante ferramenta de suporte à decisão para o controle de inundações, pois pode identificar as áreas de risco e

antecipar a tomada de decisão no caso de uma chuva que possa provocar inundações. O mapa de inundação gerado neste trabalho apresentou as áreas de risco de acordo com o cenário atual de ocupação, o que representa um resultado bastante preocupante uma vez que a área de alto risco de inundação, faixa vermelha da Figura 6.2, está inserida na área urbana da cidade de Alagoa Grande. Esta ferramenta pode auxiliar no processo de ocupação das áreas de risco, a fim de definir as regras de construção e ocupação para as áreas de alto risco e implementá-las no Plano Diretor e Código de Obras dos municípios da bacia.

As simulações apresentadas neste capítulo, com a implantação de reservatório de amortecimento como medida estrutural no controle de inundação a montante do município de Alagoa Grande, foram realizadas para dois eventos: um período característico da região com precipitações dentro da normalidade (janeiro a dezembro de 1995) e um período com precipitação acima do normal, este último ocorrido no período de janeiro a dezembro de 2004. Foram analisados três pontos distintos ao longo da sub-bacia de Mulungu com o objetivo de verificar o comportamento dos hidrogramas de cheia antes e após a implantação do reservatório de amortecimento. O primeiro ponto, localizado a montante da área urbana de Alagoa Grande, foi escolhido para a implantação do reservatório e, verificou-se uma redução de 85,70% em 1995 e de 81,66% em 2004 nos maiores picos observados no hidrograma, como podem ser vistos nas Tabelas 6.5 e 6.7, respectivamente. Para o ano de 2004, ano considerado crítico com índices pluviométricos bem acima da média, caso existisse o reservatório proposto para controle de cheias no ponto a montante do município de Alagoa Grande, os prejuízos, inerentes a este evento chuvoso, seriam reduzidos, desde que fosse considerada uma vazão de descarga que atingisse uma cota de inundação abaixo de 130 m, como demonstrado nos resultados das simulações. Para os dois pontos, um localizado a jusante da área urbana da cidade e outro no exutório da sub-bacia, esta redução variou, em média, de 30 a 50%. É importante ressaltar que esta redução não compromete o uso dos recursos hídricos para outros fins, e.g., irrigação e dessedentação animal. Os resultados obtidos foram bastante satisfatórios do ponto de vista técnico, em virtude da redução dos picos de vazão e conseqüente diminuição das áreas inundáveis, bem como redução do tempo de duração da inundação, pois mesmo havendo inundações, elas foram de curta duração. A implantação de reservatórios para amortecimento de cheias pode ser uma medida bastante eficaz no combate às inundações. No entanto, uma política de planejamento e gerenciamento deve ser considerada, através do controle na operação e na descarga de saída a fim de garantir segurança para a população das áreas a jusante.

## 7 AÇÕES E PROGRAMAS PARA CONTROLE DAS INUNDAÇÕES

### 7.1 Proposta de Gestão de Risco de Inundação na Bacia do rio Mamanguape

Muitos dos prejuízos associados a cada evento chuvoso, os quais geram, por consequência, inundações, poderiam ser atenuados, mediante uma política correta de uso e proteção do leito dos cursos de água e das margens adjacentes de tal maneira que exija a construção de infra-estruturas hidráulicas que atendam de fato, às exigências ambientais, de forma a não alterar as dinâmicas naturais nem desvirtuar a finalidade perseguida – o bom aproveitamento dos recursos hídricos. As estratégias e ações que podem, efetivamente, fazer parte do plano de gestão de inundação para a bacia em estudo podem ser resumidas na Tabela 7.1. O conhecimento das características hidrológicas e hidráulicas do sistema fluvial da bacia hidrográfica é fundamental para a adoção de um plano de controle de inundação. Três fatores inter-relacionados podem determinar o processo na tomada de decisão que pode resultar em soluções mais apropriadas para a bacia: o clima, as características da bacia hidrográfica e as condições sócio-econômicas da região, este último fundamental, uma vez que os municípios inseridos na bacia apresentam baixo poder econômico. Analisados em conjunto, esses elementos determinam as características das enchentes e suas consequências.

