



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

CARLOS EDUARDO DE OLIVEIRA DANTAS

**PREVISÃO E CONTROLE DE INUNDAÇÕES EM MEIO URBANO
COM SUPORTE DE INFORMAÇÕES ESPACIAIS DE ALTA RESOLUÇÃO**

RECIFE
2012

CARLOS EDUARDO DE OLIVEIRA DANTAS

**PREVISÃO E CONTROLE DE INUNDAÇÕES EM MEIO URBANO
COM SUPORTE DE INFORMAÇÕES ESPACIAIS DE ALTA RESOLUÇÃO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil do Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial à obtenção do grau de Doutor em Ciências em Engenharia Civil, Área de Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. José Almir Cirilo, D.Sc.

Coorientador: Prof. Alfredo Ribeiro Neto, D.Sc.

RECIFE
2012

Catálogo na fonte
Bibliotecária: Rosineide Mesquita Gonçalves Luz / CRB4-1361 (BCTG)

D192p Dantas, Carlos Eduardo de Oliveira.
Previsão e controle de inundações em meio urbano com suporte de informações espaciais de alta resolução / Carlos Eduardo de Oliveira Dantas. – Recife: O Autor, 2012.
221f., il., figs., gráfs., tabs.
Orientador: Prof. José Almir Cirilo, D.Sc.
Coorientador: Prof. Alfredo Ribeiro Neto, D.Sc.
Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2012.
Inclui Referências.
1. Engenharia Civil. 2. Previsão e Controle de Inundações. 3. Informações Espaciais de Alta Resolução. 4. Modelagem Hidrológico-Hidrodinâmica. 5. Bacia do Rio Una. 6. LiDAR. I. Cirilo, José Almir (Orientador). II. Ribeiro Neto, Alfredo (Coorientador). III. Título.

624 CDD (22.ed)

UFPE/BCTG-2012 / 254

CARLOS EDUARDO DE OLIVEIRA DANTAS

**PREVISÃO E CONTROLE DE INUNDAÇÕES EM MEIO URBANO
COM SUPORTE DE INFORMAÇÕES ESPACIAIS DE ALTA RESOLUÇÃO**

Tese aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil do Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial à obtenção do grau de Doutor em Ciências em Engenharia Civil, Área de Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos.

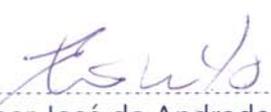
Aprovada em 29 de junho de 2012 pela seguinte Banca Examinadora:



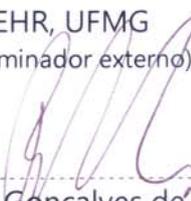
Prof. José Almir Cirilo, D.Sc.
DECIVIL, UFPE
(orientador)



Profa. Ana Lúcia Bezerra Candeias, D.Sc.
DECART, UFPE
(examinador externo)



Prof. Eber José de Andrade Pinto, D.Sc.
EHR, UFMG
(examinador externo)



Prof. José Roberto Gonçalves de Azevedo, Ph.D.
DECIVIL, UFPE
(examinador interno)



Prof. Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral, Ph.D.
DECIVIL, UFPE
(examinador interno)

RECIFE
2012

A Natália, minha esposa, dedico.

A Deus, ofereço todas as páginas deste trabalho, com a certeza de que apenas através Dele este sonho pôde se tornar possível.

Ao Estado de Pernambuco, entrego minha contribuição, com a esperança de que possa de alguma forma melhorar a vida das pessoas que habitam a bacia hidrográfica do rio Una.

AGRADECIMENTOS

A **Deus**, meu guia, infinita fonte de força e inspiração.

Ao **Prof. José Almir Cirilo**, meu orientador, por toda ajuda, amizade e conhecimentos transmitidos, por sempre acreditar que “chegaríamos até aqui”, por ser imprescindível¹.

Ao **Prof. Alfredo Ribeiro Neto**, meu coorientador, pela amizade, parceria e proximidade, por todas as suas essenciais contribuições durante todo o trabalho.

Ao **Prof. Eber José de Andrade Pinto**, pesquisador da CPRM e professor do EHR/UFMG, pelos ensinamentos transmitidos fundamentais ao trabalho.

Aos **Professores do Grupo de Recursos Hídricos da UFPE** (GRH/UFPE), pela amizade e conhecimentos transmitidos, em especial ao **Prof. Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral**, à **Profa. Suzana Maria Gico Lima Montenegro** e ao **Prof. José Roberto Gonçalves de Azevedo**.

Como também aos **Professores do Departamento de Engenharia Cartográfica da UFPE** (DECART/UFPE), com o quais convivi na fase de aquisição de créditos nas disciplinas, em especial à **Profa. Ana Lúcia Bezerra Candeias** e à **Profa. Andrea Flávia Tenório Carneiro**.

Aos **Colegas do PPGEC/UFPE**, **Edilson Raimundo Silva** e **Keyla Almeida dos Santos**, pela valiosa colaboração.

À **Secretaria do PPGEC/UFPE**, em nome da Secretária da Coordenação **Andréa Negromonte Vieira Matoso**, pelo apoio administrativo e disponibilidade.

¹ Uma referência ao Poema “Os que lutam” do alemão Eugen Berthold Friedrich Brecht (1898-1956).

À **Superintendência Regional de Recife da CPRM** (SUREG-RE/CPRM), em nome do Superintendente Regional **José Wilson de Castro Timóteo**, do Gerente de Relações Institucionais e Desenvolvimento **José Pessoa Veiga Júnior**, do Gerente de Hidrologia e Gestão Territorial **Adriano da Silva Santos** e do Assessor da Diretoria de Hidrologia e Gestão Territorial **Fernando Antônio Carneiro Feitosa**, pelo grande empenho e importante ajuda em minha participação no Programa de *Capacitação Técnica e Treinamento* (PCTT), modalidade Capacitação Técnica, junto ao *Comitê de Capacitação Técnica e Treinamento* (CAPTEC) da CPRM.

Aos **Colegas da SUREG-RE/CPRM**, pelo agradável convívio e por todas as palavras de incentivo e apoio, e em especial, à Pesquisadora em Geociências **Cristiane Ribeiro de Melo** e aos Técnicos em Geociências **Rodrigo Tadeu Diniz Bezerra de Albuquerque** e **Márcio Ricardo de Carvalho Silveira**, pela ajuda com dados utilizados, à Técnica em Geociências **Joyce Anita de Oliveira Hirose**, pelo apoio administrativo, e ao Pesquisador em Geociências **Fábio Araújo da Costa** pela valiosa colaboração nos levantamentos de campo realizados.

À **Secretaria de Recursos Hídricos e Energéticos de Pernambuco** (SRHE-PE), em nome do Ex-secretário de Recursos Hídricos e Energéticos **João Bosco de Almeida**, e do Ex-secretário Executivo de Recursos Hídricos e atual Secretário de Recursos Hídricos e Energéticos **José Almir Cirilo**, pela cooperação técnico-científica nos trabalhos da pesquisa.

À **Agência Pernambucana de Águas e Clima** (APAC), em nome do Diretor Presidente **Marcelo Cauás Asfora**, pelo fornecimento de dados hidrológicos utilizados na pesquisa.

Ao **Instituto de Tecnologia de Pernambuco** (ITEP), em nome do Diretor Presidente **Frederico Cavalcanti Montenegro**, pelo fornecimento de dados hidrológicos utilizados na pesquisa.

À **Agencia Nacional de Águas** (ANA), pelo fornecimento de dados hidrológicos utilizados na pesquisa.

Ao **Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico** (CNPq), pelo financiamento da pesquisa através da concessão da bolsa de Pós-graduação no início desta jornada.

À **Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais** (CPRM), em nome do Diretor de Hidrologia e Gestão Territorial (DHT) **Thales de Queiroz Sampaio** e do Chefe do Departamento de Hidrologia (DEHID) **Frederico Cláudio Peixinho**, através do PCTT/CAPTEC, pela liberação total das minhas atividades profissionais durante o período dos últimos meses da pesquisa viabilizando a conclusão do trabalho.

A meus pais, **Paulo Jorge Carneiro Dantas** e **Maria Estela de Oliveira Dantas**, minha fonte de fé, exemplos de vida e espelho do que sou hoje. E a minha **família**, meu "porto seguro", em especial, a meus irmãos, **Paulo Jorge Júnior**, **Jorge Adriano**, **Paula Adriana** e **Rita Carla**, e primos, **Leonardo**, **Bruno**, **Mariana** e **Rodrigo**, afilhado, **Jorge Pedro**, pela amizade verdadeira e para todas as horas. Como também, a minha cunhada, **Taciana Velasco**, pela amizade e ajuda com a revisão do texto em língua estrangeira.

Um agradecimento especial, a **Natália Alves Velasco Dantas**, minha esposa, pelo amor verdadeiro, incondicional e para toda a vida, por todo apoio e incentivo, principalmente nesse difícil período de pesquisa e conclusão de trabalho.

Enfim, a todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho, bem como àqueles que simplesmente acreditaram em mim.

"If I have seen further it is by standing on ye sholders of Giants."

(Transcrição do texto original de uma carta de *Isaac Newton* para *Robert Hooke* em 5 fev. 1676)

“Lá vai o rio Una vai correndo a galopar
Lá vai o rio Una vai correndo para o mar

É que ele nasce pelas bandas de Capoeiras
Vai descendo as cachoeiras
Ligeiro que nem o vento
Chega em São Bento ele sorri de alegria
A correnteza ta dizendo
Se eu pudesse eu não descia

Lá vai o rio Una vai correndo a galopar
Lá vai o rio Una vai correndo para o mar

Pede licença e entra em Cachoeirinha
É quando vê quatro vaquinhas
Bebendo do seu produto
Se eu pudesse
Eu demorava um tiquinho
Mas vou passar em Altinho
Nem que seja um minuto
chega em Altinho
Ele se alegra e se agita
Quando vê a moça bonita
Na barreira matutina
Para Agrestina ele corre com emoção
As águas batendo nas pedras
Até parece uma canção

Lá vai o rio Una vai correndo a galopar
Lá vai o rio Una vai correndo para o mar

Chega em Palmares
Ele mata a saudade
Passa dentro da cidade
valente como um leão
Em Água Preta ele deixa de ser arisco
Respeita o padre Francisco
e pede a sua benção
Aí ele entristece
e bota pra chorar
Se despede de Barreiros
E emboca pra dentro do mar”

(RIO UNA, música de Jorge de Altinho²)

*“Gerar e difundir o conhecimento geológico e hidrológico básico
necessário para o desenvolvimento sustentável do Brasil.”*

(Missão do Serviço Geológico do Brasil – CPRM)

² ALTINHO, Jorge de. Rio Una. In: JORGE DE ALTINHO. **Meu Cantar**. São Paulo: RCA, p1981. 1 disco sonoro. Lado B, faixa 2.

RESUMO

Resumo da Tese apresentada ao PPGEC/UFPE como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.).

PREVISÃO E CONTROLE DE INUNDAÇÕES EM MEIO URBANO COM SUPORTE DE INFORMAÇÕES ESPACIAIS DE ALTA RESOLUÇÃO

CARLOS EDUARDO DE OLIVEIRA DANTAS

Junho/2012

Orientador: Prof. José Almir Cirilo, D.Sc.

Coorientador: Prof. Alfredo Ribeiro Neto, D.Sc.

DANTAS, C. E. de O. **Previsão e Controle de Inundações em Meio Urbano com Suporte de Informações Espaciais de Alta Resolução**. 2012. 221 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2012.

A pesquisa tem como objetivo geral aprimorar a previsão e o controle de inundações com suporte de informações espaciais de alta resolução para o planejamento territorial, com foco na proteção das cidades. De forma integrada a este objetivo, são abordados os avanços decorrentes da utilização de informações espaciais mais precisas na modelagem dos processos hidrológicos e hidrodinâmicos por ocasião de eventos de cheia, bem como o ganho da qualidade potencializado pelas informações de alta resolução espacial no aprimoramento de projetos, no monitoramento, no planejamento de obras de contenção de cheias e nas intervenções urbanas para minorar a ocorrência de inundações. O trabalho utiliza o *mapeamento digital a laser*, a partir de dados LiDAR, e as *ortofotos digitais*, gerados após as inundações ocorridas em junho de 2010, para a região mais atingida no Estado de Pernambuco, gerando produtos cartográficos de alta precisão. A partir do histórico de precipitações na bacia hidrográfica do rio Una, em Pernambuco, foi feito um estudo de regionalização e classificação das chuvas intensas, buscando definir padrões da distribuição de chuvas que geram as inundações na bacia. Com base nessas abordagens, as informações espaciais são utilizadas em modelos hidrológicos e hidrodinâmicos, juntamente com os dados hidrológicos levantados, na composição de modelo para alerta de cheias e geração de cenários de inundação em cidades da bacia hidrográfica do rio Una. Como resultado, demonstra-se que a determinação de padrões de precipitação explica adequadamente a ocorrência dos principais eventos de cheia, possibilitando a previsão e o acompanhamento das inundações a partir da previsão meteorológica e do monitoramento pluviométrico.

Palavras-chave: Previsão e controle de inundações. Informações espaciais de alta resolução. Modelagem hidrológico-hidrodinâmica. Bacia do rio Una. LiDAR.

ABSTRACT

Abstract of Thesis presented to PPGECC / UFPE as part of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.).

FORECASTING AND FLOOD CONTROL IN URBAN AREA WITH SUPPORT OF SPATIAL INFORMATION HIGH-RESOLUTION

CARLOS EDUARDO DE OLIVEIRA DANTAS

June/2012

Advisor: Prof. José Almir Cirilo, D.Sc.

Co-advisor: Prof. Alfredo Ribeiro Neto, D.Sc.

Dantas, C. E. O., 2012. *Forecasting and Flood Control in Urban Area with Support of Spatial Information High-resolution*. Doctoral dissertation (Doctorate in Civil Engineering), Federal University of Pernambuco, Recife, Brazil, 221 pp.

Overall, the research aims to improve the forecasting and flood control; focusing on the protection of cities, while using the support of the high-resolution spatial information for territorial planning. Integrating the above goal, advances arising from the use of spatial information is addressed providing more precise information on hydrological modeling and hydrodynamic processes on the flood events. The potential qualitative gain from high-resolution spatial enhancement are evident in projects, in monitoring, in flood containment planning, and urban interventions to mitigate flood occurrence. The work utilized the digital laser mapping from LiDAR data and the digital Orthophotos, generated after the floods occurred in June 2010, for the most attained region in the state of Pernambuco, generating cartographic products of high precision. From the historic of precipitation in the Una River basin, in Pernambuco, a study was done, a regionalization and a classification of rainstorms, which aims to define patterns of rainfall distribution that generate floods in the basin. Based on these approaches, the spatial information is used in hydrological and hydrodynamic models. Along with the hydrological data collection in the composition of the flood alert and the flood scenario in cities like Una River basin. As a result, it is demonstrated that the determination of precipitation patterns adequately explain the occurrence of the main flood events which enables the forecasting and the monitoring of flooding from the weather forecasting and monitoring of the rainfall.

Keywords: Forecasting and flood control. Spatial information high-resolution. Hydrological-hydrodynamic modeling. Una River basin. LiDAR.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Desastres naturais registrados no globo no período de 1900 a 2011. Fonte: OFDA/CRED (2012) [57].	26
Figura 2 – Aumento da incidência das inundações no período de 1950 a 2000. Fonte: Adaptado de Millennium Ecosystem Assessment (2005) [54].	29
Figura 3 – Centro de Palmares em 19/06/2010. Foto de Roberto Pereira/SEI. Fonte: Yahoo! Inc. (2010) [96].	37
Figura 4 – Ponte Nova, BR-101 acesso à Água Preta, em Palmares em 19/06/2010. Foto de Roberto Pereira/SEI. Fonte: Yahoo! Inc. (2010) [96].	37
Figura 5 – Inundação do rio Una em Palmares em 19/06/2010. Foto de Roberto Pereira/SEI. Fonte: Yahoo! Inc. (2010) [96].	38
Figura 6 – Viaduto Profa. Lúcia Paiva em Palmares. (a) No dia 19/06/2010. Foto de Roberto Pereira/SEI. Fonte: Yahoo! Inc. (2010) [96]. (b) No dia 23/06/2010. Foto de Antônio Cruz – Agência Brasil. Fonte: EBC (2010) [23].	38
Figura 7 – Esquema do Levantamento LiDAR. Fonte: Webster et al. (2004) [92].	47
Figura 8 – (a) Mapas on-line de previsão e alerta de inundações em New Brunswick. (b) Vista 3D da enchente ocorrida em 1973 em Fredericton.	51
Figura 9 – Mapas Digitais on-line de Inundação no Estado da Carolina do Norte.	54
Figura 10 – Mapas Digitais on-line de Inundação no Estado de Maine.	54
Figura 11 – Diferença entre enchente, inundação e alagamento. Fonte: Adaptado de Goerl e Kobiyama (2005) [32].	56

Figura 12 – O modelo dentro das fases de um estudo. Fonte: Adaptado de Tucci (2005) [83].	59
Figura 13 – O Ciclo Hidrológico. Fonte: USGS (2012) [88].	62
Figura 14 – O Modelo SMAP. Fonte: Souza (2010) [80] adaptado de Lopes (1999) [46].	65
Figura 15 – Configuração tridimensional do esquema generalizado de Preissmann. Fonte: Baptista, Coelho e Cirilo (2003) [4].	72
Figura 16 – Esquema de discretização de um trecho modelado no HEC-RAS. Fonte: Brunner (2010) [6].	72
Figura 17 – Esquema dos procedimentos de cálculo do SPI. Fonte: Weschenfelder, Pickbrenner e Pinto (2011) [95].	92
Figura 18 – Esquema dos procedimentos de cálculo dos limiares de precipitação. Fonte: Weschenfelder, Pickbrenner e Pinto (2011) [95].	94
Figura 19 – Localização espacial da bacia do rio Una com seus principais afluentes (destaque para as Mesorregiões das quais a bacia faz parte).	96
Figura 20 – Mapa de Vegetação da bacia do rio Una. Fonte: CPRM (2011a) [16].	97
Figura 21 – Diagrama Unifilar para a bacia do rio Una	99
Figura 22 – Mapa de Divisão Político Administrativa da bacia do rio Una.	101
Figura 23 – Mapa de Isoietas das Médias de Totais Anuais da bacia do rio Una. Fonte: CPRM (2011b) [17].	104
Figura 24 – Mapa de Hipsometria da bacia do rio Una. Fonte: INPE (2008) [42].	106
Figura 25 – Mapa de Relevo da bacia do rio Una. Fonte: CPRM (2012) [18].	107
Figura 26 – Mapa Geológico Simplificado da bacia do rio Una. Fonte: CPRM (2011a) [16].	109
Figura 27 – Mapa de Solos da bacia do rio Una.	112

Figura 28 – Delineamento da mancha de inundação em Palmares da FIDEM. Fonte: Pernambuco (2000) [59].	115
Figura 29 – Mancha de inundação de 2000 em Palmares do levantamento da FIDEM.	115
Figura 30 – Mancha de inundação de 2010 do levantamento do Corpo de Bombeiros.	117
Figura 31 – Fotos das marcas de cheia levantadas em Palmares em 2011. Fonte: Autor.	118
Figura 32 – Fotos do levantamento em Palmares em 2011. Fonte: Autor.	118
Figura 33 – (a) RN _{Trilho} utilizada como base do levantamento. Fonte: Autor. (b) RN 384K de Rede Altimétrica Brasileira do IBGE. Fonte: Autor.	119
Figura 34 – Mancha de inundação de 2011 do levantamento da UFPE/CPRM.	120
Figura 35 – Localização das estações pluviométricas da SUDENE.	122
Figura 36 – Localização das estações pluviométricas da HIDROMET-ITEP.	125
Figura 37 – Localização das estações PCDs da HIDROMET-ITEP.	125
Figura 38 – Localização das estações pluviométricas da ANA-CPRM.	127
Figura 39 – Localização das estações pluviométricas da ANA-CPRM.	127
Figura 40 – Constantes Harmônicas para a estação Tamandaré em Pernambuco. Fonte: Salles, Bentes e Santos (2000) [73].	130
Figura 41 – Princípios e componentes de um sistema ALS. Fonte: Giongo et al. (2010) [31].	133
Figura 42 – Característica dos diferentes sistemas ALS. (a) Sistema de ondas contínuas (<i>full-waveform</i>). (b) Sistema de pulsos (<i>discrete echo</i>). Fonte: Giongo et al. (2010) [31].	135
Figura 43 – Área levantada na bacia do rio Una do LACTEC (2011) [44].	138