Tabela 7.1 – Estratégia e ações para o plano de gestão de inundação

Estratégia	Opções
Redução de inundação	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Barragens</li> <li>- Diques e obras de contenção</li> <li>- Gestão de bacias</li> <li>- Melhoria de canais</li> </ul>
Redução da vulnerabilidade para os danos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Regulação das planícies de inundação</li> <li>- Políticas de desenvolvimento</li> <li>- Projeto e locação dos equipamentos</li> <li>- Código de obras e construção</li> <li>- Estruturas a prova de enchentes</li> <li>- Previsão e alerta de enchentes</li> </ul>
Mitigação dos efeitos das inundações	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Informação e educação</li> <li>- Preparação em caso de desastres</li> <li>- Medidas de recuperação</li> <li>- Seguro contra inundação</li> </ul>
Preservação dos recursos naturais e das planícies de inundação	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Zoneamento e regulamentação das planícies de inundação</li> </ul>



## **7.2 Plano para Gerenciamento da bacia do rio Mamanguape**

Como idéia principal do plano de gerenciamento, o estudo visa promover a melhoria de vida da população, auxiliando o Poder Público e órgãos responsáveis pelo gerenciamento na implantação de medidas mitigadoras dos problemas relacionados com as inundações. Desta forma, alguns critérios devem ser considerados na implantação dessas medidas de acordo com o grau do risco quando associadas à ocupação de áreas sujeitas à inundação. O mapeamento possibilita delimitar as áreas associadas a inundações, permitindo a elaboração do planejamento de sua ocupação.

As ações propostas para o controle das inundações na bacia do rio Mamanguape podem ser divididas de acordo com a prioridade em: curto, médio e longo prazos. Estas medidas servirão como subsídio que deverão ser levadas em conta quando da elaboração do Plano Diretor de Drenagem para a bacia.

### **7.2.1 Medidas a curto prazo**

1. Implantação de equipamentos para o monitoramento do rio Mamanguape e seus principais afluentes auxiliando nos estudos hidrológicos e hidrodinâmicos e levantamento de seções transversais do rio;
2. Levantamento detalhado da topografia das áreas de risco com espaçamentos entre as curvas de nível de 0,5 a 1,0 m, dependendo das condições do terreno, para os municípios ribeirinhos. Além da topografia do terreno, é importante o levantamento detalhado das obstruções ao escoamento, como pilares e encostos de pontes, estradas com taludes, edificações, etc;
3. Desenvolvimento de manuais que auxiliem a população quando da ocorrência de cheias em áreas de risco. Este manual poderá fornecer informações para prevenção e combate a enchentes, tais como:
  - (a) Identificação das áreas de risco de inundação através de mapas de inundação;
  - (b) Identificação de líderes e formação de grupos de apoio nas áreas de risco;
  - (c) Como se preparar para enfrentar a enchente (ações educativas);
  - (d) Como perceber que a chuva está chegando;

- (e) Como agir durante a chuva (ações emergenciais e medidas de segurança);
- (f) Reunião da população para discutir os resultados alcançados, assim como as dificuldades enfrentadas e os problemas não solucionados.

Estes são alguns itens que podem ser úteis na elaboração do manual para prevenção e combate às enchentes, ressaltando a importância da participação de todos na mitigação dos prejuízos decorrentes de cada evento chuvoso.

4. Participação da população (Grupo de estudo do ecossistema do rio): o propósito de estudar o ecossistema do rio é de entender as características do rio de um ponto de vista ecológico, e explorar alternativas que visem a conservação dos recursos naturais. Esta medida pode ser incorporada como fazendo parte da grade curricular das escolas locais ou através de uma “Semana de educação ambiental”. Para alcançar este objetivo é necessária a participação de forma integrada do poder público, da iniciativa privada e de organismos não-governamentais e comunitários;

#### 7.2.2 Medidas a médio e longo prazo

1. Plano Diretor de Drenagem Urbana: o Plano Diretor deve ser elaborado considerando os aspectos de controle de inundações para cada município, atuando de forma integrada evitando, assim, soluções que transfiram o problema para jusante. Portanto, a atuação conjunta entre o poder público, o comitê de bacia hidrográfica do Litoral Norte e a população local possibilitará soluções compatíveis com a realidade, o que evitará com que as medidas que solucionem problemas locais estejam em detrimento aos municípios que estão mais a jusante;

2. Zoneamento das áreas de risco: o zoneamento consiste em delimitar as áreas associadas a inundações de acordo com seu grau de risco de ocupação. Assim, tem-se o conhecimento de grau de susceptibilidade de cada zona, permitindo a elaboração do planejamento de sua ocupação. Para a delimitação das áreas de risco na bacia do rio Mamanguape, é necessário um levantamento criterioso dessas áreas ocupadas ao longo das margens do rio e, em seguida, delimitar em que zona cada área se encontra, como mostrado na Figura 6.2 do Capítulo 6. Este zoneamento pode considerar três faixas de riscos:

- a) Zona de alto risco de inundação: zona onde deveria ser proibido qualquer tipo de construção ou ocupação dessas áreas. No entanto, o que se observou, no estudo de caso mostrado no trabalho, foi uma ocupação muito próxima às margens do rio, o que certamente deve ocorrer nos demais municípios ribeirinhos da bacia. O que pode ser feito é um remanejamento desta população para áreas mais seguras, e utilizar as zonas de alto risco com outras formas de ocupação temporária, e.g., áreas de lazer, estacionamentos, parques, áreas de preservação, entre outros;
- b) Zona de restrição: zona onde pode ser permitida a construção desde que leve em consideração a possibilidade de ocorrência de inundações. Através do código de obras pode haver uma regulamentação nos tipos de construções;
- c) Zona de baixo risco: zona onde podem ser dispensadas maiores precauções. É importante, porém, que a população seja orientada de como proceder no caso de uma inundação.