Figura 44 – Configuração das antenas a bordo do Endeavour para a missão SRTM (detalhe para o mastro que permitiu a interferometria na mesma órbita). Fonte: USGS (2003) [87].	143
Figura 45 – Distribuição da cobertura e número de passagens da SRTM. Fonte: Valeriano (2004) [89].	143
Figura 46 – Etapas processamento dos dados SRTM do projeto TOPODATA. Fonte: INPE (2008) [42].	145
Figura 47 – Elementos geométricos representativos do sistema no HEC-RAS. Fonte: Ribeiro Neto, Cirilo e Dantas (2011) [71].	148
Figura 48 – Delineamento das margens e eixo do rio a partir das ortofotos digitais.	149
Figura 49 – Dados LiDAR na extração das seções transversais (detalhe para o espaçamento de 100 m entre as seções).	149
Figura 50 – Discretização da bacia do rio Una no HEC-HMS. Fonte: Ribeiro Neto, Cirilo e Dantas (2011) [30].	150
Figura 51 – Uso do TOPODATA (INPE, 2008) [42] na modelagem hidrológica.	151
Figura 52 – Esquema de representação do escoamento na bacia no HEC-HMS. Fonte: Adaptado de Feldman (2000, apud RIBEIRO NETO; CIRILO; DANTAS, 2011) [71].	152
Figura 53 – Fases da modelagem no HEC-HMS. Fonte: Santos, Cirilo e Ribeiro Neto (2012) [74].	153
Figura 54 – Hidrogramas observado e calculado com o modelo HEC-HMS. (a) Evento de jan-2004; (b) Evento de jun-2005.	157
Figura 55 – Esquema dos trechos modelados no HEC-RAS e a estação de calibração.	158
Figura 56 – Detalhe de uma seção transversal no modelo hidrodinâmico. Fonte: Ribeiro Neto, Cirilo e Dantas (2011) [71].	159

Figura 57 – Hidrogramas observado e calculado em Palmares para o evento de ago-2000 a partir modelo hidrodinâmico.	161
Figura 58 – Localização das barragens do sistema de contenção de inundações. Fonte: Pernambuco (2011) [63].	163
Figura 59 – Curva cota-área-volume a partir do MDT LiDAR. (a) Barragem Serro Azul. (b) Barragem Igarapeba. (c) Barragem Painelas II. (d) Barragem Gatos.	164
Figura 60 – Vista 3D da representação da bacia hidráulica de barragens planejadas para controle de inundações na bacia do rio Una com uso do mapeamento do LACTEC (2011) [44]. (a) Serro Azul. (b) Painelas II.	164
Figura 61 – Modelagem da propagação da onda de cheia em Palmares.	165
Figura 62 – Trecho objeto de intervenção em Palmares com áreas de corte e aterro ressaltadas.	166
Figura 63 – Curva-chave da modelagem para a estação de Palmares da ANA/CPRM.	167
Figura 64 – Localização das estações pluviométricas da análise de precipitações.	169
Figura 65 – Região homogênea da análise de precipitações.	170
Figura 66 – Diagrama Curtose-L x Assimetria-L.	171
Figura 67 – Estações pluviométricas utilizadas no cálculo do fator <i>index-flood</i>	174
Figura 68 – Classificação SPI para duração de 1 dia da série da estação Palmares (25).	178
Figura 69 – Classificação SPI para chuva de duração de 5 dias do evento de 2010.	178
Figura 70 – Diagrama CV-L x Assimetria-L (detalhe para a definição de uma região formada pelas estações no círculo pontilhado	

vermelho e uma região formada pelas estações no círculo contínuo azul).....	181
Figura 71 – Regiões homogêneas da análise de vazões.	182
Figura 72 – Diagrama Curtose-L x Assimetria-L.....	184
Figura 73 – Classificação da bacia em regiões fisiográficas pelas PCDs existentes.....	188
Figura 74 – Ferramenta VBA para a geração do arquivo de entrada para simulação de cenários.....	189
Figura 75 – Identificação do núcleo de precipitações para o evento com dados observados em agosto de 2000 configurando o cenário 1 modelado.	191
Figura 76 – Identificação do núcleo de precipitações para o evento com dados observados em fevereiro de 2004 configurando o cenário 2 modelado.....	192
Figura 77 – Identificação do núcleo de precipitações para o evento com dados observados em junho de 2010 configurando o cenário 3 modelado.....	193
Figura 78 – Previsão da mancha de inundação a partir do cenário 1 em Palmares (detalhe para a comparação da previsão com o levantamento na margem esquerda).	196
Figura 79 – Previsão da mancha de inundação a partir do cenário 1 em Barreiros (detalhe para a comparação da previsão com o levantamento).	197
Figura 80 – Previsão da mancha de inundação a partir do cenário 2 em Palmares.	198
Figura 81 – Previsão da mancha de inundação a partir do cenário 2 em Barreiros.....	199

Figura 82 – Previsão da mancha de inundação a partir do cenário 3 em Palmares (comparação com a estimativa decorrente do levantamento dos Bombeiros).	200
Figura 83 – Previsão da mancha de inundação a partir do cenário 3 em Barreiros.....	201
Figura 84 – Vista 3D do alcance da inundação no cenário 3 na cidade de Palmares.	202
Figura 85 – Vista 3D do alcance da inundação no cenário 3 na cidade de Barreiros.....	202

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores críticos da medida de discordância (D_j)	83
Tabela 2 – Classes de precipitações e probabilidades associadas.....	93
Tabela 3 – Classes de precipitações diárias acumuladas máximas anuais	93
Tabela 4 – Relação dos Municípios de Pernambuco da bacia do rio Una.....	102
Tabela 5 – Estações pluviométricas da SUDENE utilizadas no estudo	121
Tabela 6 – Estações pluviométricas da HIDROMET-ITEP utilizadas no estudo.....	123
Tabela 7 – PCDs da HIDROMET-ITEP utilizadas no estudo.....	124
Tabela 8 – Estações pluviométricas da ANA-CPRM utilizadas no estudo	126
Tabela 9 – Estações fluviométricas da ANA-CPRM utilizadas no estudo.....	126
Tabela 10 – Critérios do PEC.....	139
Tabela 11 – Especificações do sistema ALS modelo ALTM 2050 da Optech.....	141
Tabela 12 – Estações pluviométricas utilizadas no estudo.....	168
Tabela 13 – Distribuições selecionadas na análise de precipitações.....	172
Tabela 14 – Quantis regionais adimensionalizados na análise de precipitações.....	173
Tabela 15 – Limite inferior da classe de <i>Chuva Extrema</i> para duração de 5 dias.....	175
Tabela 16 – Limites das classes para duração de 1 dia da estação Palmares (25).....	177
Tabela 17 – Estações fluviométricas utilizadas no estudo	180
Tabela 18 – Distribuições selecionadas na análise de vazões.....	184
Tabela 19 – Quantis regionais adimensionalizados na análise de vazões	185
Tabela 20 – Quantis absolutos associados a tempos de retorno (m^3/s).....	186
Tabela 21 – Série de vazões médias diárias máximas anuais da estação Palmares	186

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABRH	Associação Brasileira de Recursos Hídricos
ALS	Airborne Laser Scanning
ALTM	Airborne Laser Terrain Mapper
ANA	Agência Nacional de Águas
AOL	Atmospheric Oceanographic Lidar
APAC	Agência Pernambucana de Águas e Clima
ASI	Agenzia Spaziale Italiana (<i>Agência Espacial Italiana</i>)
ATLAS	Airborne Topographic Laser Altimeter System
ATM	Airborne Topographic Mapper
CAPTEC	Comitê de Capacitação Técnica e Treinamento
CCAF	Climate Change Action Fund
CD	Chart Datum
CE	Chuva Extrema
CF	Chuva Fraca
CH	Constantes Harmônicas
CL	Chuva Leve
CM	Chuva Moderada
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
COPPE	Coordenação dos Programas de Pós-graduação de Engenharia
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
CRED	Centre for Research on the Epidemiology of Disasters
CS	Chuva Severa
CTG	Centro de Tecnologia e Geociências
CZ	Chuva Mínima
DECART	Departamento de Engenharia Cartográfica
DECIVIL	Departamento de Engenharia Civil
DEM	Digital Elevation Model

DHI	Danish Hydraulic Institute
DLR	Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt (<i>Centro Aeroespacial Alemão</i>)
EC	Environment Canada
EE.UU.	Estados Unidos da América
EESC	Escola de Engenharia de São Carlos
EGM96	Earth Gravitational Model 1996
EHR	Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos
EMO	Emergency Measures Organization
EMQ	Erro Médio Quadrático
ESRI	Environmental Systems Research Institute
EUA	Estados Unidos da América
FEMAR	Fundação de Estudos do Mar
GEV	Generalizada de Valores Extremos
GIS	Geographic Information System
GP	Generalizada de Pareto
GPS	Global Positioning System
GRH	Grupo de Recursos Hídricos
GSC	Geological Survey of Canada
HEC	Hydrologic Engineering Center
HEC-DSS	Hydrologic Engineering Center's Data Storage System
HEC-HMS	Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modeling System
HEC-RAS	Hydrologic Engineering Center's River Analysis System
HIDROMET	Unidade de Monitoramento da Rede Hidrometeorológica de Pernambuco
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICP	Independent Check Point
IDW	Inverse Distance Weighted
IMU	Inertial Measurement Unit
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

INS	Inertial Navigation System
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
ISA	Inertial Sensors Array
IITEP	Instituto de Tecnologia de Pernambuco
LACTEC	Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento
LaDAR	Laser Detection and Ranging
LAMEPE	Laboratório de Meteorologia de Pernambuco
LG	Logística Generalizada
LiDAR	Light Detection and Ranging
LN-3P	Log-Normal ou Generalizada Normal
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDT	Modelo Digital do Terreno
MOLA	Mars Observer Laser Altimeter
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NIMA	National Imagery and Mapping Agency
NMM	Nível Médio do Mar
NRCan	Natural Resources Canada
NSCC	Nova Scotia Community College
OFDA	Office of U.S. Foreign Disaster Assistance
PCD	Plataforma de Coleta de Dados
PCTT	Programa de Capacitação Técnica e Treinamento
PDOP	Position Dilution of Precision
PEC	Padrão de Exatidão Cartográfica
PEI	Prince Edward Island
P-III	Pearson tipo III
RMR	Região Metropolitana do Recife
RMSE	Root Mean Square Error
RN	Referência de Nível
RSL	Relative Sea-level

SAR	Synthetic Aperture Radar
SCS	Soil Conservation Service
SGB	Sistema Geodésico Brasileiro
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SIRGAS	Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
SLA	Shuttle Laser Altimeter
SLICER	Scanning Lidar Imager of Canopy by Echo Recovery
SMA	Soil Moisture Accounting
SMAP	Soil Moisture Accounting Procedure
SPI	Standardized Precipitation Index
SRHE-PE	Secretaria de Recursos Hídricos e Energéticos de Pernambuco
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
SSD	Sistema de Suporte à Decisão
SUDENE	Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste
SUREG-RE	Superintendência Regional de Recife
TIN	Triangular Irregular Network
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
UFPR	Universidade Federal do Paraná
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
USACE	U.S. Army Corps of Engineers
USGS	U.S. Geological Survey
USP	Universidade de São Paulo
UTM	Universal Transverse Mercator
VBA	Visual Basic for Applications
WGS84	World Geodetic System 1984

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	iv
RESUMO	viii
ABSTRACT	ix
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	x
LISTA DE TABELAS	xvii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xviii
Capítulo 1	25
INTRODUÇÃO	25
1.1. PROBLEMÁTICA E JUSTIFICATIVA.....	25
1.2. OBJETIVOS.....	30
1.2.1. OBJETIVO GERAL.....	30
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	30
1.3. ESTRUTURA DO TEXTO	31
Capítulo 2	32
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	32
2.1. RETROSPECTO HISTÓRICO DAS INUNDAÇÕES NA BACIA DO RIO UNA E DAS AÇÕES MITIGADORAS JÁ ADOTADAS.....	32
2.2. USO DE INFORMAÇÕES ESPACIAIS DE ALTA RESOLUÇÃO NA MODELAGEM HIDRÁULICO-HIDROLÓGICA.....	40
2.3. FERRAMENTAS DE ANÁLISE DOS PROCESSOS DE FORMAÇÃO E PROPAGAÇÃO PARA PREVISÃO E CONTROLE DE INUNDAÇÕES.....	55
2.3.1. ENCHENTES, INUNDAÇÕES E ALAGAMENTOS.....	55
2.3.2. SISTEMA, MODELO, SIMULAÇÃO E PREVISÃO	56
2.3.3. MODELOS HIDROLÓGICO-HIDRODINÂMICOS DOS PROCESSOS DE FORMAÇÃO E PROPAGAÇÃO DAS INUNDAÇÕES.....	61

2.4. HIDROLOGIA ESTATÍSTICA APLICADA À ANÁLISE DE EVENTOS EXTREMOS.....	74
2.4.1. ANÁLISE REGIONAL DE FREQUÊNCIA PELO MÉTODO INDEX-FLOOD (CHEIA- ÍNDICE) UTILIZANDO MOMENTOS-L.....	74
2.4.2. CLASSIFICAÇÃO DE EVENTOS HIDROLÓGICOS EXTREMOS ATRAVÉS DO STANDARDIZED PRECIPITATION INDEX (SPI)	91

Capítulo 3 **95**

MATERIAIS E MÉTODOS95

3.1. REGIÃO DE ESTUDO: A BACIA DO RIO UNA.....	95
3.1.1. LOCALIZAÇÃO	95
3.1.2. VEGETAÇÃO.....	96
3.1.3. POTAMOGRAFIA	98
3.1.4. ÁREA E DIVISÃO POLÍTICO ADMINISTRATIVA.....	100
3.1.5. CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS.....	103
3.1.6. RELEVO	105
3.1.7. GEOLOGIA.....	108
3.1.8. SOLOS.....	110
3.1.9. USO E OCUPAÇÃO DO SOLO.....	113
3.2. COLETA, AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DOS DADOS	114
3.2.1. LEVANTAMENTO DE DADOS DE INUNDAÇÃO NA BACIA.....	114
3.2.2. DADOS HIDROLÓGICOS	121
3.2.3. DADOS FIOGRÁFICOS	131
3.3. SISTEMA DE SIMULAÇÃO HIDROLÓGICO-HIDRODINÂMICA DE INUNDAÇÕES.....	147
3.3.1. PRÉ-PROCESSAMENTO DOS DADOS DE ENTRADA DO SISTEMA.....	147
3.3.2. CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DOS MODELOS QUE COMPÕEM O SISTEMA	151
3.3.3. INTEGRAÇÃO/ACOPLAMENTO DOS MODELOS	161

Capítulo 4 **162**

RESULTADOS E DISCUSSÃO 162

4.1. IMPORTÂNCIA DA TECNOLOGIA LIDAR E DA MODELAGEM HIDROLÓGICO-HIDRODINÂMICA COMO INSTRUMENTOS DA GESTÃO TERRITORIAL.....	162
4.1.1. SUPORTE AOS PROJETOS DAS BARRAGENS DE CONTENÇÃO DE CHEIAS	162
4.1.2. SUPORTE AO PLANEJAMENTO URBANO.....	165
4.1.3. SUPORTE AO MONITORAMENTO DE INUNDAÇÕES.....	166

4.2. MODELO DE PREVISÃO COMO INSTRUMENTO DA GESTÃO DAS INUNDAÇÕES.....	168
4.2.1. ANÁLISE REGIONAL DE FREQUÊNCIAS DE PRECIPITAÇÕES.....	168
4.2.2. ANÁLISE REGIONAL DE FREQUÊNCIAS DE VAZÕES.....	180
4.2.3. CENÁRIOS DE PRECIPITAÇÃO PARA ALERTA	187
Capítulo 5	203
CONCLUSÕES	203
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	207

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

1.1. PROBLEMÁTICA E JUSTIFICATIVA

As enchentes se constituem em um fenômeno natural, decorrente da variação das precipitações sobre as bacias hidrográficas. A história da ocupação do território urbano e rural, em todo o mundo e em todos os tempos, registra, por um lado, tragédias, acidentes, destruição e mortes, decorrentes da invasão do leito maior dos rios pela população e do uso sem controle do território, o que provoca erosão, assoreamento, contaminação dos corpos d'água, entre outros impactos negativos. Isso em detrimento dos benefícios naturais que as enchentes trazem, como fertilidade ao solo: um dos maiores exemplos dessa fertilidade provém do rio Nilo, que desde tempos imemoriais ajudou no desenvolvimento das populações no seu entorno, principalmente a egípcia.

Na bacia hidrográfica rural, o fluxo é retido pela vegetação, infiltra-se no subsolo e, o que resta, escoar sobre a superfície de forma gradual, produzindo um hidrograma com variação lenta de vazão e com picos de enchentes moderados. Com o desenvolvimento urbano, ocorre a impermeabilização do solo através de telhados, ruas calçadas e pátios, entre outros. Dessa forma, a parcela da água que infiltrava passa a escoar pelos condutos, aumentando o escoamento superficial. O volume que escoava lentamente pela superfície do solo e ficava retido pelas plantas, com a urbanização, passa a escoar no canal, exigindo maior capacidade de escoamento das seções (TUCCI; PORTO; BARROS, 1995) [84].

Nas inundações naturais da várzea ribeirinha, o rio extravasa a sua calha menor, em média com tempo de retorno superior a dois anos, ocupando o seu leito maior de acordo com os *eventos chuvosos extremos*. Devido à dificuldade de meios de

transporte no passado, utilizava-se o rio como a via principal, as cidades se desenvolveram as margens dos rios ou no litoral. Pela própria experiência dos antigos moradores, a população procurou habitar as zonas mais altas aonde o rio dificilmente chegaria (TUCCI, 2001) [82]. Com o crescimento desordenado e acelerado das cidades, principalmente na segunda metade do século XX, novos espaços de ocupação se tornaram necessários e as áreas, de risco considerável, foram ocupadas, como várzeas inundáveis, isso porque, a ocupação de áreas do leito maior pela população sempre dependeu da memória dos habitantes e da frequência com que as enchentes ocorriam, e uma sequência de anos sem inundação é motivo para que haja ocupação dessas áreas (TUCCI; PORTO; BARROS, 1995) [84].

De acordo com Sausen et al. (2007) [77], nas últimas décadas tem havido um aumento da ocorrência de *desastres naturais* em todo o globo: conforme dados do OFDA/CRED (2012) [57], houve um incremento significativo do número de desastres a partir da década de 70 (Figura 1). Parte desses desastres são inundações severas.

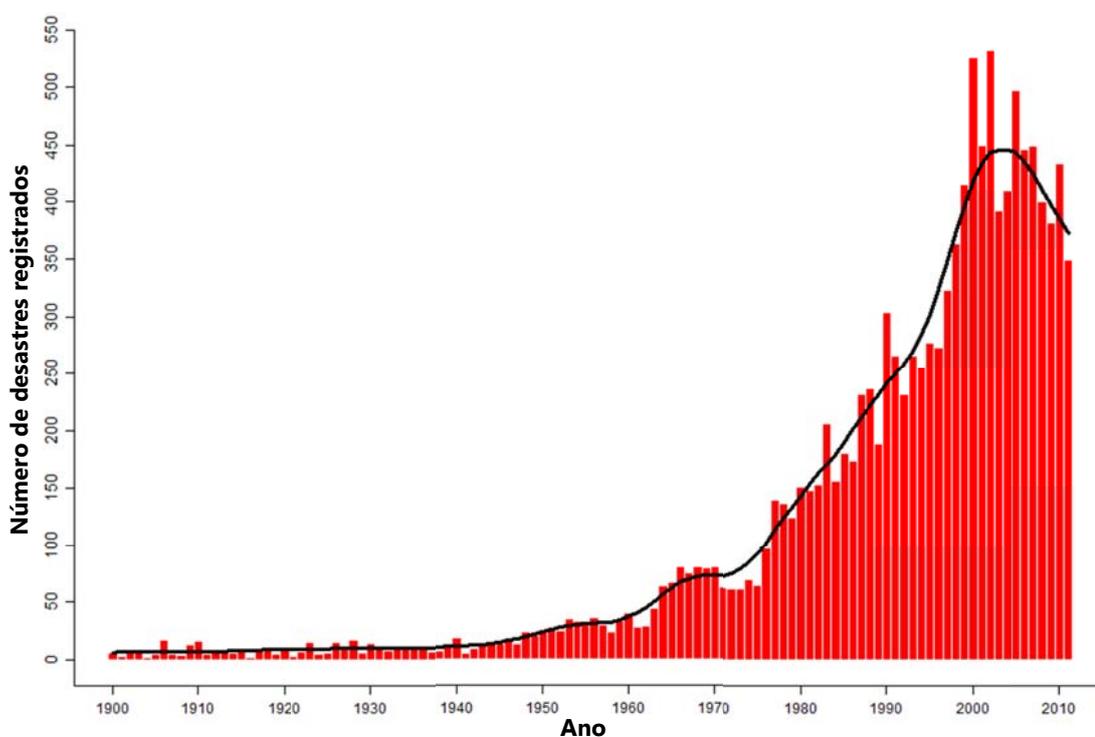


Figura 1 – Desastres naturais registrados no globo no período de 1900 a 2011.
Fonte: OFDA/CRED (2012) [57].

Segundo Marcelino (2007) [50], alguns estudos indicam que este aumento pode estar diretamente vinculado às mudanças climáticas globais. Os mais destacados são os relatórios do IPCC (do inglês "*Intergovernmental Panel on Climate Change*", ou seja, *Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas*). O relatório lançado em fevereiro de 2007 aponta para um aumento dos desastres naturais de origem atmosférica, com destaque para as tempestades e os eventos de precipitações intensas nas regiões sul e sudeste e um agravamento da seca na região nordeste e avanço sobre as regiões norte e centro-oeste do Brasil. O aumento da precipitação nas regiões sul e sudeste não necessariamente aponta para uma boa distribuição anual das chuvas, pelo contrário, a tendência é que as precipitações fiquem ainda mais intensas e concentradas, ou seja, chuvas muito fortes e em poucos dias. Porém é importante ressaltar que muitos pesquisadores contestam as teorias de que a causa para as mudanças climáticas é antrópica, atribuindo as alterações a causas naturais e cíclicas.

É fato que diversas áreas do globo já estão sendo seriamente impactadas pelos desastres naturais, principalmente para aqueles disparados por *fenômenos atmosféricos extremos*, representados em sua maioria pelas tempestades severas. Atualmente é praticamente impossível erradicar tais fenômenos. Pode-se até mesmo afirmar que a sociedade nunca alcançará tal êxito, visto que as tempestades fazem parte da geodinâmica terrestre, sendo responsáveis pela formação do relevo, manutenção dos ecossistemas, abastecimento das fontes hídricas naturais, entre outros.

No Brasil, ainda de acordo com Marcelino (2007) [50], ocorreram 150 registros de desastres no período 1900-2006 conforme dados do OFDA/CRED (2012) [57]. Do total ocorrido, 84% foram computados a partir da década 70, demonstrando um aumento considerável de desastres nas últimas décadas. Como consequência, foram contabilizados 8.183 vítimas fatais e um prejuízo de aproximadamente 10 bilhões de dólares. Os tipos de desastres mais frequentes foram as inundações, representadas pelas *graduais* e *bruscas*, com 59% dos registros, seguidas pelos escorregamentos

(14%). A maioria dos desastres no Brasil (mais de 80%) está associada às instabilidades atmosféricas severas, que são responsáveis pelo desencadeamento de inundações, vendavais, tornados, granizos e escorregamentos. As inundações bruscas ocorrem associadas a elevados índices de precipitação, e são altamente perigosas e destrutivas. Em virtude do aumento dos dias com precipitações intensas, somado aos desmatamentos de encostas, a ocupação das planícies de inundação, ao assoreamento dos rios e a impermeabilização urbana (asfaltamento de ruas, construções, etc.), as inundações bruscas em áreas urbanizadas se tornarão em um dos principais problemas ambientais que se precisará enfrentar para as próximas décadas.

Por isso, é necessário, em caráter de urgência, o estabelecimento de medidas preventivas que possam minimizar as consequências deste fenômeno, visando sempre à diminuição do número de pessoas afetadas e vitimadas. A mobilização social, em movimentos como a Rio +20, promove a defesa de que ações humanas devam ser direcionadas para a implementação de *medidas mitigadoras e preventivas* que possam amenizar o impacto causado por estes fenômenos.

A minimização ou redução do impacto dos desastres dá-se através de medidas preventivas que podem ser classificadas em *estruturais* e *não estruturais*.

Neste contexto, as inundações, cada vez mais frequentes no Brasil e no mundo, como mostram os indicadores de ocorrência representados na Figura 2, vêm castigando diversas cidades da *Zona da Mata Sul* do Estado de Pernambuco, causando grandes perdas materiais e até vítimas fatais. O enfrentamento desse problema requer ações de pesquisa, planejamento e intervenções nas bacias hidrográficas. Assim, a modelagem matemática surge como um instrumento de suporte ao planejamento urbano, à previsão e ao controle de inundações. O uso da modelagem hidrológico-hidrodinâmica, com a combinação de modelos chuva-vazão e hidrodinâmico, permite, por exemplo, o delineamento de área inundada para eventos ocorridos e para cenários de previsão com diferentes tempos de retorno.

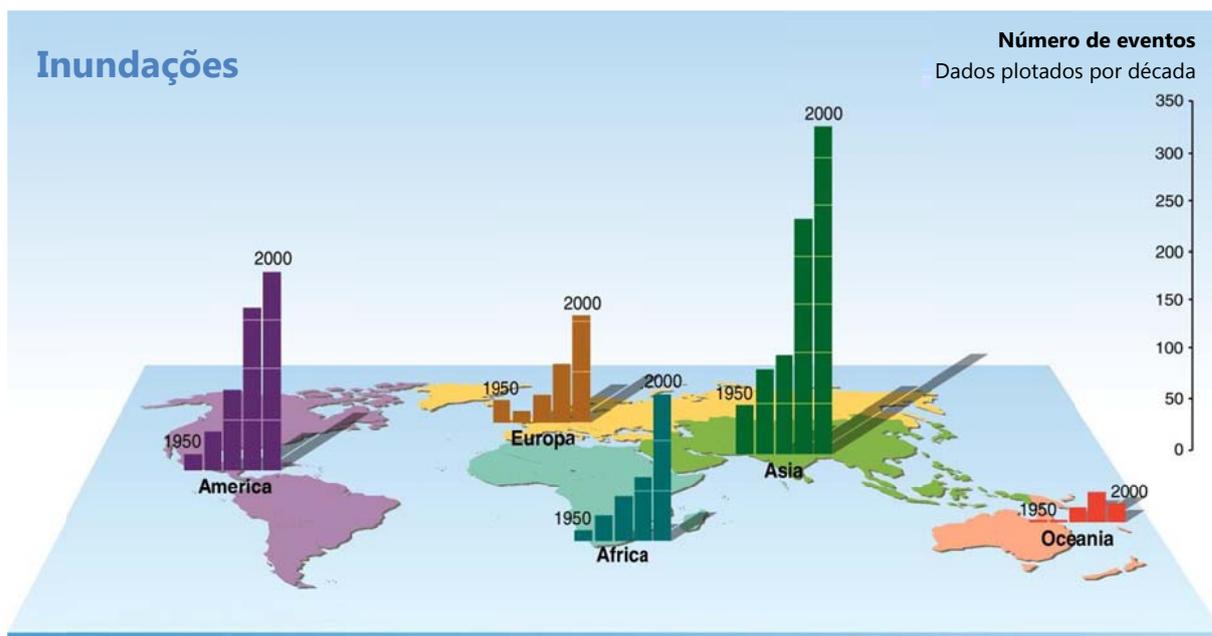


Figura 2 – Aumento da incidência das inundações no período de 1950 a 2000.
Fonte: Adaptado de Millennium Ecosystem Assessment (2005) [54].

A pesquisa aqui apresentada teve origem e retroalimentou a cooperação técnico-científica firmada entre a *Secretaria de Recursos Hídricos e Energéticos de Pernambuco* (SRHE-PE), a *Agência Pernambucana de Águas e Clima* (APAC), *Universidade Federal de Pernambuco* (UFPE) e *Serviço Geológico do Brasil – CPRM* (*Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais*). Motivada por estes eventos de inundações na Mata Sul pernambucana, foi formada uma equipe de pesquisadores para a realização de estudos de concepção de um *Sistema de Previsão e Alerta de Eventos Hidrometeorológicos Críticos do Estado* a ser operado pela APAC.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. OBJETIVO GERAL

A pesquisa tem como objetivo geral aprimorar a previsão e o controle de inundações com suporte de informações espaciais de alta resolução para o planejamento territorial, com foco na proteção das cidades. Busca-se conhecer o padrão de ocorrência das inundações mais severas e a partir desse padrão estabelecer estratégias e cenários que permitam prever e acompanhar a evolução das inundações.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Aliados ao objetivo geral, são objetivos específicos deste trabalho:

- Destacar os avanços decorrentes da utilização de informações espaciais mais precisas no pré e pós-processamento para a modelagem dos processos hidrológicos e hidrodinâmicos por ocasião de eventos de cheia;
- Identificar o ganho da qualidade potencializado pelas informações de alta resolução espacial no aprimoramento de projetos e na estrutura de monitoramento dos rios;
- Fazer análise de frequência regional de precipitações diárias acumuladas máximas anuais de 1 dia, 2 dias, 3 dias, 4 dias e 5 dias de duração;
- Classificar as séries de precipitações através do Standardized Precipitation Index;
- Fazer análise de frequência regional de vazões médias diárias máximas anuais; e
- Desenvolver conhecimento e ferramentas tecnológicas para auxiliar as ações de previsão e controle de cheias e seus impactos na região estudada.

1.3. ESTRUTURA DO TEXTO

Este trabalho foi organizado em cinco capítulos:

- O Capítulo 2 reúne a revisão da bibliografia sobre o tema. Neste capítulo também é feito um retrospecto histórico das inundações na bacia do rio Una e das ações mitigadoras já adotadas, como também são abordadas as ferramentas de análise dos processos de formação e propagação para controle e previsão de cheias e as ferramentas de hidrologia estatística aplicadas à análise de eventos extremos;
- O Capítulo 3 descreve os materiais e métodos para a pesquisa, incluindo descrição da região escolhida para o estudo de caso, a bacia do rio Una. Em seguida, são discutidos a coleta, aquisição e tratamento dos dados necessários para a análise, destacado as informações espaciais de alta resolução e é apresentado o Sistema de Simulação Hidrológico-Hidrodinâmica de Inundações utilizado;
- O Capítulo 4 traz os resultados e discussão relevantes aos objetivos da tese, com a apresentação do modelo de previsão proposto como suporte aos projetos e ações de contenção de cheias, ao planejamento urbano, ao monitoramento de inundações e aos alertas para a população; e
- Por fim, o Capítulo 5 ressalta os principais pontos dos resultados obtidos, bem como aponta possibilidades de futuros trabalhos a se desenvolver na continuidade desta pesquisa.

Capítulo 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. RETROSPECTO HISTÓRICO DAS INUNDAÇÕES NA BACIA DO RIO UNA E DAS AÇÕES MITIGADORAS JÁ ADOTADAS

Em 1970 ocorrem duas enchentes em Pernambuco. Em julho, as águas atingem a *Zona da Mata Sul* e o *Agreste* do Estado, por conta do transbordamento dos rios Una, Ipojuca, Formoso, Tapacurá, Pirapama, Gurjaú, Amaraji e outros. A cidade que mais sofreu foi o Cabo, que teve 4 dos seus 5 hospitais inundados e várias indústrias pararam suas atividades. No Recife, as águas do Capibaribe causaram grande destruição. Na capital e interior, 500 mil pessoas foram atingidas e 150 morreram; 1.266 casas foram destruídas em 28 cidades. Só no Recife, 50 mil pessoas ficaram desabrigadas. Em agosto, nova cheia atinge o Recife e Olinda, desta vez provocada pelo Rio Beberibe. Em Olinda, 5 mil pessoas ficaram desabrigadas e foi decretado estado de calamidade pública (FORMATO 8 PRODUÇÕES EDITORIAIS, 2012) [26].

Em 1975, considerada a maior calamidade do século na Região Metropolitana de Recife, a enchente ocorreu entre os dias 17 e 18 de julho, deixando 80% da cidade do Recife sob as águas e outros 25 municípios da bacia do Capibaribe também foram atingidos, morreram 107 pessoas e outras 350 mil ficaram desabrigadas. Na capital e interior, 1.000 km de ferrovias foram destruídos, pontes desabaram, casas foram arrastadas pelas águas. A cheia atingiu seu pico às 4:00h da madrugada do dia 18. Por terra, o Recife ficou isolado do resto do País durante dois dias (FORMATO 8 PRODUÇÕES EDITORIAIS, 2012) [26].

Em 2000, entre os dias 30 de julho e 1 de agosto, fortes chuvas castigaram o Estado, inclusive a *Região Metropolitana do Recife* (RMR), deixando um total de 22 mortos, 100 feridos e mais de 60 mil pessoas desabrigadas. Cidades foram parcialmente destruídas, as águas transbordaram dos rios levando pontes e casas. As chuvas foram anunciadas com antecedência pelos serviços de meteorologia, mas as autoridades governamentais deram pouca importância à previsão. As chuvas atingiram 300 mm em apenas três dias e só na RMR aconteceram 102 deslizamentos de barreiras. Na bacia do rio Una, no município de Belém de Maria, com 15 mil habitantes, 450 casas foram arrastadas pelas águas. O centro de Palmares ficou completamente debaixo de água e em Barreiros a água atingiu o teto do hospital da cidade. Dos 33 municípios seriamente atingidos, em 16 foi decretado estado de emergência e em 17 estado de calamidade pública, entre os quais Rio Formoso, Gameleira, Belém de Maria, Goiana, Cupira e São José da Coroa Grande (FORMATO 8 PRODUÇÕES EDITORIAIS, 2012) [26].

As enchentes ocorridas na bacia do rio Una, nos primeiros dias de agosto do ano 2000, notadamente em seu curso médio e baixo, provocaram inundações de grande porte nas cidades de Belém de Maria, Catende, Maraial, Palmares, Água Preta e Barreiros, além de interferir de forma danosa em toda a economia das margens do rio Una e seus afluentes Panelas, Piranji, Jacuípe e Santo Antônio (também conhecido em algumas fontes, como Pirangi), e que segundo informações prestadas por antigos residentes de Barreiros, Água Preta e Palmares, apresentou as maiores inundações desde os 43 anos anteriores. O relevo montanhoso, os solos de baixa permeabilidade e a cobertura vegetal de baixa capacidade de retenção de escoamentos superficiais, existentes no médio Una, contribuem para um elevado rendimento das precipitações e a formação de enchente com picos de curto tempo de concentração, não ultrapassando em alguns locais a mais do que 10 horas no tempo decorrido entre o início da precipitação e o pico de vazão provocado por estas chuvas. O evento de agosto de 2000 foi uma típica cheia provocada por elevadas chuvas no médio e baixo curso do rio Una, variando de 100 mm a 130 mm, e precipitações no curso superior

entre 50 mm e 80 mm, o que provocou uma pequena participação de escoamentos provenientes do alto Una e grandes picos de enchentes formados no baixo e médio curso (PERNAMBUCO, 2002) [60].

Em 2004, fortes chuvas entre 8 de janeiro e 2 de fevereiro de 2004 castigaram todas as regiões do Estado, deixando 36 mortos e cerca de 20 mil pessoas desabrigadas. As chuvas (jamais antes registradas entre os dois primeiros meses do ano) foram provocadas por fenômenos atípicos (frente fria e outros) e destruíram pontes e estradas, açudes romperam, casas desabaram, populações inteiras ficaram ilhadas. Treze cidades ficaram em estado de calamidade pública e 76 em estado de emergência. Petrolina, no sertão do São Francisco, ficou isolada durante vários dias, depois que as águas levaram a estrada de acesso à cidade. Todos os açudes e barragens do Sertão e Agreste transbordaram, inclusive a grande Barragem de Jucazinho, em Surubim, a maior do agreste pernambucano com 327 milhões de m³ de capacidade (FORMATO 8 PRODUÇÕES EDITORIAIS, 2012) [26].

Em 2005, entre os dias 30 de maio e 2 de junho, fortes chuvas provocaram enchentes em 25 cidades do Agreste, Zona da Mata e litoral pernambucanos, deixando 36 mortos e mais de 30 mil pessoas desabrigadas. Cerca de 7 mil casas foram parcialmente ou totalmente destruídas; 40 pontes foram danificadas; 11 rodovias estaduais foram atingidas, sendo que sete delas ficaram interditadas; a água inundou ruas centrais, hospitais, escolas e casas comerciais de várias cidades, provocando enormes prejuízos materiais (FORMATO 8 PRODUÇÕES EDITORIAIS, 2012) [26].

As bacias dos rios Capibaribe, Una, Sirinhaém, Mundaú e Paraíba, nos Estados de Pernambuco e Alagoas, foram atingidas por fortes chuvas entre os dias 16 e 18 de junho de 2010. Em vários rios da região foram registrados níveis superiores aos máximos históricos, acarretando enchentes de amplitudes até então não registradas. Segundo dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), a precipitação pluviométrica que ocorreu em Recife, nos dias 16, 17 e 18 de junho de 2010, foi de

348 mm. Este valor, ocorrido em apenas três dias, corresponde a 90% da média climatológica do mês de junho, que é de 389,6 mm (PERNAMBUCO, 2010) [62].

Os eventos pluviométricos extremos ocorridos no mês de junho de 2010 no Estado de Pernambuco atingiram principalmente as Regiões do Litoral, Zona da Mata e Agreste, resultando em enchentes de dimensões catastróficas principalmente nas bacias do rio Una e Mundaú, esta última com reflexos no Estado de Alagoas. A bacia hidrográfica do rio Una, cuja área de drenagem abrange as três regiões citadas, recebeu a contribuição das chuvas ocorridas na totalidade de sua bacia de contribuição, acarretando a maior enchente dos últimos cem anos. Várias sedes municipais, localizadas ao longo do curso do rio Una e dos seus principais afluentes, foram duramente atingidas, ficando em situação de emergência ou de calamidade (PERNAMBUCO, 2010) [62].

No dia 17 de junho de 2010 o Estado de Pernambuco vivenciou um fenômeno climático chamado "*Onda de Leste*", que foi intensificado pelo aquecimento da temperatura do Oceano Atlântico juntamente com a intensificação dos ventos alísios. Essa conjugação de eventos provocou, em curto espaço de tempo, uma grande quantidade de chuva concentrada nas proximidades das cabeceiras de vários rios, gerando ondas de cheia que atingiram diversas cidades ribeirinhas de Pernambuco e de Alagoas. Ao contrário dos períodos invernosos típicos, quando o nível dos rios eleva-se em um ritmo relativamente lento, essas chuvas, pela sua magnitude e, no caso das bacias hidrográficas dos rios Mundaú e Una, pela acentuada declividade dos rios, deram origem a elevação muito rápida do nível da água e geração de ondas de grande velocidade. Somente em Pernambuco, na madrugada do dia 17 para o dia 18 de junho de 2010, choveu na região afetada o equivalente a 180 mm, o que representa aproximadamente 70% do esperado para os 30 dias do mês de junho (CIRILO et al., 2011b) [13].

Às 16:00h do dia 17 de junho de 2010, o *Laboratório de Meteorologia de Pernambuco* (LAMEPE), percebendo a gravidade do fenômeno que se prenunciava, alertou o Gabinete do Governador. Às 18:00h foi realizada uma reunião emergencial

com prefeitos da Região Metropolitana de Recife, capital do Estado de Pernambuco e representantes de outros órgãos no Palácio do Governo, disparando-se um alerta urgente às defesas civis municipais, solicitando a desocupação imediata das áreas de risco. O alerta emitido pelo Governo do Estado salvou centenas de vidas. Na cidade de Barreiros, próxima à foz do rio Una no Oceano Atlântico, por exemplo, a população chegou a ser alertada até pelo toque do sino da igreja. As chuvas tiveram início em torno das 20:00h. Não fora o alerta urgente, centenas de mortes poderiam ter ocorrido. Matéria veiculada em jornal local informa que no ano de 1969, na cidade de São José da Laje, Estado de Alagoas, ocorreram quase 1.500 óbitos em fenômeno semelhante. Essa cidade está situada na bacia hidrográfica do rio Mundaú, a outra bacia onde a catástrofe foi igualmente violenta no ano de 2010. Além disso, pouco mais de uma semana depois, na noite e madrugada dos dias 27 e 28 o fenômeno se repetiu, com menor intensidade, porém, alagando igualmente as cidades onde se iniciava o processo de recuperação. Ainda se promovia a retirada de detritos depositados pelas águas da primeira inundaçã, quando a segunda cheia ocorreu (CIRILO et al., 2011b) [13].

O fenômeno deixou em Pernambuco um quadro de grande destruição: após o desastre, o Governo do Estado decretou situação de emergência em 27 municípios (Agrestina, Altinho, Amaraji, Belém de Maria, Bezerros, Bom Conselho, Bonito, Cabo de Santo Agostinho, Camaragibe, Chã Grande, Escada, Gameleira, Gravatá, Ipojuca, Jaboatão dos Guararapes, Joaquim Nabuco, Moreno, Nazaré da Mata, Palmeirina, Pombos, Quipapá, Ribeirão, São Joaquim do Monte, Sirinhaém, Tamandaré, Vicência e Xexéu) e estado de calamidade em outros 12 (Barreiros, Palmares, Correntes, Cortês, Jaqueira, São Benedito do Sul, Vitória de Santo Antão, Barra de Guabiraba, Água Preta, Catende, Maraial e Primavera). Nas localidades afetadas, contabilizou-se um saldo de 20 óbitos, 26.966 desabrigados, 56.643 desalojados, 14.136 habitações destruídas ou danificadas, 27 escolas destruídas e outras 376 danificadas, 9 municípios isolados (sem acesso viário), 4.478 km de estradas comprometidas, 142 pontes danificadas, 2 hospitais estaduais completamente destruídos, 85 postos de

saúde e 4 hospitais municipais danificados. Comunidades ficaram isoladas, casas, barragens e açudes foram destruídos, houve mortes de pessoas e de animais e cidades foram praticamente, destruídas. Isso ocorreu em apenas alguns dias do mês de junho de 2010, podendo ser visto na Figura 3 à Figura 6, o poder devastador da inundação (CIRILO et al., 2011b [13]; DIÁRIOS ASSOCIADOS, 2010 [22]).