É importante ressaltar que toda ação de caráter restritivo deve ser acompanhada de uma fiscalização. Portanto, o zoneamento só se tornará efetivo se houver uma participação dos órgãos responsáveis pela fiscalização, pois a população poderá retornar às áreas nos períodos de estiagem.

3. Planejamento do uso e ocupação do solo: como descrito anteriormente, o zoneamento determina apenas quais áreas podem ser ocupadas. Já o planejamento determina como estas áreas deverão ser ocupadas. Através do Plano Diretor de Drenagem e do código de obras, podem-se delimitar as áreas que não deverão ser ocupadas com construções permanentes. Neste caso, os municípios terão que utilizar estas áreas para outros fins como, por exemplo, parques, estacionamentos, etc.;

4. Previsão de Cheia e Plano de Evacuação: para a utilização deste tipo de medida, é necessário um sistema de coleta e transmissão em tempo real dos dados de precipitação, vazão e nível, durante a ocorrência de eventos chuvosos. A rede telemétrica atualmente existente na bacia do rio Mamanguape não serve ao objetivo de previsão de cheias em tempo real. Pode ser utilizado um sistema de rádio e implantação de alto-falantes em

pontos estratégicos ao longo da bacia. Pode-se, também, desenvolver um modelo esquemático que consiga prever quando as cidades situadas às margens do rio Mamanguape devem ser evacuadas, por haver um perigo de inundação. A Figura 7.1 apresenta este modelo:

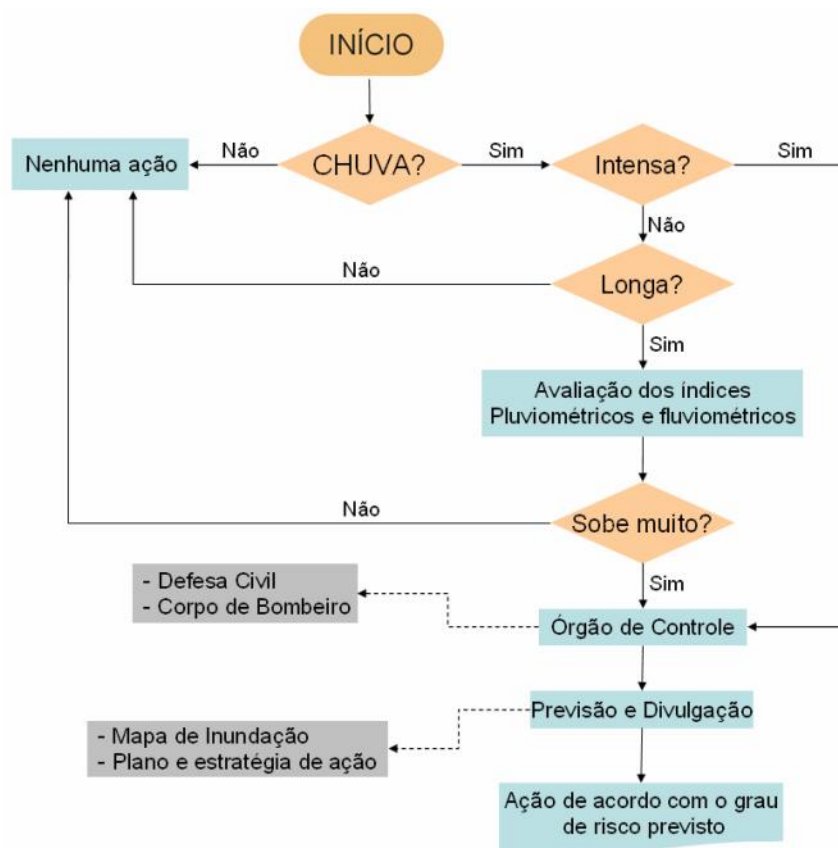


Figura 7.1 – Modelo esquemático para um sistema de alerta contra inundação para os municípios da bacia do rio Mamanguape.

É importante observar que o item “CHUVA” representa o parâmetro de entrada para o modelo proposto, que pode ser obtido através de dados observados ou através de previsão meteorológica. Se não houver chuva ou previsão de chuva, nenhuma ação será realizada. Se não há previsão de chuvas, então “Chuva intensa” não pode contribuir para uma enchente. Caso exista a indicação de chuva, e esta for intensa, deverá ser avaliado o período da duração do evento, através do monitoramento dos dados pluviométricos e, neste caso, deverão ser acionados os órgãos de controle de inundação. Se a chuva não for intensa, mas como há uma previsão de chuva longa, existirá uma chance de inundação e assim, os índices pluviométricos e fluviométricos do rio na seção de controle passarão a ser monitorados e, se o nível do rio estiver subindo rápido, os órgãos de defesa deverão ser acionados para atuarem em áreas que

possam ser atingidas de acordo com a previsão estabelecidas previamente através dos mapas de inundação. Os planos e estratégias de ação serão divulgados em função do grau de risco previsto.