Figura 3 – Centro de Palmares em 19/06/2010.
Foto de Roberto Pereira/SEI. Fonte: Yahoo! Inc. (2010) [96].



Figura 4 – Ponte Nova, BR-101 acesso à Água Preta, em Palmares em 19/06/2010.
Foto de Roberto Pereira/SEI. Fonte: Yahoo! Inc. (2010) [96].



Figura 5 – Inundação do rio Una em Palmares em 19/06/2010.
Foto de Roberto Pereira/SEI. Fonte: Yahoo! Inc. (2010) [96].



(a) (b)
Figura 6 – Viaduto Profa. Lúcia Paiva em Palmares.

- (a) No dia 19/06/2010. Foto de Roberto Pereira/SEI. Fonte: Yahoo! Inc. (2010) [96].
(b) No dia 23/06/2010. Foto de Antônio Cruz – Agência Brasil. Fonte: EBC (2010) [23].

Entre os dias 3 e 5 de maio de 2011, pouco mais de dez meses passados, novo ciclo de cheias ocorreu nessas regiões do Estado, de forma antecipada, dado que a ocorrência de tais eventos nos rios das regiões Agreste e Mata de Pernambuco

normalmente ocorrem em junho, julho e eventualmente agosto. Não houve formação de cheia nas partes altas das bacias dos rios Una e Mundaú, como em 2010, e assim as inundações não foram caracterizadas pelo poder de destruição verificado naquele ano (CIRILO et al., 2011b) [13].

Como relatado, a região da Mata Sul pernambucana tem sido atingida por frequentes cheias. Nos anos de 2000, 2005, 2010 e 2011 as chuvas provocaram grandes estragos na região e, além de acarretar perdas humanas, trouxeram prejuízos materiais à população. Após a enchente de 2010, a SRHE-PE, em conjunto com a APAC³, contratou serviços de mapeamento digital a laser de alta precisão (tecnologia LiDAR) para levantamento topográfico nas áreas da Bacia do Una, Mundaú e Sirinhaém. Os serviços foram realizados num prazo de sete meses. Tal trabalho, de importância fundamental para a pesquisa que deu origem a esta Tese, viabilizou também o desenvolvimento mais rápido dos projetos das barragens de contenção de cheias. As barragens vão proteger das enchentes uma área da bacia hidrográfica do Una de 2.060 km² (30,58% da área total), correspondente ao médio e baixo curso, onde estão inseridas áreas de 28 municípios, sendo dez sedes municipais: Belém de Maria, Catende, Cupira, Jaqueira, Lagoa dos Gatos, Maraial, Palmares, São Benedito do Sul, Água Preta e Barreiros (PERNAMBUCO, 2011) [63].

Em 10 de maio de 2011 foi inaugurada a *Sala de Situação* da APAC, onde funciona o *Sistema de Previsão e Alerta de Eventos Hidrometeorológicos Críticos do Estado*, com a finalidade de otimizar e agilizar a capacidade de resposta do Estado de Pernambuco a eventos climáticos adversos. O Sistema conta com *Plataformas de Coletas de Dados* (PCDs) estrategicamente posicionadas para transmissão automática de informações de precipitação e nível dos rios, implantadas a partir de acordo de cooperação técnica com a *Agência Nacional de Águas* (ANA).

³ Entidade integrante da administração pública estadual indireta, vinculada à SRHE-PE, criada através da Lei Estadual Nº 14.028 de 26 de março de 2010, disponível em: <http://www.mp.pe.gov.br/uploads/QfdU4MiHQSIC0nW4BQ06mQ/wPof-gkl687-OkBCNumwAg/Lei_Estadual_14.028_-_cria_APAC.doc>, com acesso em: 31 maio 2012.

2.2. USO DE INFORMAÇÕES ESPACIAIS DE ALTA RESOLUÇÃO NA MODELAGEM HIDRÁULICO-HIDROLÓGICA

Segundo Marks e Bates (2000) [51], modelos hidrodinâmicos bidimensionais de simulação de fluxo na planície de inundação estão na vanguarda da pesquisa em modelagem de inundação, mas atualmente, são condicionados a uma base de dados inadequada de altimetria e de rugosidade (atrito), principalmente devido a dados insuficientes ou imprecisos. Marks e Bates (2000) [51] mostram os efeitos da base de dados topográfica inadequada na previsão de inundação e apresentam resultados iniciais de uma simulação de inundação usando uma nova base de dados topográfica produzida a partir de dados LiDAR (do inglês "*Light Detection and Ranging*").

Para Cobby et al. (2003) [14], os dados de altimetria produzidos a partir do LiDAR representam uma nova e importante fonte de dados para modelos bidimensionais de inundação em rios com dados de altimetria espacialmente distribuídos na planície de inundação, juntamente com alturas de vegetação para a parametrização do atrito. Para melhorar a definição destas características físicas do modelo é necessária uma decomposição da malha de dados levantados em elementos que possam refletir as características da cobertura vegetal com diferentes propriedades de fricção para os seus arredores, como também as características topográficas significativas da planície de inundação. Esta decomposição é realizada usando um sistema de segmentação de imagem, que converte a imagem com a base altimétrica do LiDAR em imagens separadas de altimetria da superfície e da altura da vegetação em cada ponto. O mapa de altura da vegetação é utilizado para estimar um coeficiente de atrito em cada nó de malha. O modelo de atrito espacialmente distribuído tem a vantagem de que é baseado nas características físicas e elimina a necessidade de um exercício de calibração do modelo no qual são definidos, por tentativas, parâmetros especificando o atrito no canal e na planície de inundação que são ajustados para obter a melhor

aproximação entre os cenários de inundação modelados e observados. O esquema foi testado em um estudo de modelagem de uma inundação que ocorreu no rio Severn, Reino Unido, em 1998. Uma imagem de satélite de sensor imageador ativo SAR (do inglês "*Synthetic Aperture Radar*", ou seja, *Radar de Abertura Sintética*) com o alcance da inundação ocorrida foi utilizada para validar as simulações do modelo. A modelagem hidráulica usando a malha decomposta do LiDAR apresentou uma melhor representação do alcance da inundação observada que a abordagem tradicional.

Raber (2003) [68] mostra que comunidades locais e algumas agências estaduais têm empreendido esforços para adquirir DEMs (do inglês "*Digital Elevation Models*", ou seja, *Modelos Digitais de Elevação* – MDEs) mais precisos para várias aplicações, incluindo mapeamento de riscos de inundação. A tecnologia mais amplamente adotada para este propósito tem sido sensoriamento remoto LiDAR. A aquisição de um conjunto espacialmente denso de valores de elevação representando o solo pode ser o fator mais importante na obtenção de uma superfície de elevação precisa. A criação de tal conjunto denso de dados de elevação utilizando sensoriamento remoto LiDAR requer dois elementos, uma alta densidade de aquisição de dados brutos durante a fase de coleta e um rigoroso pós-processamento para identificar retornos de solo. Uma alta densidade de aquisição de dados geralmente requer custos significativamente elevados associados com o sensor LiDAR, quadro de pessoal técnico especializado e maiores recursos computacionais que são necessários para processar grande densidade de dados. Raber (2003) [68], em sua pesquisa, teve como objetivo desenvolver uma relação entre a densidade de aquisição de dados LiDAR e precisão do MDE. Especificações para a coleta/processamento de dados em mapeamentos futuros poderiam utilizar esta relação empírica para atingir os requisitos de precisão desejados. Para esta investigação, uma simulação GIS (do inglês "*Geographic Information System*", ou seja, *Sistema de Informação Geográfica* – SIG) simples foi desenvolvida de modo a criar, a partir dos dados LiDAR, um conjunto de superfícies geradas no SIG. A precisão na vertical e na horizontal dos MDEs

resultantes são comparados com a densidade de aquisição de dados a fim de estabelecer a relação entre essas variáveis.

Em Webster et al. (2004) [92], como parte de um projeto recente para determinar os impactos costeiros das mudanças climáticas e da ascensão do nível do mar na *Ilha do Príncipe Eduardo* (do inglês "*Prince Edward Island*" – PEI), a altimetria do Laser Scanner Aerotransportado LiDAR foi empregada para adquirir MDEs de alta resolução e outras informações sobre a paisagem. A área de estudo abrange a área urbana de Charlottetown (Canadá) e uma parcela significativa da área rural da costa norte do PEI. O nível do terreno do MDE foi ajustado para *datum gráfico* (do inglês "*chart datum*" – CD) hidrográfico e usado para modelar a magnitude dos níveis de água de inundação de três tempestades, incluindo um evento onde um recorde foi alcançado na tempestade de 21 de janeiro de 2000, bem como dois níveis mais elevados representando cenários de inundação após a ascensão do nível do mar. A modelagem da inundação foi desenvolvida em um MDE, ou seja, uma grade referenciada do terreno, como parte de um SIG. As grades digitais resultantes foram vetorizadas ao longo do limite da inundação. Os vetores que representam os limites da água no pico da tempestade para os três cenários de inundação foram implementados no SIG e sobrepostos aos limites de propriedade da cidade e camadas que ilustram os dados da avaliação. Webster et al. (2004) [92] demonstrou que MDEs derivados dos dados validados do LiDAR aerotransportado são ferramentas eficientes e adequadas para mapeamento de zonas com perigo de risco de inundação em comunidades costeiras.

Para Webster et al. (2006) [93], inundações costeiras devido a tempestades e ascensão do nível do mar representam uma ameaça significativa à costa atlântica do Canadá. Os dados do LiDAR aerotransportado proporcionam a densidade espacial e precisão vertical necessária para o mapeamento de áreas costeiras em risco. Segundo Webster et al. (2006) [93], em 2003 e 2004, utilizando dois sistemas LiDAR, foi realizado o levantamento de uma parte relativamente grande da costa de New Brunswick (Canadá) se estendendo ao longo do Estreito de Northumberland. Os

níveis de água resultantes de uma tempestade que ocorreu em janeiro de 2000 foram registrados utilizando GPS (do inglês "*Global Positioning System*", ou seja, *Sistema de Posicionamento Global*) e foram utilizados como marcadores para mapeamento de áreas em risco de inundações. Mapas de profundidade de inundação também foram gerados para todos os níveis de água e utilizados para avaliação dos impactos socioeconômicos e ambientais das inundações. Mapas de risco de inundação foram construídos utilizando rotinas de processamento de um SIG para determinar a extensão espacial da área inundada para um determinado nível de água. A alta resolução do MDE LiDAR capturando aterros como leitos de estradas elevados permitiu impedir na modelagem a inundação no interior. Onde havia uma conectividade devido à presença de bueiros ou pontes, o MDE foi cortado em todo o leito da estrada para simular a conexão entre o oceano e áreas baixas localizadas a montante no SIG. Uma rotina automatizada foi então utilizada para gerar mapas de extensão da inundação para diferentes níveis de água em incrementos de 10 cm, começando a partir de 0 até 4 m acima do nível médio do mar. A validação do mapeamento de zonas inundáveis e profundidade das águas de inundação, para o nível da água no pico da tempestade de janeiro de 2000 foi possibilitada por meio de visitas de campo. As validações da metodologia indicaram que as simulações tiveram precisão dentro de 10 a 20 cm. Os dados LiDAR também foram utilizados para avaliar a probabilidade de ondas de tempestade atingirem um nível mais elevado do que a crista da duna ou se haveria erosão do terreno no pontal arenoso em *La Duna de Bouctouche*, grande restinga (do inglês "*spit*", e do francês "*flèche*") de New Brunswick. Isso mostrou uma alta vulnerabilidade a danos por tempestades para os habitats essenciais na restinga. Os mapas produzidos a partir de dados derivados do LiDAR nesse estudo estão disponíveis para as comunidades costeiras e planejadores regionais para utilização no processo de planejamento e de auxílio no desenvolvimento de estratégias de adaptação a longo prazo.

Webster, Mosher e Pearson (2008) [94] descrevem uma nova ferramenta de software, o **Water Modeler**, que é um componente de um *Sistema de Suporte à*

Decisão (SSD) de Zonas Costeiras. O Water Modeler pode analisar uma série temporal de registros de nível d'água (observações dos marégrafos) para determinar o risco associado a um alto nível de água resultante de um evento de tempestade ou um aumento do nível do mar a longo prazo. A nova ferramenta tem sido aplicada em dois estudos de caso em Nova Scotia, Canadá, onde os mapas de risco de inundação costeira foram derivadas de modelos digitais de elevação derivados de alta resolução LiDAR. O primeiro estudo de caso foi aplicado para Annapolis Royal, na costa da Baía de Fundy, enquanto o segundo analisa a área de Kingsburg do Lunenburg County, na costa do Atlântico. Os registros de marégrafo de Saint John, em New Brunswick, e os registros de marégrafo de Halifax, em Nova Scotia, foram usados no Water Modeler, para Annapolis Royal e Kingsburg, respectivamente, com o objetivo de examinar os riscos de inundações costeiras. A tempestade do *Dia da Marmota* (do inglês "*Groundhog Day*") de 1976, que causou inundações costeiras em torno da Baía de Fundy, foi usada como referência para Annapolis Royal, e o furacão Juan, que ocorreu em setembro de 2003, foi a tempestade de referência utilizada a partir do registro do marégrafo de Halifax. A combinação de *Ferramentas de Geomática*⁴ (do inglês "*Geomatics Tools*"), como MDEs LiDAR de alta resolução para inundações costeiras e o Water Modeler, para estimar o risco associado, permitem um melhor planejamento futuro para as comunidades costeiras.

De acordo com Webster (2010) [91], uma parcela significativa da costa marítima canadense tem sido levantada com LiDAR aerotransportado. O objetivo destes levantamentos tem sido o mapeamento de risco de inundações a partir de tempestades e do aumento do nível do mar projetado no longo prazo devido às mudanças climáticas para incluir nos projetos todas as três Províncias Marítimas: *Ilha do Príncipe Eduardo*, New Brunswick e Nova Scotia. O LiDAR fornece as informações necessárias para o mapeamento de inundações costeiras relacionadas a eventos de tempestade associados a níveis de maré alta em muitos locais nesta região. A

⁴ O termo que se refere ao grande impacto da informática na automação da Cartografia, Geodésia, Sensoriamento Remoto e SIG, maiores detalhes disponível em: <<http://www.geomatics.ucalgary.ca/about/whatis>>, com acesso em: 29 maio 2012.

comunidade de Annapolis Royal, em Nova Scotia, ao lado da Baía de Fundy, foi levantada com LiDAR e foi construído um MDE com 1 m de espaçamento para o mapeamento de inundação. A validação do LiDAR usando uma grade de levantamento GPS indicou uma precisão vertical melhor do que 30 cm. Uma tempestade de referência, conhecida como a tempestade do *Dia da Marmota*, de 1 a 3 de fevereiro de 1976, foi utilizada para avaliar os mapas de inundações e para ilustrar os efeitos de diferentes projeções do aumento do nível do mar com base em cenários de mudanças climáticas. Perto da costa, uma batimetria foi mesclada com o LiDAR e observações de vento local e usadas para modelar o impacto das ondas significativas durante esta tempestade de referência. Séries temporais de longa duração de observações do nível de água (superior a 30 anos) de toda a Baía de Fundy em Saint John e New Brunswick foram utilizadas para estimar períodos de retorno de níveis de água em condições presentes e futuras de aumento do nível do mar.

Segundo Mackinnon (2004) [48], vários produtos de simulação de cheias podem ser modelados usando LiDAR, SIGs e ferramentas de Sensoriamento Remoto. Mapas de risco, extensão e profundidade de inundação representados por eventos de inundação de tempestades reais foram gerados a partir de superfícies de alta resolução LiDAR com um SIG. Estes produtos fornecem informações valiosas para o planejamento estratégico, de modo a ajudar a prevenir danos causados pelas inundações costeiras. O seu objetivo principal foi gerar mapas de inundações e MDEs com precisão na vertical melhor que 30 centímetros para a área costeira do sudeste de New Brunswick, em apoio ao Projeto A591 do *Fundo de Ação de Mudanças Climáticas* (do inglês "*Climate Change Action Fund*" – CCAF). O projeto do CCAF é uma iniciativa em parceria com o *Departamento de Meio Ambiente do Canadá* (do inglês "*Environment Canada*" – EC), *Serviço Geológico do Canadá* (do inglês "*Geological Survey of Canada*" – GSC), *Departamento de Recursos Naturais do Canadá* (do inglês "*Natural Resources Canada*" – NRCan), *Departamento de Recursos Naturais e Energia de New Brunswick* (do inglês "*New Brunswick Natural Resources and*

Energy"), Agência de Parques do Canadá (do inglês "*Parks Canada*"), Universidade de Moncton, Escola Técnica de Nova Scotia (do inglês "*Nova Scotia Community College*" – NSCC) e da Universidade de New Brunswick. O objetivo da equipe do projeto do CCAF foi colaborar na geração de mapas precisos e informações que irão quantificar os impactos das mudanças climáticas, aumento do nível do mar, eventos de tempestades e erosão costeira em apoio à gestão sustentável e ao desenvolvimento de estratégias de adaptação.

Continuando em Mackinnon (2004) [48], também visto em Mackinnon (2005) [48], sistemas aerotransportados LiDAR obtêm dados de altitude de alta resolução que podem ser processados para produzir MDEs precisos. O sensor emite pulsos de laser em direção à superfície e registra a diferença de tempo entre o contato com a superfície e o retorno após reflexão. Um GPS de alta precisão e uma *Unidade de Medição Inercial* (do inglês "*Inertial Measurement Unit*" – IMU), representados na Figura 7, foram usados para determinar a localização e a orientação da aeronave de modo que a localização do terreno dada pelo pulso de laser de retorno pudesse ser determinada com precisão. A tecnologia LiDAR foi utilizada para produzir três representações tridimensionais precisas da paisagem e fornecer informações para realizar uma modelagem precisa de risco de inundação. Os níveis de água da tempestade de janeiro de 2000, que causou inundações costeiras significativas, foram utilizados para construir mapas de inundações. Além dos mapas de risco de inundação representado por áreas que seriam inundadas, mapas de profundidade da inundação e mapas de risco de inundação para uma variação contínua de níveis também foram gerados. A área de estudo foi localizada ao longo da zona costeira do sudeste de New Brunswick (Canadá), no Parque Nacional Kouchibouguac, sul da ilha de Jourimain e incluiu as áreas de maior interesse científico e de maior prioridade.

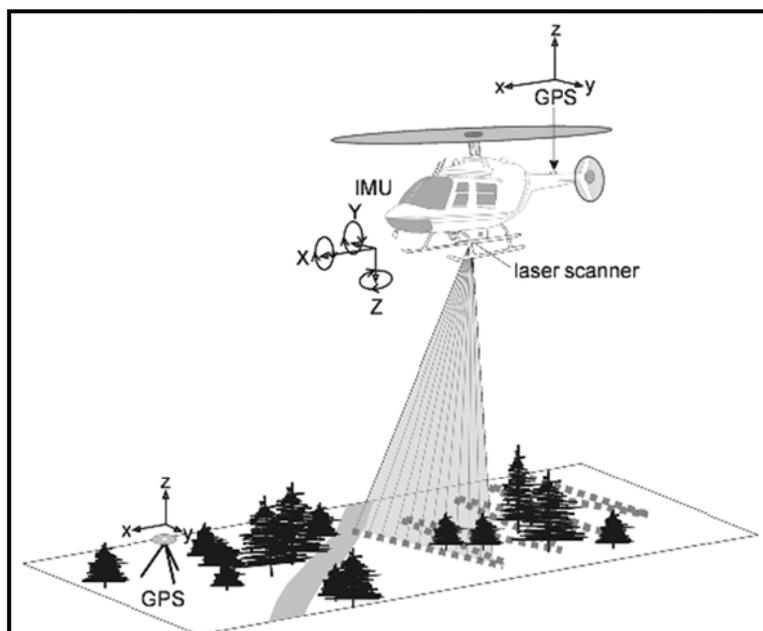


Figura 7 – Esquema do Levantamento LiDAR.
Fonte: Webster et al. (2004) [92].

Burmester (2005) [7], apresenta resultados da aplicação dos dados adquiridos com o suporte da tecnologia de mapeamento a laser LiDAR, bastante recente no Brasil, nos problemas de escoamento em canais naturais. Quando se dispõe de registros de níveis de água para grandes cheias ao longo do trecho em estudo, a estimativa da rugosidade (coeficiente de Manning) das planícies de inundação pode ser realizada através de calibração. Já quando não se dispõe desses registros, usualmente o coeficiente de rugosidade é estimado a partir de tabelas ou fotos de canais similares. Esse procedimento pode levar a erros consideráveis em estudos de remanso. Então, propõe um método para estimar os parâmetros hidráulicos de rugosidade, expresso pelo coeficiente de Manning, particularmente para superfícies cobertas de vegetação como planícies de inundação, a partir das informações coletadas pelo mapeamento a laser, em um trecho do rio Iguaçu entre Porto União e União da Vitória, no Estado do Paraná. E conclui que a técnica LiDAR proporciona uma estimativa mais precisa das dimensões dos elementos de rugosidade e pode contribuir significativamente para uma estimativa bastante razoável do coeficiente de rugosidade de Manning em planícies de inundação.

Haile e Rientjes (2005) [34] alertam para a necessidade urgente de melhorar a qualidade das informações de entrada na modelagem de inundações, devido ao aumento da frequência desse tipo de evento nas cidades nas últimas décadas, para a obtenção de resultados mais precisos em magnitude e probabilidade de superação destes eventos extremos, para a concepção de medidas mitigadoras das suas consequências. Os autores analisam o caso da cidade de Tegucigalpa, capital de Honduras, que foi severamente afetada por inundações causadas por eventos extremos de chuva. Foi utilizado um MDE de alta resolução, com espaçamento de 1,5 m para a *grade* regular retangular de pontos gerados a partir de dados LiDAR como base fisiográfica para a modelagem de inundações em Tegucigalpa, e através da reamostragem deste MDE para resoluções menores de até 15 m, gerando novamente informações para a modelagem e servindo de comparação para os resultados já obtidos. O estudo revelou com essa análise de sensibilidade da resolução do MDE que a representação topográfica é essencial e que a saída do modelo de inundações é significativamente afetada pela resolução do MDE.

Sole et al. (2008) [79] destacam que as inundações são uma das catástrofes naturais mais graves, comuns e dispendiosas que muitos países estão enfrentando. As alterações climáticas e o crescimento das áreas urbanas têm aumentado drasticamente a frequência e a gravidade das inundações. Isso tem aumentado o interesse da comunidade científica e das instituições públicas, criando estudos mais precisos sobre a delimitação das possíveis áreas de inundação. A definição de áreas de inundação em zonas costeiras é extremamente difícil por causa das pequenas mudanças nas elevações da superfície terrestre e por causa da presença de estruturas artificiais, que podem modificar significativamente a distribuição da inundação. Assim, a área estudada foi a planície costeira do Mar Jônico da região de Basilicata (Sul da Itália), que é atravessada por cinco dos seis principais rios da região: Bradano, Basento, Cavone, Agri e Sinni. Os objetivos, deste estudo, são de analisar a capacidade de dados de Laser Scanner na descrição da morfologia costeira e na modelagem de áreas com risco de inundação; definir um *Modelo Digital do Terreno*

(MDT), através da geração de um TIN (do inglês "*Triangular Irregular Network*", ou seja, *Grade Irregular Triangular*), capaz de descrever a morfologia do canal e da planície de inundação, trabalhando com dados de altimetria a laser de alta resolução e dados topobatimétricos; definir a estratégia mais eficaz para a delimitação das áreas de inundação usando a comparação de um modelo unidimensional, o HEC-RAS do USACE (do inglês "*U.S. Army Corps of Engineers*", ou seja, *Corpo de Engenheiros do Exército dos EUA*), com um esquema bidimensional encontrado nos modelos MIKE 21 HD do DHI (do inglês "*Danish Hydraulic Institute*", ou seja, *Instituto de Hidráulica da Dinamarca*), FLO-2D por O'brien (2007 apud SOLE et al., 2008) [79], e FLATModel por Medina et al. (2007 apud SOLE et al., 2008) [79].

Em Dell, Arthur e Pender (2008) [20], dois modelos unidimensionais foram criados em InfoWorks CS para avaliar o efeito dos erros encontrados em MDEs LiDAR na modelagem de ondas de inundação urbana. Um modelo em InfoWorks construído com dados de superfície a partir de um MDE LiDAR de Greenfield, Glasgow (cidade da Escócia), foi comparado com um modelo InfoWorks construído com dados de valores de referência. Estes modelos foram comparados com um modelo 2D TUFLOW a fim de analisar mais detalhadamente o uso da modelagem 1D em relação à modelagem 2D. Os resultados mostram que o modelo InfoWorks com valores de referência e o Modelo 2D TUFLOW têm respostas bastante semelhantes. No entanto, bons resultados foram apresentados na comparação entre os três modelos. Os resultados mostram o potencial de um modelo em usar dados LiDAR em um esquema unidimensional para uma razoável previsão da extensão da inundação.

Segundo Costa et al. (2009) [15], nos últimos anos observa-se o surgimento, no mercado brasileiro, da varredura a laser feita pelo chamado Sistema LiDAR, que, associada aos SIGs, podem ser bastante úteis ao planejamento. É apresentada uma proposta de utilização do Geoprocessamento como ferramenta que possa auxiliar o Poder Público Municipal no direcionamento de suas políticas públicas, principalmente ligadas ao setor da Defesa Civil, gerando, em um SIG, cenários de

inundação com dados altimétricos provenientes do LiDAR sobreposto por dados socioeconômicos para o perímetro urbano de Caratinga, em Minas Gerais.

De acordo com Abdullah, Rahman e Vojinovic (2009) [1], o MDT é uma das bases de entrada importantes na aplicação de inundações urbanas. Isso é porque ele influencia a direção e velocidade de fluxo, extensão e profundidade da inundação. O LiDAR oferece MDTs precisos para grandes áreas com levantamento dentro de um curto período de tempo. Do conjunto de processos em dados LiDAR, a filtragem (classificação) representa o maior desafio. A avaliação e comparação de algoritmos de filtragem são feitas para descobrir qual deles podem melhor filtrar os dados LiDAR, a fim de desenvolver um MDT preciso que se adapta a aplicação de inundações urbanas. Assim, é feita uma simulação de inundação usando o software MIKE Flood para avaliar o resultado do processo de filtragem para a geração do MDT e finalmente da modelagem da inundação. Resultados precisos em aplicação de inundação urbana dependem do quão próximo o MDT pode representar a superfície urbana. A partir de resultados e avaliação global, as vantagens e desvantagens de cada filtro são analisadas formalizando uma nova hipótese para o novo algoritmo de filtragem que é adequado para a aplicação de inundações urbanas.

Gibson, Nygaard e Sclafani (2010) [30] desenvolveram um modelo de transporte de sedimentos unidimensional para as últimas 20 milhas do rio Cowlitz (afluente do rio Columbia em Washington, Estados Unidos) para avaliar impactos de longo prazo de sedimentos no risco de inundação. A geometria do modelo foi levantada a partir de dados batimétricos coletados em 2009 e dados do LiDAR coletados em 2007 para as margens. O HEC-RAS foi então usado para modelar a dinâmica de sedimentos, sendo calibrado para medições de mudança do leito num período de tempo de 5 anos de observações ajustando os parâmetros da função transporte selecionada.

Para Addaa et al. (2010) [2], a simulação e previsão de enchentes e seus efeitos sobre edificações e utilitários urbanos fornecem uma representação visual poderosa para a tomada de decisão sobre quando os edifícios na zona de inundação podem estar seguros para as pessoas que os ocupam. Mapas tradicionais em papel e mapas

digitais não podem nos dar a possibilidade de fazer uma visualização 3D a fim de estudar o efeito detalhado de uma situação de inundação sobre os utilitários urbanos. Assim, Addaa et al. (2010) [2] exploram os dados do LiDAR e a sua aplicação na modelagem 3D fornecendo uma análise do risco de inundações em edificações e utilitários urbanos. Os dados do LiDAR possibilitam uma cobertura mais barata, rápida e densa multidimensional de recursos para mapeamento 3D. Estes dados do LiDAR foram adquiridos para a cidade de Fredericton (New Brunswick, Canadá) em 2007 e processados para criar um MDT e gerar mapas 3D. Polígonos de inundação foram criados para intervalos de 0,2 m de altura para a área de estudo. Para fortalecer ainda mais a percepção visual, modelos 3D das edificações e utilitários urbanos foram gerados para a área de estudo e interconectados ao MDT fornecendo uma visão mais realista durante as inundações. Finalmente, um cenário de inundação foi produzido para cada um dos níveis de inundação previstos para visualização através de uma interface Web. A Figura 8a mostra o modelo de inundação para a região de New Brunswick, desenvolvido pela Organização de Medidas Emergenciais, do inglês "*Emergency Measures Organization*" (EMO), de New Brunswick, com contribuição da Universidade de New Brunswick, disponível em: <<http://geonb.snb.ca/riverwatch/>>, com acesso em: 24 de maio 2012 descrito em Addaa et al. (2010) [2], e a Figura 8b ilustra uma Vista 3D da enchente ocorrida em 1973 em Fredericton, disponível em: <<http://asp.caris.com/riverwatch/viewer-e.cfm>>, com acesso em: 24 de maio 2012.



Figura 8 – (a) Mapas on-line de previsão e alerta de inundações em New Brunswick. (b) Vista 3D da enchente ocorrida em 1973 em Fredericton.

Em Bales et al. (2007) [3], mapas de inundação foram criados para locais de medição de vazão selecionadas na bacia hidrográfica do rio Tar, na Carolina do Norte. Dados LiDAR com uma precisão vertical de aproximadamente 20 cm, fornecidos pelo Sistema de Informação de Mapeamento de Planície de Inundação do Programa de Mapeamento de Planície de Inundação da Carolina do Norte, foram processados para produzir dados topográficos para os mapas de inundação. Uma massa de pontos de dados LiDAR do terreno foram reprocessados em um MDE com células regularmente espaçadas de 1,5 m por 1,5 m. Uma ferramenta foi desenvolvida como parte deste projeto para conectar caminhos de fluxo, ou córregos, que foram desconectados inapropriadamente no MDE por feições tais como uma ponte ou passagem de estrada. O modelo HEC-RAS, do USACE, foi utilizado para a modelagem hidráulica em cada uma das estações de estudo. Combinados, os modelos hidráulicos do rio Tar abrangeram 272 km de córregos da bacia, incluindo cerca de 162 km do canal principal do rio Tar. Os modelos calibrados foram usados para gerar um conjunto de contornos de superfície de água para cada um dos 11 trechos modelados com incrementos de 0,305 m para níveis de água que vão desde o nível de extravasamento do canal principal para a planície de inundação (do inglês "*bankfull*") a aproximadamente o nível de água mais elevado registrado na medição mais a jusante em cada trecho modelado. Áreas inundadas foram identificadas por subtração da elevação da superfície de água em cada célula de uma grade regularmente espaçada em 1,5 m por 1,5 m a partir da elevação da superfície da terra nesta célula, através de uma rotina automatizada que foi desenvolvida para identificar todas as células inundadas hidraulicamente conectadas a células mais a jusante, medidas no domínio do modelo. Mapas de inundação mostrando redes de transporte e ortoimagens foram preparadas para exibição na Internet. Estes mapas também estão ligados ao website de vazão em tempo real do *Centro de Ciências da Água da Carolina do Norte* (do inglês "*North Carolina Water Science Center*") do *Serviço Geológico dos EUA* (do inglês "*U.S. Geological Survey*" – USGS), como visto mais adiante na Figura 9. Os mapas de inundação do rio Tar foram desenvolvidos

usando um modelo hidráulico de fluxo permanente. Esta suposição tem, claramente, um menor efeito em mapas de inundação produzidos para baixos fluxos que para altos fluxos quando normalmente leva mais tempo para inundar áreas. Uma inundação em que os níveis de água do pico caem lentamente mais provavelmente resultará em maior inundação do que uma inundação semelhante em que os níveis de água do pico caem rapidamente. A abordagem unidimensional da modelagem utilizada nesse estudo resultou em boa concordância entre as medições e simulações. Esta abordagem é razoável para um canal prismático em uma planície de inundação relativamente estreita, mas pode não ser apropriada para rios sinuosos com vários afluentes em largas planícies de inundação. Modelos bidimensionais são cada vez mais utilizados para a simulação da inundação na planície de inundação devido à variabilidade na topografia em toda a planície de inundação, particularmente em largas planícies de inundação com inúmeros afluentes.

O U.S. Geological Survey (2012) [85] mostra uma nova e poderosa ferramenta para a resposta e mitigação às inundações. São mapas digitais geoespaciais de inundação que mostram a extensão e profundidade da água da inundação na superfície da terra. Como as inundações são a principal causa de perdas entre os desastres naturais, o USGS está ativamente envolvido no desenvolvimento do mapeamento de inundação em todo o território dos *Estados Unidos da América* (EUA). Nos termos do seu principal objetivo estratégico está a redução da vulnerabilidade das pessoas que vivem em áreas mais em risco de desastres naturais. Trabalhando com parceiros como o *Serviço Meteorológico Nacional* (do inglês "*National Weather Service*" – NWS), o USACE, a *Agência Federal de Gerenciamento de Emergências* (do inglês "*Federal Emergency Management Agency*" – FEMA), as agências estatais, as agências locais, e as universidades, o USGS está fornecendo recursos científicos para mapeamento de inundação, buscando ajudar a construir comunidades mais seguras. Como exemplo do conteúdo disponível em U.S. Geological Survey (2012) [85], a Figura 10 mostra um Mapeamento de Inundações no Estado de Maine, EUA, disponível em: <http://me.water.usgs.gov/ftkent_inund.html>, com acesso em: 27 maio 2012,

detalhado em Lombard (2011) [45]. Da mesma forma, e detalhado em Bales et al. (2007) [3], a Figura 9 mostra um Mapeamento de Inundações no Estado da Carolina do Norte, EUA, disponível em: <<http://water.weather.gov/ahps2/inundation/inundation.php?wfo=rah&gage=trvn7&view=1,1,1,1,1,1,1,1&toggles=10,7,8,2,9,15,6>>, com acesso em: 28 maio 2012 detalhado em Bales et al. (2007) [3].

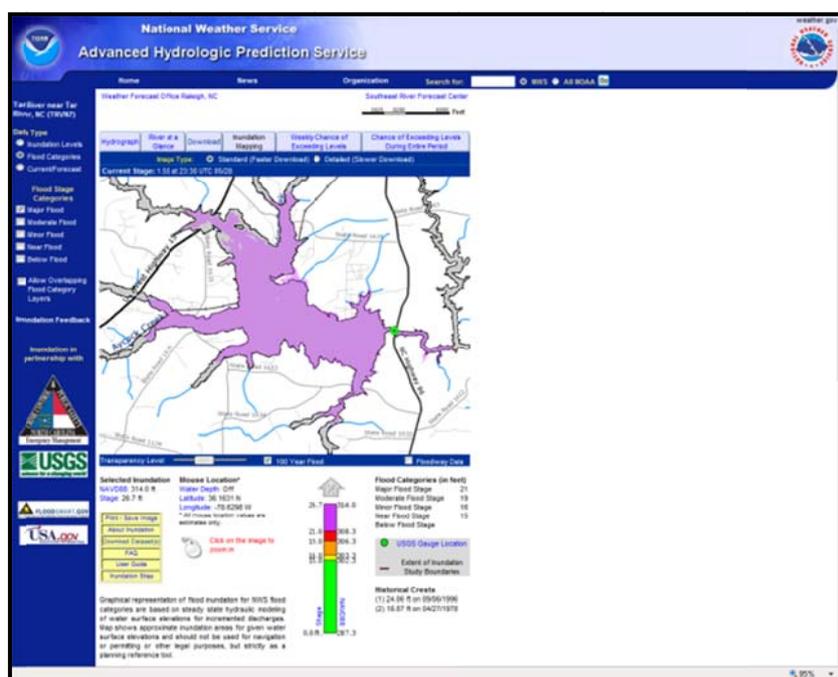


Figura 9 – Mapas Digitais on-line de Inundação no Estado da Carolina do Norte.

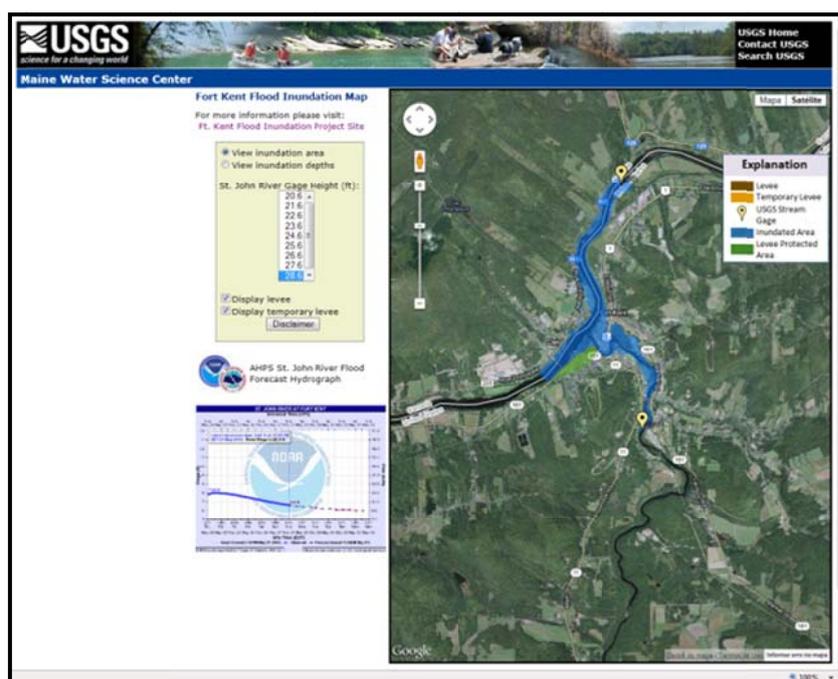


Figura 10 – Mapas Digitais on-line de Inundação no Estado de Maine.

2.3. FERRAMENTAS DE ANÁLISE DOS PROCESSOS DE FORMAÇÃO E PROPAGAÇÃO PARA PREVISÃO E CONTROLE DE INUNDAÇÕES

2.3.1. ENCHENTES, INUNDAÇÕES E ALAGAMENTOS

Segundo Goerl e Kobiyama (2005) [32], os termos *enchente* ou *cheia*, *inundação* e *alagamento*, embora muitas vezes utilizados como sinônimos, representam situações hidrológicas diferentes, como ilustradas na Figura 11. **Enchente** ou **cheia** é um fenômeno hidrológico natural que pode ou não provocar inundação, onde as águas do rio elevam-se até a altura de suas margens, contudo sem transbordar o *leito menor*, nas áreas adjacentes. A partir do momento em que as águas transbordam, ocorre uma **inundação**, ou seja, o escoamento atinge as áreas marginais no *leito maior*, ou *planície de inundação*, ou ainda, *área de várzea*. De acordo com a velocidade em que ocorre o transbordamento, a inundação pode ser classificada como *gradual* ou como *brusca*. Na **inundação gradual** (do inglês "*flood*"), o transbordamento ocorre lentamente. E na **inundação brusca**, popularmente conhecida como enxurrada (do inglês "*flash flood*"), o transbordamento ocorre de forma rápida, repentinamente, com pouco tempo de alarme e alerta para o local de ocorrência. Já o **alagamento** é o acúmulo de águas nas margens e nos perímetros urbanos, não em função do extravasamento do rio ou canal principal, mas da dificuldade de escoamento por problemas de drenagem, que pode ser determinada pela topografia da área, subdimensionamento da rede de drenagem, obstrução das galerias por lixo e entulho, ligações irregulares de esgoto na rede de drenagem pluvial, entre outros.

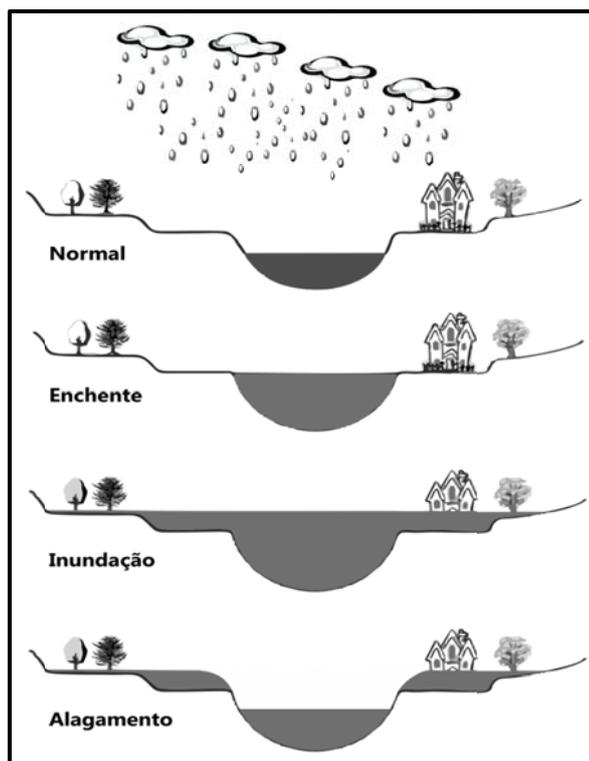


Figura 11 – Diferença entre enchente, inundação e alagamento.
 Fonte: Adaptado de Goerl e Kobiyama (2005) [32].