5. Controle da erosão: o controle de erosão do solo é uma das principais medidas extensivas. O poder público em parceria com as autoridades responsáveis deve ter em mente a necessidade de planejar e projetar obras de controle a erosão que resultem em uma solução racional e definitiva para o problema, sendo extensiva a toda a bacia, reduzindo, assim, o processo de assoreamento ao longo do rio. Uma medida que pode ser utilizada, apesar do custo inicial alto, é o reflorestamento ao longo da bacia que, além de combater à erosão, pode reduzir o impacto da chuva diretamente sobre o solo, o que aumentará o tempo de concentração da bacia e reduzirá os picos de cheias;

6. Implantação de reservatórios de amortecimento de cheias: esta medida tem como objetivo principal armazenar uma parcela das vazões de enchente, de maneira a reduzir o pico de cheia que atinge os municípios ribeirinhos localizados na bacia do Mamanguape. A implantação desta obra estrutural requer um investimento alto para os municípios da bacia, pois além da sua construção é imprescindível seu controle na operação e na manutenção. Para isso, é importante a participação dos gestores públicos na atuação direta de manutenção e fiscalização. Como visto no Capítulo 6, a implantação de reservatórios que contribuam na redução e no controle do escoamento pode ser bastante eficaz, desde que sejam obedecidas algumas regras básicas no seu processo operacional que podem ser vistas a seguir:

- (a) Na época do período chuvoso o reservatório deverá estar com sua capacidade mínima de armazenamento de modo a suportar a vazão decorrente do evento chuvoso;
- (b) O reservatório deverá procurar operar de tal forma a escoar a vazão natural até que as cotas limites a jusante sejam atingidas, isto é, o nível máximo definido pelo mapa de inundação;
- (c) O volume armazenado no reservatório deverá ser liberado gradativamente, para que o reservatório recupere sua capacidade de armazenamento para a próxima cheia;

O monitoramento do volume armazenado deverá ser permanente, principalmente nos períodos chuvosos da região, garantindo segurança para a população a jusante. Estas condições operacionais dependem do projeto de reservatório e de seu sistema extravasor. A localização destes reservatórios de amortecimento deverá obedecer aos critérios de vulnerabilidade, e sua implantação será determinada através da sua eficiência e utilidade para a localidade considerada. Um estudo detalhado em toda a bacia deverá ser realizado a fim de determinar os pontos mais importantes quanto à questão da geração de vazão, conforme mostrado no Capítulo 6 para a sub-bacia de Mulungu.

## 8 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

### 8.1 Conclusões

Os problemas relacionados com as inundações urbanas, no Brasil e em várias partes do mundo, vêm aumentando cada vez mais, principalmente nas pequenas e médias cidades onde se observa um crescimento urbano maior, que geralmente é processado de forma desordenada. A falta de planejamento e a gestão dos recursos hídricos numa bacia hidrográfica, em geral, são fatores que contribuem de forma significativa para um aumento nos prejuízos associados a cada evento chuvoso. É importante ressaltar que, as soluções para a proteção e o controle das inundações adotadas na Brasil, por exemplo, estão mostrando que dentro de um processo de planejamento integrado entre o poder público e a sociedade civil, podem ser bastante eficazes desde que este processo se dê de forma ininterrupta. O Poder público, tanto na esfera federal, estadual e municipal, deve sempre priorizar as medidas não-estruturais, mas quando da necessidade de obras estruturais extensivas devem ser levadas em consideração não apenas seu aspecto técnico, mas, sobretudo os aspectos ambiental, social e econômico.

Neste trabalho foram apresentadas soluções para a mitigação dos problemas associados às inundações para os municípios ribeirinhos da bacia hidrográfica do rio Mamanguape através da implantação de medidas estruturais e/ou não-estruturais de modo a subsidiar os órgãos gestores na tomada de decisão. De acordo com os estudos e resultados apresentados, percebe-se a necessidade, em alguns casos, da integração entre as medidas estruturais e não-estruturais, ou seja, práticas de gerenciamento e mudança no comportamento fluvial, de forma tal que possa garantir a sustentabilidade dessas medidas e sua eficácia quando da sua implementação.