2.3.2. SISTEMA, MODELO, SIMULAÇÃO E PREVISÃO

Para Dooge (1973 apud TUCCI, 2005) [83], **sistema** é qualquer *estrutura, artifício, esquema* ou *procedimento, real* ou *abstrato*, que *liga*, em um dado intervalo de tempo, uma *entrada, causa* ou *estimulo*, de *matéria, energia* ou *informação*, a uma *saída, efeito* ou *resposta*, de *matéria, energia* ou *informação*.

O papel do sistema é gerar “saídas” a partir de “entradas” e esse inter-relacionamento constitui sua característica essencial. É importante dizer que a “saída” do sistema depende da natureza da “entrada”, das leis físicas envolvidas, e da natureza dos componentes e estrutura do sistema com o qual estes estão ligados.

Segundo Tucci (2005) [83], **modelo** é uma representação do comportamento do sistema. Os modelos comumente são classificados em: *físicos, analógicos* e *matemáticos*. O modelo físico representa o sistema por um protótipo em escala menor, em grande parte dos casos. Já os modelos analógicos valem-se da analogia

das equações que regem diferentes fenômenos, para modelar, no sistema mais conveniente, o processo desejado. Por fim, os modelos matemáticos, também chamados de digitais, são os que representam o sistema por equações matemáticas.

É comum a confusão entre o que seja um *modelo matemático*, e o que se entende por *modelo numérico ou computacional*. O modelo matemático de um fenômeno físico qualquer é apenas um conjunto de equações que expressem de forma matemática o fenômeno em questão. Tais equações podem ou não ter soluções analíticas conhecidas. No entanto, devido à complexidade dos modelos matemáticos de fenômenos naturais, raramente é possível obter-se soluções analíticas. Consequentemente, a única saída é resolver as equações representativas do modelo matemático através de um modelo numérico. E comum, mesmo quando há soluções analíticas conhecidas, recorrer-se a representações numéricas das mesmas na prática da engenharia. Para um dado modelo matemático, expresso através de equações governantes, há uma grande variedade de modelos numéricos possíveis, como por exemplo, modelagem numérica via *método das diferenças finitas*; via *método dos elementos finitos*, ou via combinações destas.

Simulação, ainda em Tucci (2005) [83], é o procedimento de uso do modelo, que em geral, ocorre em três fases, que são classificadas como: *estimativa, ajuste ou calibração; verificação ou validação; e previsão*. A **calibração** dos parâmetros é a fase da simulação onde os parâmetros devem ser determinados. A **verificação** é a simulação do modelo com os parâmetros estimados e onde se verifica a validade da calibração realizada. A **previsão** é a simulação do sistema pelo modelo com parâmetros ajustados para obtenção de sua resposta a diferentes entradas. Estas três fases estão interligadas, sendo que o objetivo principal é a previsão, portanto os parâmetros devem ser determinados na fase de *calibração* para a faixa de *verificação* que contemple as situações da *previsão*. E ainda, a **predição** é a estimativa da variável com um determinado nível de probabilidade com base em dados históricos, visto que, a **previsão** de variáveis hidrológicas num sistema hídrico envolve a estimativa com antecedência no tempo a partir de modelos deste sistema.

Os modelos utilizados na Engenharia de Recursos Hídricos podem ser classificados, segundo Tucci (2005) [83] em diferentes categorias: quanto ao **sistema simulado**, os modelos podem ser de *propagação do escoamento*, *chuva-vazão* ou *chuva-vazão com propagação do escoamento*. Quanto à **utilização**, podem ser *com atualização* (adaptativos) ou *com parâmetros fixos*. Quanto ao **tipo**, podem ser *empíricos*, *conceituais* ou *combinados*. Os modelos *empíricos*, ditos "caixa-preta", são aqueles em que se ajustam os valores calculados aos observados, por meio de funções que não expressam os processos físicos envolvidos; já os *conceituais* estão relacionados aos processos físicos envolvidos no sistema, podendo ser *semi-conceitual*, que mantém um razoável empirismo nos parâmetros das equações envolvidas, e *físicos*, que utilizam as principais equações diferenciais do sistema físico e seus parâmetros são aqueles que mais se aproximam da realidade física do sistema. Os modelos conceituais ainda podem ser *concentrados* ou *distribuídos*, e têm maior capacidade de extrapolação e tratamento das variáveis hidrológicas; no modelo combinado busca aproveitar as vantagens dos dois tipos de modelos. E finalmente, quanto aos **objetivos**, os modelos podem ser de previsão *contínua* ou *eventual*. Na previsão **contínua**, a simulação é realizada ao longo do tempo independentemente das condições hidrológicas: por exemplo, o volume afluente na operação de uma usina hidroelétrica. Já na previsão **eventual**, é realizada em épocas definidas do regime hidrológico, como é o caso da previsão e alerta de inundações e a previsão para a navegação nos períodos de estiagem.

Os modelos apresentam duas fases de uso. A fase **off-line**, ou de ajuste, onde os parâmetros são determinados na calibração e validados na verificação. E a fase **on-line**, em que o modelo é utilizado para previsão, podendo, após verificação do erro entre os valores observados e previstos, fazer a atualização dos parâmetros para a nova previsão.

Na Figura 12 é apresentada uma sequência do uso do modelo dentro das fases de desenvolvimento de um estudo.

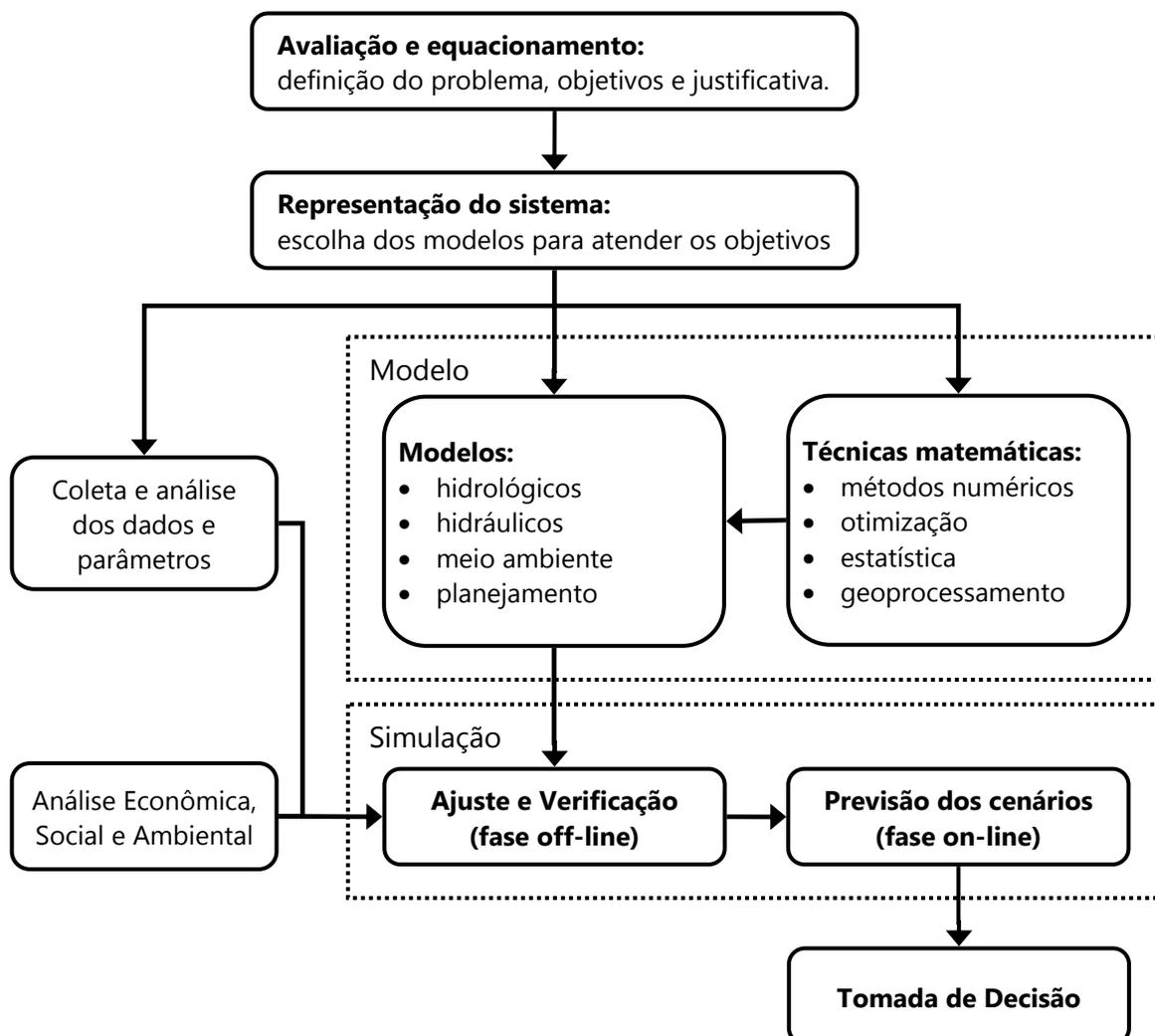


Figura 12 – O modelo dentro das fases de um estudo.

Fonte: Adaptado de Tucci (2005) [83].

Para Tucci (2005) [83], de acordo com os objetivos da previsão, a disponibilidade de dados na bacia, os recursos para investir na coleta dos dados e o tempo de antecedência para minimizar os impactos das inundações, os procedimentos e modelos que podem ser utilizados são:

- a) *Previsão meteorológica da precipitação, integrada a um modelo hidrológico chuva-vazão, para estimar a vazão e nível.* Nesta situação obtém-se a maior antecedência possível, mas com erros potenciais maiores, já que são agregados os erros da previsão da precipitação e do processo de transformação da mesma em vazão;
- b) *Estimativa da precipitação com base em radar meteorológico e rede telemétrica de pluviógrafos integrada a um modelo chuva-vazão.* Esta alternativa é uma das mais promissoras dentro do âmbito de pequenas e médias bacias hidrográficas, devido à pequena antecedência, lembrando que um radar não dispensa a rede telemétrica;
- c) *Estimativa de precipitação com base em rede telemétrica de pluviógrafos integrada a um modelo chuva-vazão.* Esta alternativa é inferior a anterior, mas como na maioria das bacias não existe radar e a rede telemétrica bem distribuída pode permitir bons resultados, a dificuldade normalmente está na estimativa da precipitação futura, que deve ser inserida no modelo chuva-vazão; as alternativas são o uso de previsões meteorológicas e/ou modelos estatísticos para esta estimativa da precipitação futura;
- d) *Previsão da vazão com base em níveis ou vazões do rio a montante e dos seus afluentes.* Esta situação é possível quando existe antecedência, e a contribuição lateral é pequena; e
- e) *Previsão da vazão com base em níveis ou vazões a montante e com uma das alternativas a, b ou c para a bacia de contribuição lateral.* Esta alternativa contempla a defasagem do deslocamento de montante e a rapidez da contribuição lateral mais próxima à seção principal da bacia.

2.3.3. MODELOS HIDROLÓGICO-HIDRODINÂMICOS DOS PROCESSOS DE FORMAÇÃO E PROPAGAÇÃO DAS INUNDAÇÕES

Para Righetto (1998) [72], enquanto os modelos puramente hidrológicos retratam fundamentalmente a resposta de uma bacia hidrográfica através da obtenção de um hidrograma de cheia em seu exutório, os *modelos hidrológico-hidrodinâmicos* possibilitam a compreensão dos processos hidráulicos, além dos hidrológicos, que estão ocorrendo no interior da bacia, o que leva à quantificação de variáveis de relevância para a análise e a tomada de decisões. Então, os **modelos hidrológico-hidrodinâmicos** utilizam as leis básicas da Mecânica, a equação da continuidade e a equação dinâmica, através de uma abordagem física do processo hidrológico.

De acordo com Tucci (2005) [83], o escoamento é retratado através da equação da **continuidade**, das equações de **Euler** para *fluidos ideais* e de **Navier-Stokes** para *fluidos reais*, ou seja, da equação de preservação da continuidade, a *equação da continuidade* (conservação de massa), e da equação que envolve a preservação das forças envolvidas, a *equação dinâmica* (conservação da quantidade de movimento).

O escoamento em superfície livre pode apresentar regimes diferentes, o que vai acarretar em abordagens também diferentes; seja qual for esta abordagem, estas equações serão sempre utilizadas, em sua forma completa ou não, em função do tipo e condições do escoamento a ser estudado. São eles: *escoamento permanente* e *não-permanente*. O regime é dito **permanente** quando os gradientes de velocidade e de nível d'água com relação ao **tempo** são nulos. Este regime pode, ainda, ser subdividido em: *uniforme* e *não-uniforme*. É **uniforme** se sua velocidade é constante, ou seja, os gradientes de velocidade e de nível d'água com relação ao tempo e, também, ao espaço são nulos. E é **não-uniforme** quando os gradientes de velocidade e do nível d'água com relação ao espaço são não nulos. Já no regime **não-permanente**, as variáveis citadas possuem gradientes com relação **ao tempo e ao espaço** não nulos.

2.3.3.1. MODELOS HIDROLÓGICOS

Modelos hidrológicos são expressões matemáticas das complexas inter-relações entre os vários fenômenos físicos que compõe o ciclo hidrológico, ou seja, são modelos que tentam reproduzir as fases do ciclo hidrológico entre a precipitação e vazão. O ciclo hidrológico é o fenômeno global de circulação fechada de água entre a superfície terrestre e a atmosfera, balanceado apenas em escala global e impulsionado fundamentalmente pela energia solar associada à gravidade e à rotação da terra. Em uma visão mais localizada podemos identificar as principais parcelas do ciclo hidrológico (Figura 13) que caracterizam as fases entre a precipitação e o escoamento: *a precipitação, a evaporação de superfícies líquidas, a evaporação de água do solo e a transpiração dos seres vivos* (sendo estas duas parcelas, usualmente, consideradas de modo combinado e denominadas de *evapotranspiração*), *a infiltração, e os escoamentos superficiais, subsuperficiais e subterrâneos* (SOUZA, 2010) [80].

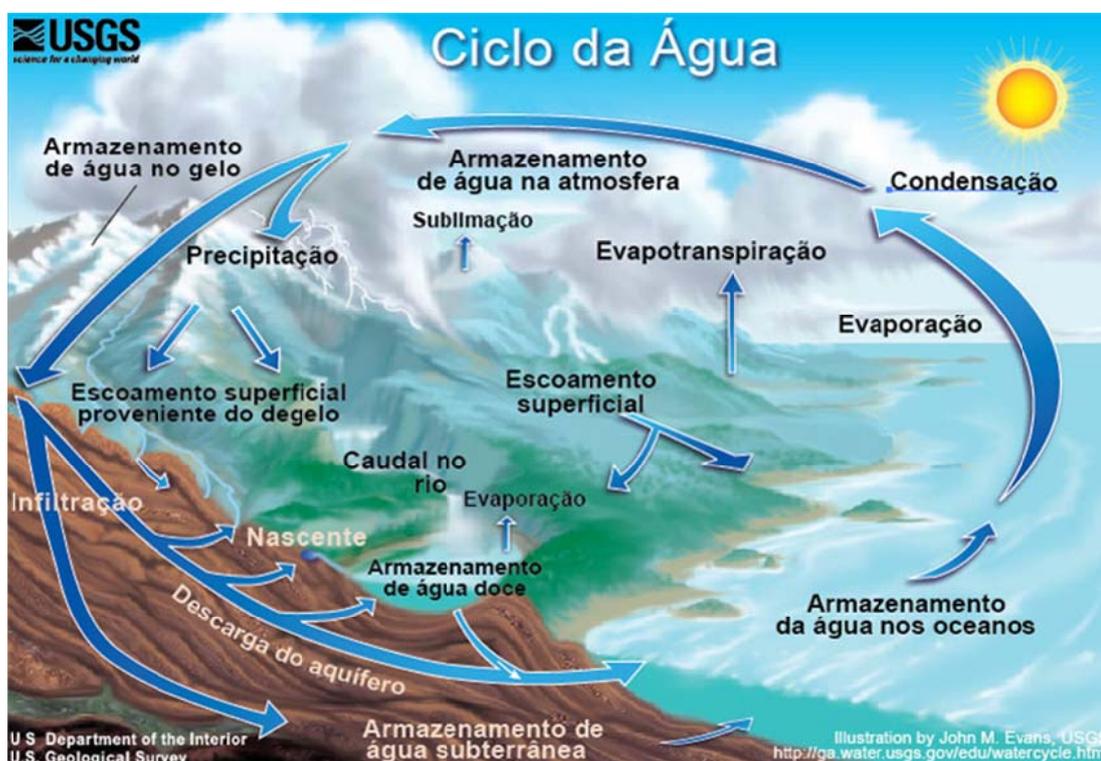


Figura 13 – O Ciclo Hidrológico.

Fonte: USGS (2012) [88].

Segundo Righetto (1998) [72], uma tarefa importante da Hidrologia é a quantificação das vazões de cheia resultantes do excesso de chuva sobre a bacia. A complexidade do processo de transformação da chuva em vazão tem sido simplificada teoricamente por meio de modelos matemáticos, os quais têm a finalidade de representar o processo de maneira relativamente simples, fornecendo resultados com os observados através de medições de precipitações e de vazões. O excesso da água de chuva que não é infiltrado no solo acumula-se inicialmente nas pequenas depressões do terreno para, em seguida, formar uma lâmina d'água e, conseqüentemente, o *escoamento de superfície* ou *deflúvio superficial*.

Para Tucci (2005) [83], estes modelos devem descrever a distribuição espacial da precipitação, as perdas por interceptação, evaporação, armazenamento nas depressões do solo, o fluxo através do solo pela infiltração, percolação e água subterrânea, escoamento superficial, subsuperficial e no rio, ou seja, procuram descrever os diversos caminhos da água pela superfície, pelo interior do solo e pelas calhas fluviais. Fatores como capacidade e saturação do solo, grau de impermeabilização das superfícies e tipo de cobertura vegetal interferem diretamente na quantidade de chuva que irá infiltrar, bem como na parcela que irá chegar aos rios e em quanto tempo. Os modelos buscam integrar os diferentes algoritmos dos processos da parte do ciclo hidrológico entre a precipitação e a vazão no rio. Cada modelo é uma composição de algoritmos: os aspectos mais importantes no uso e mesmo na estrutura dos modelos hidrológicos são os objetivos nos quais o modelo será utilizado, as limitações do modelo na representação dos processos para os objetivos definidos e a qualidade e quantidade das informações utilizadas em conjunto com o modelo.

Em função da variabilidade espacial dos processos hidrológicos na bacia hidrográfica, os modelos podem ser *concentrados* ou *distribuídos*. Eles são concentrados se as funções que representam os processos forem consideradas espacialmente homogêneas para toda a bacia hidrográfica, de modo que a variável independente seja apenas o tempo. Por outro lado, os modelos são chamados

distribuídos se os processos forem variáveis não apenas no tempo, mas também no espaço. Quanto maior a área da bacia hidrográfica, maior a necessidade de usar modelos distribuídos para representar os seus processos, pois a variabilidade espacial hidrológica constitui influência significativa nos mesmos. E ainda, em função da discretização, os modelos podem ser distribuídos *por sub-bacias* ou *por módulos*.

Um exemplo didático e simplificado, descrito em Souza (2010) [80], da estrutura de um modelo chuva-vazão é o modelo SMAP (LOPES, 1999) [46], que em sua versão diária, é constituído de quatro reservatórios lineares hipotéticos, cujas variáveis de estado desses reservatórios são atualizadas a cada dia de acordo com o seguinte procedimento:

$$R_{solo(t)} = R_{solo(t-1)} + P_{(t)} - Es_{(t)} - Er_{(t)} - Rec_{(t)} \quad (2.1)$$

$$R_{sup(t)} = R_{sup(t-1)} + Es_{(t)} \times (1 - Parc_{ss}) - Ed_{(t)} \quad (2.2)$$

$$R_{ssp(t)} = R_{ssp(t-1)} + Es_{(t)} \times Parc_{ss} - Ess_{(t)} \quad (2.3)$$

$$R_{sub(t)} = R_{sub(t-1)} + Rec_{(t)} - Eb_{(t)} \quad (2.4)$$

onde $R_{solo(t)}$ é o reservatório do solo na zona aerada (mm) no instante de tempo t , $R_{sup(t)}$ é o reservatório da superfície da bacia (mm) no instante de tempo t , $R_{ssp(t)}$ é o reservatório subsuperficial da bacia (mm) no instante de tempo t , $R_{sub(t)}$ é o reservatório subterrâneo na zona saturada (mm) no instante de tempo t , $Es_{(t)}$ é o escoamento superficial (mm) no instante de tempo t , $Ed_{(t)}$ é o escoamento direto (mm) no instante de tempo t , $Eb_{(t)}$ é o escoamento básico (mm) no instante de tempo t , $Ess_{(t)}$ é o escoamento subsuperficial (mm) no instante de tempo t , $P_{(t)}$ é a chuva média na bacia (mm) no instante de tempo t , $Er_{(t)}$ é a evapotranspiração real (mm) no instante de tempo t , $Rec_{(t)}$ é a recarga subterrânea (mm) no instante de tempo t , $Parc_{ss}$ é a parcela de escoamento subsuperficial (com valor entre 0 e 1) e t é o instante de tempo em dias.