Para um trabalho cuja temática seja inundações urbanas, alguns dados para o desenvolvimento da pesquisa são imprescindíveis como dados pluviométricos e fluviométricos, comportamento da seção transversal do rio, topografia detalhada da região, entre outros parâmetros fundamentais. Desta forma, fica evidente a necessidade de medir no campo uma série de variáveis hidrológicas e meteorológicas de modo a permitir o conhecimento das características hidrológicas e possibilitar a aplicação de modelos matemáticos, tornando-se possível simular o comportamento hidrológico da bacia e estimar a probabilidade associada a eventos raros.

Os resultados apresentados, através das simulações hidrológicas e dos mapas gerados, podem contribuir de forma significativa através de um melhor aproveitamento das informações existentes, trazendo uma maior precisão e agilidade dos processos que envolvam estudos sobre inundações urbanas. Desta forma, o material produzido poderá servir como mapeamento básico para estudos posteriores a serem realizados, visando melhor detalhar as informações existentes ou a serem levantadas, inclusive de forma setorizada, com o intuito de melhorar a qualidade de vida na bacia hidrográfica do rio Mamanguape, tendo em vista que:

1. Não há solução definitiva para a questão das enchentes, uma vez que o rio principal corta as cidades e o desenvolvimento urbano se deu, inicialmente, às margens do rio, isto sem contar com a indisponibilidade de recursos financeiros dos municípios;
2. Apesar de não poder evitar todas as enchentes, é possível reduzir seus impactos, à medida que soluções que visem a proteção e o controle sejam implementadas gradativamente;
3. Estas medidas devem estar associadas ao Plano Diretor de Drenagem da bacia do rio Mamanguape;

O reservatório de amortecimento de cheias, como medida de proteção e controle, mostrou ser eficaz do ponto de vista da minimização dos impactos de uma cheia na região. Estas estruturas já são bastante exploradas no Estado de São Paulo, mais precisamente na região metropolitana da capital, executando os primeiros reservatórios de detenção para amortecimento de picos de cheias em 1999. No entanto, é importante ressaltar que esta medida pode ser bastante eficiente do ponto de vista técnico, mas suas conseqüências sociais e do entorno mostram-se complexas. O Sistema de Alerta contra Inundações, proposto pelo trabalho, pode ser uma ferramenta bastante eficiente para o controle e combate a inundações na bacia do rio Mamanguape, desde que toda a estrutura apresentada trabalhe de forma integrada, através do monitoramento do rio de forma contínua, atuação da Defesa Civil e Corpo de Bombeiros, além da participação da população.

Através dos resultados obtidos, dar subsídio aos órgãos públicos responsáveis pelo planejamento e gerenciamento na execução de projetos, abrangendo não apenas os municípios da bacia, como também cidades vizinhas que sofrem com este mesmo problema – as inundações em áreas urbanas.

Como produto, o trabalho funcionará como um instrumento que, associado às políticas públicas eficientes, poderá gerar resultados bastante satisfatórios. Para tanto, além de reduzir



danos financeiros para os municípios, a adoção de medidas de proteção e controle compatíveis com a realidade local considerando seus aspectos ambiental, social e econômico, pode prognosticar a ocupação de áreas de risco, geralmente por indivíduos desprovidos de condições financeiras, garantindo por intermédio destes, um crescimento sustentável e conseqüente qualidade de vida para as gerações futuras.

## **8.2 Recomendações**

A bacia hidrográfica do rio Mamanguape merece atenção especial por parte das autoridades por se tratar de um local com muitas dificuldades e ocupado principalmente por população de baixa renda.

Como recomendação para trabalhos futuros fica a elaboração dos mapas de inundação mais detalhados que possam se mostrados à comunidade como parte de um programa de educação ambiental, já proposto no presente trabalho.

Fica ainda o endosso para que as autoridades competentes instalem mais estações para obtenção de dados de chuva e vazão, com profissionais capacitados para as leituras, visto que os modelos hidrológicos atuais de simulação se mostram bastantes eficazes para os cálculos desejados, e o aumento da malha de estações de aquisição de dados viria a melhorar a qualidade e precisão dos resultados.

## REFERÊNCIAS

AAGISA (Agência de Águas, Irrigação e Saneamento do Estado da Paraíba). **Relatório sobre a Elaboração do Mapa de Inundações: Bacia do Rio Mamanguape/PB**. Paraíba. 2004.

AAGISA (Agência de Águas, Irrigação e Saneamento do Estado da Paraíba). **Proposta de Instituição do Comitê das Bacias Hidrográficas do Litoral Norte, conforme resolução N° 1, de 31 de agosto de 2003, do Conselho Estadual de Recursos Hídricos do Estado da Paraíba**. Paraíba. 2004.

APMF Documento técnico N° 1, segunda edição. **Programa Associado de Gestão de Crecientes**. 2004.

BAPTISTA, M.B.; NASCIMENTO, N.O.; RAMOS, M.H.D.; CHAMPS, J.R.B. **Aspectos da Evolução da Urbanização e dos Problemas de Inundações em Belo Horizonte**. Drenagem Urbana: gerenciamento, simulação, controle. Porto Alegre: ABRH/Editora da Universidade/UFRGS, p. 129-138. 1998.

BOLLMANN, H.A. **Relação da densidade populacional sobre variáveis de qualidade físico-química das águas superficiais em microbacias hidrográficas urbanas sem cobertura sanitária em Porto Alegre – RS**. Porto Alegre, 2004. 156p. Tese (Doutorado - Instituto de Pesquisas Hidráulicas). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2004.

BUCHANERI, V.C. **Geração da série histórica de vazão por meio do modelo SMAP: subsídio para o plano de manejo da bacia do Rio Grande de Ubatuba**. Piracicaba, 2004. 124p. Dissertação (Mestrado - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"). Universidade de São Paulo. 2004.

CAMPOS, N.; SOUSA, R.O. **Planos de bacias hidrográficas**. Gestão das Águas: princípios e práticas. Porto Alegre: ABRH 2.ed, p. 57-68. 2003.

CHOW, V.T. **Handbook of applied hydrology**. New York: McGraw-Hill Book, v.1. 1964.

CRAWFORD, N.H.; LINSLEY, R.K. **Digital simulation in hydrology, Stanford Watershed Model IV**. Department of Civil Engineering, Stanford University, Technical Report 39. 1966.

EAGLESON, P. **The emergence of global-scale hydrology**. Water Resources Research, v.22, 46S-58S. 1986.

ENOMOTO, C.F. **Método para elaboração de mapas de inundação : estudo de caso na bacia do Rio Palmital, Paraná**. Paraná, 2004. Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Ambientais). Universidade Federal do Paraná. Paraná. 2004.

GALVAO, C.O.; NOBRE, P.; BRAGA, A.C.F.M.; OLIVEIRA, K.F. de; SILVA, R.M. da; SILVA, S.R. da; GOMES FILHO, M.F.; SANTOS, C.A.G.; LACERDA, F.F.; MONCUNILL, D. **Climatic predictability, hydrology and water resources over Nordeste Brazil**. Iahs Publication Series, Wallingford, n. 295, p. 211-220. 2005.

GROSSMAN, A.; MORLET, J. **Decomposition of Hardy functions into square integrable wavelets of constant shape**. SIAM J. Math. 15, p. 723-736. 1984.

HR WALLINGFORD. DFID (Department for International Development). Disponível em: [http://www.hrwallingford.co.uk/downloads/projects/floods\\_sa/portuguese/EX5115\\_%20Guia\\_nacional\\_risco\\_cheias.pdf](http://www.hrwallingford.co.uk/downloads/projects/floods_sa/portuguese/EX5115_%20Guia_nacional_risco_cheias.pdf). Acesso em: dezembro de 2005.

IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). **Base de informações por setor sensitário – João Pessoa, Estado da Paraíba**. Censo Demográfico 2000. Rio de Janeiro. Disponível em CD-ROM. 2002.

KULL, D.; KRÄHENBÜHI, J. **Barragens**. Swiss Reinsurance Company, Zurique. 2003.

LEOPOLD, L.B. **Hydrology for urban planning: a guide book on the hydrologic effects on urban land use**. Circular. United States Department of the interior. Geological Survey, n. 554, p. 1-18. 1968.

NASCIMENTO, G.A.; ORTH, N.M. **Adequate Mapping-a non structural Measure on urban drainage.** In: International Workshop On Non Structural Flood Control in Urban Areas, 22 a 24 de Abril, São Paulo, 1998. Anais... São Paulo, 1998.CD-ROM

O'CONNELL, P.E.; TODINI, E. **Modeling of rainfall, flow and mass transport in hydrological systems: an overview.** Journal of Hydrology, 175p, p. 3-16. 1996.

OLIVEIRA, A.C.S.; VIEIRA, M.C.B.; TOBLER, M.D; CINTRA, L.M. **Zoneamento e Diagnóstico das Áreas Susceptíveis a Inundações no Município de Juiz de Fora/MG.** In: Congresso Brasileiro de Geógrafos, 6, Goiânia, 2004. Anais... Goiânia, 2004. CD-ROM..

REZENDE, B.; TUCCI, C.E.M. **Análise das Inundações em Estrela: Relatório Técnico. Estrela, Prefeitura Municipal.** 30p. 1979.

SANTOS, C.A.G.; GALVÃO, C.O.; SUZUKI, K.; TRIGO, R.M. **Matsuyama city rainfall data analysis using wavelet transform.** in Ann. J. Hydraul. Engng, JSCE, 45, p. 211-216. 2001.

SANTOS, C.A.G.; GALVÃO, C.O.; SUZUKI, K.; TRIGO, R.M. **Application of Wavelet analysis to hydrological regionalization in transboundary basins.** In First International Symposium on Transboundary Waters Management, México AMH IMTA, v. 10, p. 479-486. 2002.