A Figura 14 ilustra a concepção desta versão do modelo SMAP, onde E_p é a evaporação potencial (mm/dia, medidas padrão de Tanque classe A), E_{s2} é a parcela do escoamento superficial que alimenta o reservatório R_{ssp} e Q é a vazão de escoamento (m^3/s).

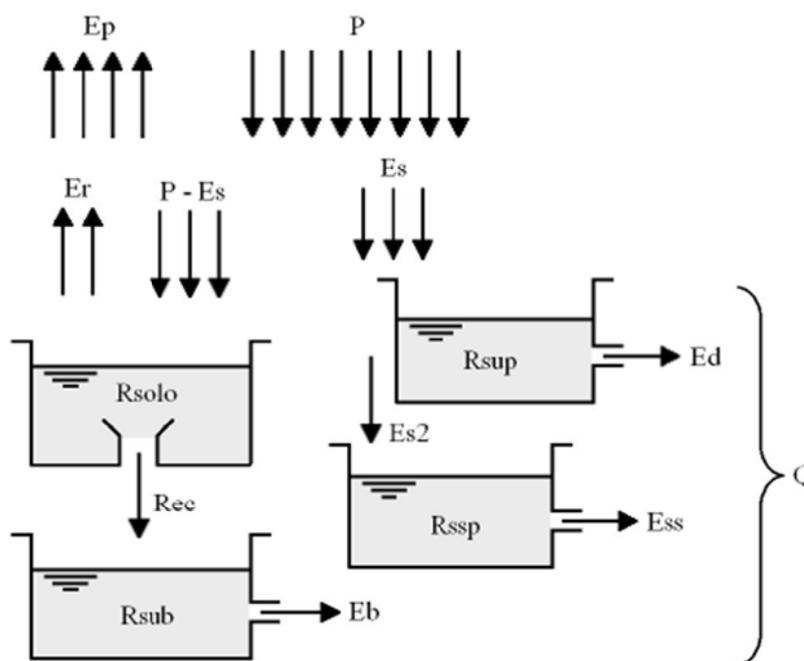


Figura 14 – O Modelo SMAP.

Fonte: Souza (2010) [80] adaptado de Lopes (1999) [46].

O modelo SMAP (do inglês "*Soil Moisture Accounting Procedure*") é um modelo determinístico de simulação hidrológica do tipo transformação chuva-vazão, que foi desenvolvido em 1981 por Lopes, Braga e Conejo, originalmente para intervalo de tempo diário e posteriormente apresentadas versões horária e mensal, adaptando-se algumas modificações em sua estrutura (LOPES, 1999) [46].

2.3.3.2. MODELOS HIDRODINÂMICOS

Com a aplicação da lei da conservação de massa e da segunda lei de Newton a um volume de controle representativo do escoamento, surgem as equações básicas usadas na modelação matemática dos escoamentos superficiais, a equação da continuidade (conservação de massa), e a equação que envolve a preservação das forças envolvidas, equação de Navier-Stokes para fluidos viscosos estabelecida em 1827, a equação dinâmica (conservação da quantidade de movimento), segundo Silva, Mascarenhas e Miguez (2007) [78], e Tucci (2005) [83].

Considerando um volume de controle elementar ($V.C$) de comprimento dx , onde ocorre o escoamento de uma seção transversal de montante para uma de jusante. Com x medido no sentido longitudinal do canal; A , área da seção transversal; y , lâmina d'água (tirante) ou cota da superfície livre; B , largura do canal na superfície livre; ρ , massa específica da água; v , velocidade média na seção de montante; e t , instante em que o fluido ocupa o volume de controle ($V.C$).

A equação da continuidade, de uma forma generalizada, pode ser escrita como a vazão em massa através da superfície de controle ($S.C$), sendo igual à diminuição por unidade de tempo da massa (ρdV) no interior do volume de controle (PORTO, 1998) [65], ou seja:

$$\left(\begin{array}{l} \text{equação da} \\ \text{continuidade} \end{array} \right) \quad \int_{S.C} \rho \vec{v} d\vec{A} = - \frac{\partial}{\partial t} \int_{V.C} \rho dV \quad (2.5)$$

Agora, aplicando o teorema da quantidade de movimento para este volume de controle no instante t , tem-se que o somatório de todas as forças que atuam sobre o fluido contido no volume de controle é igual ao fluxo por unidade de tempo da quantidade de movimento através da superfície de controle, mais a variação por unidade de tempo da quantidade de movimento da massa no interior do volume de controle (PORTO, 1998) [65], isto é:

$$\left(\begin{array}{l} \text{equação da} \\ \text{quantidade de} \\ \text{movimento} \end{array} \right) \quad \Sigma F = \int_{S.C} \vec{v}(\rho \vec{v} d\vec{A}) + \frac{\partial}{\partial t} \int_{V.C} v(\rho dV) \quad (2.6)$$

Considerando as seguintes hipóteses, que podem ser encontradas em Porto (1998) [65], Ramos et al. (1989) [70], Silva, Mascarenhas e Miguez (2007) [78], e Tucci (2005) [83], as Equações 2.5 e 2.6 passam por simplificações e surgem as Equações 2.9 e 2.10:

(a) FUNÇÕES CONTÍNUAS

Admite-se que as funções sejam contínuas em relação ao tempo e ao espaço longitudinal na definição das equações diferenciais. Isso implica em variação gradual das seções transversais e ausência de singularidades (contrações, pilares de ponte, soleiras de fundo etc.). Mesmo devido a variabilidade física dos rios, esta pode não ser uma limitação do modelo, se aplicados tratamentos específicos às singularidades e variações bruscas da função no tempo.

(b) FLUIDO INCOMPRESSÍVEL E HOMOGÊNEO

Fluido sem significantes variações na densidade. Para a maioria dos sistemas simulados pelas equações do escoamento, ou seja, rios, canais e superfície de bacias, estas simplificações podem ser adotadas.

Essa hipótese é válida na grande maioria dos casos práticos, excetuando-se os estuários não fortemente misturados. Na presença de sal, sem misturação total, devem-se incluir termos referentes à direção vertical na equação dinâmica.

(c) DISTRIBUIÇÃO HIDROSTÁTICA DE PRESSÃO NA VERTICAL

Desprezando eventuais efeitos de componentes de aceleração da vertical. Sendo L , o comprimento de onda, muito grande comparado ao valor de y , a profundidade do fluxo, ou seja, a relação $y/L \ll 1$, isto assegura que o fluxo pode ser considerado em todos os lugares como tendo uma direção paralela ao fundo. Desta forma, esta simplificação é aceitável, pois a onda teria um gradiente pequeno se comparada com a profundidade do fluxo (LIGGETT, 1975 apud TUCCI, 2005) [83].

No caso de haver gradientes de temperatura e de salinidade, que podem ocorrer em lagos, lagoas e estuários, as acelerações verticais podem alcançar ordens de grandezas não desprezíveis. Também no caso de corredeiras e escoamentos com fortes declividades da linha d'água ou ressaltos, que costumam ocorrer nos estudos de escoamentos resultantes da ruptura de barragens, as acelerações verticais são importantes.

(d) PEQUENA DECLIVIDADE DE FUNDO

Para ângulos pequenos a aproximação $\sin \theta \cong \tan \theta = S_0$ pode ser escrita, onde θ é o ângulo que a força da gravidade faz com a normal à direção do escoamento e S_0 , a declividade de fundo.

(e) ESCOAMENTO UNIDIMENSIONAL COM DISTRIBUIÇÃO UNIFORME DE VELOCIDADES

Hipótese segundo a qual a velocidade média é representativa da variação espacial na seção, sendo desprezadas as variações de velocidade nas direções transversal e vertical, e é considerado predominantemente longitudinal o sentido do escoamento.

Teoricamente, o perfil de velocidades de um escoamento nunca é uniforme, porém em grande parte dos casos de aplicação, a hipótese de uniformidade do diagrama de velocidades não acarreta grandes erros. Quando o diagrama for consideravelmente não-uniforme podem-se utilizar fatores de correção que multiplicam o termo $\partial v / \partial x$, tais como os coeficientes de Boussinesq ou Coriolis.

(f) CONSIDERAÇÕES DE ATRITO

As perdas de carga em escoamentos reais ocorrem de forma complexa e não equacionada, o que obriga a se adotar as equações de *Chézy* e *Manning*, desenvolvidas para escoamentos em regime permanente e uniforme, para a obtenção da declividade da linha de energia, sem comprometimento dos resultados gerados. Além disso, têm-se perdas de carga localizadas, provocadas pela presença

de pilares de pontes, obstáculos, vegetações, variações abruptas da seção transversal etc., cujos efeitos podem ser incluídos no coeficiente de rugosidade, n , e o expoente, p , do raio hidráulico, R_h .

$$S_f = \frac{n^2 \cdot v|v|}{R_h^p} \quad (2.7)$$

onde o termo v^2 foi substituído por $v|v|$ para permitir a representação de inversão do escoamento para o caso de marés em estuários. Como se vê, o coeficiente de rugosidade n deixa de ter um significado puramente **físico** para constituir-se, juntamente com p , em parâmetro também **matemático**, utilizado nos modelos associados. Ambos os parâmetros são submetidos às calibrações para cada caso de aplicação.

(g) O FLUXO É SUBCRÍTICO OU FLUVIAL

Nesse caso o número adimensional de Froude, que relaciona as forças de inércia e gravitacional, é menor que um, ou seja:

$$F = \frac{v}{c} < 1 \quad (2.8)$$

Sendo v a velocidade do escoamento, e c a velocidade de propagação das ondas gravitacionais (perturbações superficiais), também denominada "*Celeridade*", que obedece a expressão $c = \sqrt{gy}$.

Com uso das hipóteses anteriores, e fazendo algumas manipulações algébricas nas Equações 2.5 e 2.6, que podem ser vistas em detalhes em Baptista, Coelho e Cirilo (2003) [4], Chow (1959) [9], Porto (1998) [65], Riguetto (1998) [72], Silva, Mascarenhas e Miguez (2007) [78], e Tucci (2005) [83], visto que estas passagens fogem do objetivo deste trabalho, chega as seguintes expressões:

$$\left(\begin{array}{l} \text{equação da} \\ \text{continuidade} \end{array} \right) \quad A \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial A}{\partial x} + B \frac{\partial y}{\partial t} \pm q_l = 0 \quad (2.9)$$

onde q_l é uma vazão suplementar por unidade de comprimento das margens do canal, com sinal negativo se for influxo (entrada) e positivo se for efluxo (saída).

$$\left(\begin{array}{l} \text{equação da} \\ \text{quantidade de} \\ \text{movimento} \end{array} \right) \quad \underbrace{S_f = S_0 - \frac{\partial y}{\partial x} - \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t}}_{\substack{\text{permanente} \\ \text{uniforme}}} \quad (2.10)$$

$\underbrace{\hspace{10em}}_{\substack{\text{permanete} \\ \text{não uniforme}}} \\ \underbrace{\hspace{10em}}_{\substack{\text{não permanente} \\ \text{não uniforme}}}$

Observando-se os termos dessa equação, nota-se que cada um deles pode ser considerado com a representação de um gradiente ou declividade. O primeiro termo representa a declividade energética que leva em conta o atrito. O segundo e o terceiro representam a declividade da linha d'água, são termos de gravidade e pressão. Já o quarto e o quinto representam a declividade devido à variação da velocidade no espaço e no tempo, e são termos de inércia (PORTO, 1998) [65].

As Equações 2.9 e 2.10, estabelecidas pela primeira vez por Adémas Jean-Claude Baré, conde de Saint-Venant, engenheiro francês, em 1870, constituem um sistema de duas equações **diferenciais parciais**, em x e t , do tipo **hiperbólico**, que em sua forma completa, sem desprezar nenhum termo, compõe o modelo de propagação de cheia denominado *modelo hidrodinâmico*. Podendo também ser expressas em termos da vazão, Q (TUCCI, 2005) [83], chamada de forma **divergente, conservativa** ou **primitiva**, segundo Silva, Mascarenhas e Miguez (2007) [78], que é a forma onde as vazões e profundidades são as variáveis dependentes:

$$\left(\begin{array}{l} \text{equação da} \\ \text{continuidade} \end{array} \right) \quad \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = \pm q_l \quad (2.11)$$

$$\left(\begin{array}{l} \text{equação da} \\ \text{quantidade de} \\ \text{movimento} \end{array} \right) \quad \underbrace{\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial Qv}{\partial x}}_{\text{inércia}} + \underbrace{gA \frac{\partial y}{\partial x}}_{\text{pressão}} + \underbrace{gAS_f}_{\text{atrito}} - \underbrace{gAS_0}_{\text{gravidade}} = 0 \quad (2.12)$$

Sendo a integração exata das equações de Saint-Venant e sua solução analítica possíveis apenas para a representação de problemas bastante simplificados devido à presença de termos não lineares, utilizam-se largamente métodos numéricos para a solução. Isso é possível hoje, pelas facilidades computacionais disponíveis, e assim

técnicas numéricas de discretização do domínio, são usadas na busca da solução dessas equações, sendo que as mais utilizadas são: *método das características*; *método das diferenças finitas*; e *método dos elementos finitos* (BAPTISTA; COELHO; CIRILO, 2003 [4]; CIRILO, 1979 [10]; PORTO, 1998 [65]; RIGUETTO, 1998 [72]; SILVA; MASCARENHAS; MIGUEZ, 2007 [78]; TUCCI, 2005 [83]).

Segundo Riguetto (1998) [72], os métodos numéricos podem ser *explícitos* ou *implícitos*. Nos métodos **explícitos**, os valores das variáveis são calculados por meio de equações particulares para cada uma das variáveis. Nos **implícitos**, obtém-se um sistema de equações algébricas no qual os valores das variáveis são obtidos a partir da solução desse sistema de equações em cada intervalo de tempo pelos métodos conhecidos como os de eliminação de Gauss, de Gauss-Seidel, de Jacobi, de Newton-Raphson. A partir destes esquemas numéricos desenvolveu-se uma variedade de pacotes comerciais para simulação do escoamento em rios em canais, como o HEC-RAS (BRUNNER, 2010) [6] do USACE e o MIKE 11 HD (DHI, 2007) [21] do DHI.

Por exemplo, o método utilizado no modelo HEC-RAS (BRUNNER, 2010) [6], é o **esquema implícito de quatro pontos de Preissmann** (CHEN, 1973; LIGGETT; CUNGE, 1975 apud BRUNNER, 2010) [6], ilustrado na Figura 15, para a linearização das equações de Saint-Venant e método da **eliminação de Gauss** é aplicado para a solução simultânea de um sistema de equações lineares que recai em uma **matriz tipo banda**, para n seções ou pontos, em $(n - 1)$ trechos, com $2n$ incógnitas para cada seção, em $(2n - 2)$ equações, o que leva a necessidade de 2 equações complementares, que serão fornecidas pelas condições de contorno, uma de *montante* e outra de *jusante*. No HEC-RAS, a análise de estabilidade do esquema de Preissmann é realizada pelo critério de Von Neuman (FREAD, 1974; LIGGETT; CUNGE, 1975 apud BRUNNER, 2010) [6], que segundo essa análise, o esquema implícito é incondicionalmente estável para $0,5 < \theta \leq 1,0$, condicionalmente estável para $\theta = 0,5$ e instável para $\theta < 0,5$. A Figura 16 mostra o esquema de discretização de um trecho modelado no HEC-RAS.

Segundo Yevjevich (1975 apud RAMOS et al., 1989) [70], contribuições foram dadas por vários investigadores para: introduzir a aceleração vertical na análise de Boussinesq e Coriolis para a distribuição de velocidades; analisar bidimensionalmente o escoamento; considerar leitos de fundo curvilíneo; e utilizar várias fórmulas de perda de carga. Essas contribuições aperfeiçoaram as equações de Saint-Venant. Entretanto, todas essas adições não são modificações substanciais, nem mudanças significativas, da descrição básica matemática do escoamento não-permanente à superfície livre, fornecidas por aquelas equações. Excluindo alguns casos extremos, as equações de Saint-Venant, mesmo sem esses aperfeiçoamentos, fornecem resultados satisfatórios.

Quatro situações podem ser simuladas na modelagem matemática do escoamento unidimensional à superfície livre, segundo Cunge (1971 apud CIRILO, 1991) [11]:

- a) O escoamento se processa através de toda a seção, composta do leito principal acrescido do leito de inundação;
- b) Apenas na calha principal e em sua projeção até a superfície ocorre o movimento longitudinal, sendo as zonas inundáveis simuladas como reservatórios de acumulação, sem escoamento e em equilíbrio com o leito menor;
- c) Como no caso anterior, considerando-se, no entanto, que os níveis nos reservatórios de acumulação e no leito principal são diferentes entre si, sendo a ligação entre eles simulada como um vertedouro;
- d) Todos os segmentos representativos do leito principal, bem como todas as zonas inundáveis adjacentes, são simulados como compartimentos ligados entre si, havendo troca entre leito e zonas inundáveis, bem como entre zonas inundáveis consecutivas.

2.4. HIDROLOGIA ESTATÍSTICA APLICADA À ANÁLISE DE EVENTOS EXTREMOS

Segundo Davis e Naghettini (2001) [19], o planejamento da ocupação das planícies de inundação precisa levar em consideração os riscos associados à ocorrência de eventos extremos. Esses riscos são estimados a partir da análise estatística de séries históricas de dados, através dos quais se pode estimar a intensidade e a probabilidade de superação dos eventos.

A análise de frequência dos eventos extremos pode ser *local* ou *pontual*, ou seja, utilizando-se a série de dados de uma única estação, ou *regional*, fazendo uso dos dados de várias estações de uma região. Geralmente a **análise local** é realizada utilizando séries históricas curtas. Uma alternativa para melhorar a estimativa local é aplicar a **análise regional**. A vantagem em se utilizar a análise regional de frequência é a possibilidade de estimar os parâmetros ou variáveis hidrológicas em locais que não possuam uma coleta sistemática de informações. Além disso, essa técnica permite melhorar a estimativa dos parâmetros e quantis de uma distribuição de probabilidades teórica, identificar a ausência de postos de observação em uma região e verificar a consistência das séries hidrológicas. Com a regionalização, é possível aumentar consideravelmente o número de informações, que passam a ter caráter regional. Além disso, os modelos de regionalização permitem melhorar as estimativas de eventos extremos, substituindo o tempo por espaço.

2.4.1. ANÁLISE REGIONAL DE FREQUÊNCIA PELO MÉTODO INDEX-FLOOD (CHEIA-ÍNDICE) UTILIZANDO MOMENTOS-L

O termo *index-flood* (cheia-índice) foi introduzido por Dalrymple (1960 apud NAGHETTINI; PINTO, 2007) [56], dentro de um contexto de regionalização de vazões de cheia. Trata-se de um expediente para adimensionalizar quaisquer dados obtidos

em pontos distintos de uma região considerada homogênea, com a finalidade de utilizá-los como um conjunto amostral único. Apesar de fazer referência a cheias, o método e o termo *index-flood* têm uso consagrado em estudos de regionalização de frequência de qualquer tipo de variável.

Seja o caso de se regionalizar as frequências de uma variável genérica X , cuja variabilidade espaço-temporal foi amostrada em N locais, estações ou postos de observação, de uma certa área geográfica. As observações indexadas por i , tomadas nos postos indexados por j , formam amostras de tamanho variável n_j e são denotadas por $X_{i,j}, i=1, \dots, n_j; j=1, \dots, N$. Se $F, 0 < F < 1$, representa a função acumulada de probabilidades a distribuição de frequências da variável X no posto j , então, a função de quantis nesse local é simbolizada por $X_j(F)$. A hipótese básica do método *index-flood* é a de que os postos formam uma região *homogênea*, ou seja, as distribuições de frequências nos N pontos são idênticas, a menos de um fator de escala local denominado *index-flood* ou *fator de adimensionalização*. Formalmente,

$$X_j(F) = \mu_j x(F), \quad j=1, \dots, N \quad (2.13)$$

onde μ_j é o *index-flood*, ou fator de adimensionalização do local j , e $x(F)$ representa a *curva regional de quantis adimensionais*, algumas vezes denominada *curva regional de crescimento*, comum a todos os postos.