SANTOS, C. A. G.; SUZUKI, K.; WATANABE, M. **Modificação no Algoritmo Genético SCE-UA e sua Aplicação a um Modelo Hidrossedimentológico.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, v. 8, n. 1, p. 137-146. 2003.

SANTOS, C.A.G.; BARBOSA, F.A.R. **Caracterização da problemática de inundação na bacia do rio Mamanguape/PB.** In VI Encontro Nacional de Águas Urbanas, Belo Horizonte/MG, maio 2005. Anais... Belo Horizonte, 2005. CD-ROM.

SILVA, R.M. **Previsão hidrossedimentológica numa bacia periurbana através do acoplamento de modelos climáticos e hidrológicos.** João Pessoa, 2005. 171p. Dissertação (Mestrado - Engenharia Urbana). Universidade Federal da Paraíba. Paraíba. 2005.

SMITH, R.E.; CORRADINI, C.; MELONE, F. **Modeling infiltration during complex rainfall sequences.** Water Resources Research, 30 (10), p. 2777-2784. 1994.

SOROOSHIAN, S.; DRACUP, J.A. **Stochastic parameter estimation procedures for hydrologic rainfall-runoff models: correlated and heteroscedastic error cases.** Water Resources Research, v.16, p. 430-442. 1980.

SUDERSHA. **Medidas não-estruturais. Plano Diretor de Drenagem Urbana da Região Metropolitana de Curitiba.** CH2MHILL Engenharia do Brasil Ltda. 2002.

TORRENCE, C. & COMPO, G.P. **A practical guide to wavelet analysis.** Bull. Am. Met. Soc. 79 (1), 61-78. 1998.

TUCCI, C.E.M. **Inundações Urbanas.** Porto Alegre: ABRH/Editora da Universidade/UFRGS, p. 16-36. 1995.

TUCCI, C.E.M. **Estudos hidrológicos-hidrodinâmicos do rio Iguaçu na RMC.** Curitiba: Secretaria de Estado do Planejamento e Coordenação Geral do Paraná. v.2. 1996.

TUCCI, C.E.M. **Modelos Hidrológicos.** Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 669p. 1998.

TUCCI, C.E.M. **Inundações e drenagem urbana.** Inundações urbanas na América do Sul. Porto Alegre: ABRH, p. 45-150. 2003.

TUCCI, C.E.M. **Águas urbanas.** Inundações urbanas na América do Sul. Porto Alegre: ABRH, 32p. 2003.

TUCCI, C.E.M. **Gerenciamento integrado das inundações no Brasil.** Rega – Revista de Gestão de Água na América Latina. Santiago: GWP/South América, v.1, n.1. jan-jun. 2004.

WOOLHISER, D. A., SMITH, R. E. & GOODRICH, D.C. **Kineros, a kinematic runoff and erosion model: documentation and user manual.** U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, ARS-77, 1990.

XAVIER, L.N.R. **Análise da incerteza causada pela representação da precipitação no modelo Topmodel**. Rio de Janeiro, 2002. v. 8, 124 p. (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2002.

## **APÊNDICE A**

PARÂMETROS DOS ELEMENTOS DISCRETIZADOS DA SUB-BACIA DO RIO  
MULUNGU

Quadro A. 1 - Modelo de entrada dos dados de precipitação

```
BEGIN RG01
  N = 5
      TIME          DEPTH
      !            (min)          (mm)
      0.0           0.00
      15.0          0.05
      35.0          2.40
      105.0         2.42
      115.0         3.02
END
```

Quadro A. 2 - Dados de entrada dos parâmetros globais

```
BEGIN GLOBAL
  CLEN = 29364, UNITS = METRIC
  DIAMS = .005, .05, .25 ! mm
  DENSITY = 2.65, 2.60, 2.60 ! g/cc
  TEMP = 33 ! deg C
  Nele = 24
END GLOBAL
```



Quadro A.3 – Parâmetros utilizados pelo modelo kineros2 dos elementos planos e canais discretizados da sub-bacia de Mulungu

Elemento	Parâmetros																	
	$\eta$	$C_v$	T	Sat	Relief	Spacing	$K_s$	G (mm)	Dist	Por	Rock	SS <sub>1</sub>	SS <sub>2</sub>	0,005	Fract 0,05	0,25	Splash	Coh
1	0,5	0,8	300	1,2	2	0,3	0,8	450	0,45	0,05	0	-	-	0,2	0,6	0,2	200	0,50
2	0,5	0,8	300	1,2	2	0,3	1,8	450	0,45	0,05	0	-	-	0,2	0,6	0,2	50	0,50
3	0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,42	0,80	0,0	0,4	0,6	-	0,01
4	0,5	0,8	300	1,2	2	0,3	0,8	450	0,45	0,05	0	-	-	0,2	0,6	0,2	50	0,50
5	0,5	0,8	300	1,2	2	0,3	0,8	450	0,45	0,05	0	-	-	0,2	0,6	0,2	50	0,50
6	0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,42	0,80	0,0	0,4	0,6	-	0,01
7	0,5	1,5	300	1,2	2	0,3	0,8	450	0,45	0,05	0	-	-	0,2	0,6	0,2	50	0,50
8	0,5	0,8	300	1,2	2	0,3	0,8	450	0,45	0,05	0	-	-	0,2	0,6	0,2	50	0,50
9	0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,42	0,80	0,0	0,4	0,6	-	0,01
10	0,5	0,8	300	1,2	2	0,3	0,8	450	0,45	0,05	0	-	-	0,2	0,6	0,2	50	0,50
11	0,5	0,8	300	1,2	2	0,3	0,8	450	0,45	0,05	0	-	-	0,2	0,6	0,2	50	0,50
12	0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,42	0,80	0,0	0,4	0,6	-	0,01
13	0,5	0,8	300	1,2	2	0,3	0,8	450	0,45	0,05	0	-	-	0,2	0,6	0,2	50	0,50
14	0,5	0,8	300	1,2	2	0,3	0,8	450	0,45	0,05	0	-	-	0,2	0,6	0,2	50	0,50
15	0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,42	0,80	0,0	0,4	0,6	-	0,01
16	0,5	0,8	300	1,2	2	0,3	0,8	450	0,45	0,05	0	-	-	0,2	0,6	0,2	50	0,50
17	0,5	0,8	300	1,2	2	0,3	0,8	450	0,45	0,05	0	-	-	0,2	0,6	0,2	50	0,50
18	0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,42	0,80	0,0	0,4	0,6	-	0,01
19	0,5	0,8	300	1,2	2	0,3	0,8	450	0,45	0,05	0	-	-	0,2	0,6	0,2	50	0,50
20	0,5	0,8	300	1,2	2	0,3	0,8	450	0,45	0,05	0	-	-	0,2	0,6	0,2	50	0,50
21	0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,42	0,80	0,0	0,4	0,6	-	0,01
22	0,5	0,8	300	1,2	2	0,3	0,8	450	0,45	0,05	0	-	-	0,2	0,6	0,2	50	0,50
23	0,5	0,8	300	1,2	2	0,3	0,8	450	0,45	0,05	0	-	-	0,2	0,6	0,2	50	0,50
24	0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,42	0,80	0,0	0,4	0,6	-	0,01

## **APÊNDICE B**

CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DOS ELEMENTOS DISCRETIZADOS DA SUB-  
BACIA DO RIO MULUNGU

Quadro B.1 – Características geométricas dos elementos planos e canais e contribuições laterais e superiores da sub-bacia de Mulungu

Número do elemento	Área (m <sup>2</sup> )	Largura (m)	Comprimento (m)	Declividade (m/m)	Elemento anterior		
					Superior	Esquerda	Direita
1	146370000	29364	4735	0,013	-	-	-
2	75400000	29364	2054	0,018	-	-	-
<b>3</b>	-	-	29364	<b>0,017</b>	-	<b>1</b>	<b>2</b>
4	207690000	43457	4301	0,017	-	-	-
5	105460000	43457	1941	0,022	-	-	-
<b>6</b>	-	-	43457	<b>0,012</b>	-	<b>4</b>	<b>5</b>
7	10920000	3716	2498	0,134	-	-	-
8	16620000	3716	4025	0,036	-	-	-
<b>9</b>	-	-	3716	<b>0,013</b>	<b>3, 6</b>	<b>8</b>	<b>7</b>
10	19120000	9446	1721	0,040	-	-	-
11	38440000	9446	3663	0,024	-	-	-
<b>12</b>	-	-	9446	<b>0,032</b>	-	<b>10</b>	<b>11</b>
13	15280000	9541	1361	0,025	-	-	-
14	14720000	9541	1311	0,023	-	-	-
<b>15</b>	-	-	9541	<b>0,010</b>	-	<b>14</b>	<b>13</b>
16	47330000	14852	2868	0,019	-	-	-
17	19990000	14852	1144	0,036	-	-	-
<b>18</b>	-	-	14852	<b>0,003</b>	<b>9, 12, 15</b>	<b>17</b>	<b>16</b>
19	91200000	35372	2192	0,019	-	-	-
20	145720000	35372	3708	0,018	-	-	-
<b>21</b>	-	-	35372	<b>0,008</b>	-	<b>20</b>	<b>19</b>
22	20290000	12563	1373	0,006	-	-	-
23	29090000	12563	1968	0,036	-	-	-
<b>24</b>	-	-	12563	<b>0,002</b>	<b>18, 21</b>	<b>23</b>	<b>22</b>