O fator de escala μ_j pode ser estimado por qualquer medida de posição ou tendência central da amostra de observações $\{X_1, X_2, \dots, X_{n_j,j}\}$. Os *dados adimensionais padronizados* $x_{i,j} = X_{i,j} / \hat{\mu}_j, i=1, \dots, n_j; j=1, \dots, N$ formam a base para se estimar a curva regional de quantis adimensionais $x(F)$. A curva de frequência regional pode ser paramétrica, ou seja, obtida pelo ajuste de uma distribuição de probabilidades aos dados adimensionais regionais, ou não paramétrica. A curva regional não paramétrica é definida a partir das curvas empíricas das estações da mesma região homogênea, grafadas em papel de probabilidade. A curva regional

não paramétrica é traçada a sentimento, de modo que ela seja próxima da mediana das curvas empíricas individuais da região homogênea.

As premissas inerentes ao método *index-flood* são:

- a) As observações em um posto qualquer são identicamente distribuídas;
- b) As observações em um posto qualquer não apresentam dependência estatística serial;
- c) As observações em diferentes postos são estatisticamente independentes;
- d) As distribuições de frequência em diferentes postos são idênticas, a menos de um fator de escala; e
- e) A forma matemática da curva regional de quantis adimensionalizados pode ser corretamente especificada.

Segundo Hosking e Wallis (1997) [41], as premissas (a) e (b) são plausíveis para diversos tipos de variáveis, principalmente aquelas relacionadas a máximos anuais. Entretanto, é improvável que as três últimas premissas possam ser completamente verificadas por dados hidrológicos, meteorológicos ou ambientais. Sabe-se, por exemplo, que precipitações frontais ou estiagens severas são eventos que afetam extensas áreas. Como essas áreas podem conter vários postos de observação da variável em questão, é provável que as amostras, coletadas em pontos distintos, apresentem, entre si, um grau de correlação significativo. Ainda segundo Hosking e Wallis (1997) [41], na prática, as premissas (d) e (e) jamais são verificadas com exatidão. Apesar dessas restrições, esses autores sugerem que as premissas do método *index-flood* podem ser *razoavelmente aproximadas* tanto pela escolha criteriosa dos postos componentes de uma região, como também pela seleção apropriada de uma função de distribuição de frequências que apresente consistência com os dados amostrais.

Ainda em Naghettini e Pinto (2007) [56], as subjetividades presentes em algumas etapas das metodologias existentes, bem como o aparecimento de novas técnicas de inferência estatística, como os momentos ponderados por probabilidades (MPP), apresentados por Greenwood et al. (1979) [33], motivaram os pesquisadores

Jonathan R. M. Hosking, do Centro de Investigações Thomas J. Watson da IBM, e J. R. Wallis, da Universidade Yale, a proporem um conjunto unificado de procedimentos para a análise regional de frequência de diversos tipos de variáveis, com destaque para as hidrológicas, meteorológicas e ambientais. Em sua revisão sobre os avanços recentes da pesquisa na área de análise de frequência, Bobée e Rasmussen (1995 apud NAGHETTINI; PINTO, 2007) [56] consideram a contribuição de Hosking e Wallis como a mais relevante para a obtenção de melhores estimativas das probabilidades de eventos raros.

Em linhas gerais, a metodologia descrita por Hosking e Wallis (1997) [41] baseia-se nos princípios do *index-flood*, ou “cheia-índice”, tal como enunciados por Dalrymple (1960 apud NAGHETTINI; PINTO, 2007) [56], e utiliza os momentos-L, quantidades deduzidas dos momentos ponderados por probabilidades, não só para estimar parâmetros e quantis da distribuição regional de probabilidade, como também para construir estatísticas capazes de tornar menos subjetivas algumas etapas da análise regional de frequência.

Hosking e Wallis (1997) [41] codificaram um conjunto de sub-rotinas, implementadas em linguagem *Fortran-77*, descritas em Hosking (1991) [37], para automatização das quatro etapas da metodologia proposta para análise regional de frequência. Esse conjunto de rotinas encontra-se disponibilizado ao público pelo Departamento de Estatística da Carnegie Mellon University no repositório de programas StatLib, disponível em: <<http://lib.stat.cmu.edu/general/lmoments>>, com acesso em: 19 maio 2012.

2.4.1.1. ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS DA DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADE PELO MÉTODO DOS MOMENTOS-L (MML)

Em Naghettini e Pinto (2007) [56], Greenwood et al. (1979) [33] introduziram os momentos ponderados por probabilidades (MPP), os quais são definidos pela seguinte expressão geral:

$$M_{p,r,s} = E[X^p [F_x(x)]^r [1 - F_x(x)]^s] = \int_0^1 [x(F)]^p F^r (1 - F)^s dF \quad (2.14)$$

onde $x(F)$ denota a função de quantis, e p , r e s representam números reais. Quando r e s são nulos e p é um número não negativo, os MPPs $M_{p,0,0}$ são iguais aos momentos convencionais μ'_p de ordem p , em relação à origem. Em particular, os MPPs $M_{1,0,s}$ e $M_{1,r,0}$ são os de utilidade mais frequente na caracterização de distribuições de probabilidades e especificados por:

$$M_{1,0,s} = \alpha_s = \int_0^1 x(F)(1 - F)^s dF \quad (2.15)$$

$$M_{1,r,0} = \beta_r = \int_0^1 x(F)F^r dF \quad (2.16)$$

Hosking (1986) [36] demonstrou que α_s e β_r , como funções lineares de x , possuem a generalidade suficiente para a estimação de parâmetros de distribuições de probabilidades, além de estarem menos sujeitos a flutuações amostrais e, portanto, serem mais *robustos* do que os correspondentes momentos convencionais. Para uma amostra $x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_N$, ordenada de modo crescente, as estimativas não-enviesadas de α_s e β_r podem ser calculadas pelas seguintes expressões:

$$a_s = \hat{\alpha}_s = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\binom{N-i}{s}}{\binom{N-1}{s}} x_i \quad (2.17)$$

$$b_r = \hat{\beta}_r = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\binom{i-1}{r}}{\binom{N-1}{r}} x_i \quad (2.18)$$

Os MPPs α_s e β_r , assim como suas correspondentes estimativas amostrais a_s e b_r , estão relacionados entre si pelas expressões:

$$\alpha_s = \sum_{i=1}^s \binom{s}{i} (-1)^i \beta_i \quad \text{ou} \quad \beta_r = \sum_{i=1}^r \binom{r}{i} (-1)^i \alpha_i \quad (2.19)$$

Os MPPs α_s e β_r , embora passíveis de serem usados na estimação de parâmetros, não são de fácil interpretação como descritores de forma das distribuições de probabilidades. Tendo em vista tal fato, Hosking e Wallis (1990) [38] introduziram o conceito de *momentos-L*, os quais são grandezas diretamente interpretáveis como descritores de escala e forma das distribuições de probabilidades. Os momentos-L de ordem r , denotados por λ_r , são combinações lineares dos MPPs α_s e β_r e formalmente definidos por:

$$\lambda_r = (-1)^{r-1} \sum_{k=0}^{r-1} p_{r-1,k} \alpha_k = \sum_{k=0}^{r-1} p_{r-1} \beta_k \quad (2.20)$$

onde $p_{r-1,k} = (-1)^{r-k-1} \binom{r-1}{k} \binom{r+k-1}{k}$. A aplicação da Equação 2.20 para os momentos-L, de ordem inferior a 5, resulta em:

$$\lambda_1 = \alpha_0 = \beta_0 \quad (\text{média ou momento-L de posição}) \quad (2.21)$$

$$\lambda_2 = \alpha_0 - 2\alpha_1 = 2\beta_1 - \beta_0 \quad (\text{momento-L de escala}) \quad (2.22)$$

$$\lambda_3 = \alpha_0 - 6\alpha_1 + 6\alpha_2 = 6\beta_2 - 6\beta_1 + \beta_0 \quad (2.23)$$

$$\lambda_4 = \alpha_0 - 12\alpha_1 + 30\alpha_2 - 20\alpha_3 = 20\beta_3 - 30\beta_2 + 12\beta_1 - \beta_0 \quad (2.24)$$

Os momentos-L amostrais são denotados por l_r e são calculados pela substituição de α_s e β_r , nas Equações 2.21 a 2.24, pelas suas estimativas a_s e b_r .

O momento-L λ_1 é equivalente à média e, portanto, uma medida populacional de posição. Para ordens superiores a 1, os *quocientes de momentos-L* são particularmente úteis na descrição da escala e forma das distribuições de probabilidades. Como medida equivalente ao coeficiente de variação convencional, define-se o coeficiente τ , dado por:

$$\tau = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \quad (\text{coeficiente de variação ou CV-L}) \quad (2.25)$$

o qual pode ser interpretado como uma medida populacional de dispersão ou de escala. Analogamente aos coeficientes de assimetria e curtose convencionais, podem ser definidos os coeficientes τ_3 e τ_4 , dados, respectivamente, por:

$$\tau_3 = \frac{\lambda_3}{\lambda_2} \text{ (Assimetria-L)} \quad (2.26)$$

$$\tau_4 = \frac{\lambda_4}{\lambda_2} \text{ (Curtose-L)} \quad (2.27)$$

Os quocientes de momentos-L amostrais, cujas notações são t_1 , t_3 e t_4 , são calculados pela substituição de λ_r , nas Equações 2.25 a 2.27, por suas estimativas l_r .

O método dos momentos-L (MML) de estimação de parâmetros consiste em igualar os momentos-L populacionais aos momentos-L amostrais. O resultado dessa operação produzirá as estimativas dos parâmetros da distribuição de probabilidades em questão. Formalmente, sejam $y_1, y_2, y_3, \dots, y_N$ as observações constituintes de uma AAS retirada de uma população de uma variável aleatória distribuída conforme $f_Y(y; \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k)$ de k parâmetros. Se $[\lambda_1, \lambda_2, \tau_j]$ e $[l_1, l_2, t_j]$ representam, respectivamente, os momentos-L (e seus quocientes) populacionais e amostrais, o sistema de equações fundamental do método dos momentos-L é:

$$\begin{aligned} \lambda_i(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k) &= l_i \quad \text{com } i = 1, 2 \\ \tau_j(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k) &= t_j \quad \text{com } j = 3, 4, \dots, k-2 \end{aligned} \quad (2.28)$$

As soluções $\hat{\theta}_1, \hat{\theta}_2, \dots, \hat{\theta}_k$ desse sistema de k equações e k incógnitas serão as estimativas dos parâmetros θ_j pelo método MML.

2.4.1.2. AS ETAPAS DA ANÁLISE REGIONAL DE FREQUÊNCIA PROPOSTAS POR HOSKING E WALLIS

A metodologia de Hosking e Wallis (1997) [41] fundamenta-se tanto nos princípios do método *index-flood*, como também em algumas estatísticas construídas a partir dos momentos-L. Essas estatísticas constituem instrumentos valiosos para diminuir o grau de subjetividade presente nas quatro etapas usuais da análise regional de frequência.

2.4.1.2.1. Etapa 1: Análise Regional de Consistência de Dados

Essa etapa refere-se à detecção e eliminação de erros grosseiros e/ou sistemáticos eventualmente existentes nas amostras individuais dos vários postos de observação. Além das técnicas usuais de análise de consistência, como as curvas de dupla acumulação, por exemplo, Hosking e Wallis (1997) [41] sugerem o uso de uma estatística auxiliar, denominada *medida de discordância*, a qual fundamenta-se na comparação das características estatísticas do conjunto de postos com as apresentadas pela amostra individual em questão.

2.4.1.2.1.1. *A Medida de Discordância (D_j)*

Os quocientes de momentos-L de um local j , a saber, o CV-L, a assimetria-L e a curtose-L, são considerados como um ponto em um espaço tridimensional. Em termos formais, considere que u_j representa um vetor (3x1) contendo esses quocientes de momentos-L, dado por:

$$u_j = (t^j, t_3^j, t_4^j)^T, \quad j = 1, \dots, N \quad (2.29)$$

onde t , t_3 e t_4 denotam CV-L, assimetria-L e curtose-L, respectivamente, e o símbolo T indica matriz transposta. Seja \bar{u} um vetor (3x1), contendo a média grupal ou

regional dos quocientes de momentos-L, tomada como a média aritmética simples de u_j para todos os postos estudados, ou seja:

$$\bar{u} = \frac{\sum_{j=1}^N u_j}{N} = (t^R, t_3^R, t_4^R)^T \quad (2.30)$$

onde N representa o número de postos de observação do grupo ou região R em questão. Dada a matriz de covariância amostral S , definida por:

$$S = \frac{\sum_{j=1}^N (u_j - \bar{u})(u_j - \bar{u})^T}{(N-1)} \quad (2.31)$$

Hosking e Wallis (1995) [38] definem a medida de discordância D_j , para o local j pela expressão:

$$D_j = \frac{N}{3(N-1)} (u_j - \bar{u})^T S^{-1} (u_j - \bar{u}) \quad (2.32)$$

Em trabalhos anteriores, Hosking e Wallis (1993) [39] sugeriram o valor limite $D_j = 3$ como critério para decidir se a amostra é discordante das características grupais. Por exemplo, quando certa amostra produz $D_j \geq 3$, isso significa que ela pode conter erros grosseiros e/ou sistemáticos, ou mesmo pontos atípicos, que a tornam discordantes ou discrepantes das demais do grupo de amostras. Posteriormente, Hosking e Wallis (1995) [38] apresentaram novos valores críticos para D_j , para grupos ou regiões com menos de 15 postos de observação. Esses valores críticos para D_j encontram-se listados na Tabela 1.

Tabela 1 – Valores críticos da medida de discordância (D_j)

Nº de postos da região	D_j
5	1,333
6	1,648
7	1,917
8	2,140
9	2,329
10	2,491
11	2,632
12	2,757
13	2,869
14	2,971
≥ 15	3,000

Fonte: Hosking e Wallis (1995) [38].

De acordo com Hosking e Wallis (1995) [38], para grupos ou regiões com número muito reduzido de postos de observação, a estatística D_j não é informativa. Por exemplo, para $N \leq 3$, a matriz de covariância S é singular e o valor de D_j não pode ser calculado. Para $N = 4$, $D_j = 1$ e, para $N = 5$ ou $N = 6$, os valores de D_j , como indicados na Tabela 1, são bastante próximos do limite algébrico da estatística, definido por $D_j \leq (N - 1)/3$. Em consequência, os autores sugerem o uso da medida de discordância D_j somente para $N \geq 7$.

2.4.1.2.2. Etapa 2: Identificação de Regiões Homogêneas

Uma região homogênea consiste de um agrupamento de postos de observação, cujas curvas de quantis adimensionalizados podem ser aproximadas por uma **única curva regional**. Para determinar a correta divisão dos postos em regiões homogêneas, Hosking e Wallis (1997) [41] sugerem o emprego da técnica de análise de *clusters*. De acordo com essa técnica, os postos são agrupados em regiões consonantes com a variabilidade espacial de algumas características locais, as quais devem ser selecionadas entre aquelas que supostamente podem ter influência sobre

as realizações da variável a ser regionalizada. Depois dos postos terem sido convenientemente agrupados em regiões, Hosking e Wallis (1997) [41] sugerem a *medida de heterogeneidade* para testar a correção dos agrupamentos efetuados. Essa medida baseia-se na comparação da variabilidade grupal das características estatísticas dos postos de observação com a variabilidade esperada dessas mesmas características em uma região homogênea. O teste da medida de heterogeneidade será abordado a seguir.

2.4.1.2.2.1. A Medida de Heterogeneidade Regional (H)

Considere que uma dada região contenha N postos de observação, cada um deles indexado por j , com amostra de tamanho n_j e quocientes de momentos-L amostrais representados por t^j , t_3^j e t_4^j . Considere também que t^R , t_3^R e t_4^R denotam respectivamente as médias regionais dos quocientes CV-L, Assimetria-L e Curtose-L, ponderados, de forma análoga à especificada pela Equação 2.49, pelos tamanhos das amostras individuais. Hosking e Wallis (1997) [41] recomendam que a medida de heterogeneidade, denotada por H , baseie-se preferencialmente no cálculo da dispersão de t , ou seja, o CV-L para as regiões proposta e simulada. Inicialmente, efetua-se o cálculo do desvio padrão ponderado V dos CV-L's das amostras observadas, por meio da seguinte expressão:

$$V = \left[\frac{\sum_{j=1}^N n_j (t^j - t^R)^2}{\sum_{j=1}^N n_j} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.33)$$

Em seguida, para a simulação da região homogênea, Hosking e Wallis (1997) [41] sugerem, conforme menção anterior, a utilização da distribuição Kappa de quatro parâmetros. Essa distribuição é definida pelos parâmetros ξ , α , k e h e inclui, como casos particulares, as distribuições Logística, Generalizada de Valores Extremos e Generalizada de Pareto, sendo, portanto, teoricamente capaz de representar variáveis

hidrológicas e hidrometeorológicas. As funções densidade, acumulada de probabilidades e de quantis da distribuição Kappa são dadas respectivamente por:

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} \left[1 - \frac{k(x - \xi)}{\alpha} \right]^{\frac{1}{k-1}} [F(x)]^{1-h} \quad (2.34)$$

$$F(x) = \left\{ 1 - h \left[1 - \frac{k(x - \xi)}{\alpha} \right]^{\frac{1}{k}} \right\}^{\frac{1}{h}} \quad (2.35)$$

$$x(F) = \xi + \frac{\alpha}{k} \left[1 - \left(\frac{1 - F^h}{h} \right)^k \right] \quad (2.36)$$

Se $k > 0$, x tem um limite superior em $\xi + \alpha/k$; se $k \leq 0$, x é ilimitado superiormente; x tem um limite inferior em $\xi + \alpha(1 - h^{-k})/k$ se $h > 0$, em $\xi + \alpha/k$ se $h \leq 0$ e $k < 0$, e em $-\infty$ se $h \leq 0$ e $k \geq 0$. Os momentos-L da distribuição Kappa são definidos para $h \geq 0$ e $k > -1$ ou $h < 0$ e $-1 < k < -1/h$, e dados pelas seguintes expressões:

$$\lambda_1 = \xi + \frac{\alpha(1 - g_1)}{k} \quad (2.37)$$

$$\lambda_2 = \frac{\alpha(g_1 - g_2)}{k} \quad (2.38)$$

$$\tau_3 = \frac{(-g_1 + 3g_2 - 2g_3)}{g_1 - g_2} \quad (2.39)$$

$$\tau_4 = \frac{(-g_1 + 6g_2 - 10g_3 + 5g_4)}{g_1 - g_2} \quad (2.40)$$

onde:

$$g_r = \begin{cases} \frac{r\Gamma(1+k)\Gamma\left(\frac{r}{h}\right)}{h^{1+k}\Gamma\left(1+k+\frac{r}{h}\right)} & \text{se } h > 0 \\ \frac{r\Gamma(1+k)\Gamma\left(-k-\frac{r}{h}\right)}{(-h)^{1+k}\Gamma\left(1-\frac{r}{h}\right)} & \text{se } h < 0 \end{cases} \quad (2.41)$$

e $\Gamma(\cdot)$ representa a função gama, que é uma extensão do conceito de fatorial para números não inteiros, como descrito no Anexo 4 em Naguettini e Pinto (2007) [56]:

$$\Gamma(z) = \int_0^{\infty} x^{z-1} e^{-x} dx \quad (2.42)$$

Os parâmetros da população Kappa são estimados a partir dos quocientes de momentos-L regionais $\{l, t^R, t_3^R, t_4^R\}$ calculados com os dados amostrais. Com os parâmetros populacionais, são simuladas, através do método de Monte Carlo, N_{SIM} regiões homogêneas, sem correlação cruzada e/ou serial, contendo um número de amostras individuais N idêntico ao número de postos da região homogênea, cada qual com n_i valores da variável adimensionalizada. Em seguida, as estatísticas $V_m (m=1,2,\dots,N_{SIM})$ são calculadas para todas as simulações da região homogênea, por meio da Equação 2.33. A sugestão é a que se faça o número de simulações, N_{SIM} , igual a 500.

A média aritmética das estatísticas V_m , fornecerá a dispersão média esperada para a região homogênea, ou seja,

$$\mu_V = \frac{\sum_{m=1}^{N_{SIM}} V_m}{N_{SIM}} \quad (2.43)$$

A medida de heterogeneidade H estabelece uma comparação entre a dispersão observada e a dispersão simulada. Formalmente,

$$H = \frac{(V - \mu_V)}{\sigma_V} \quad (2.44)$$

onde V é a estatística calculada por meio da Equação 2.33 utilizando os dados observados na região supostamente homogênea, μ_V é a média aritmética das estatísticas V_m calculada para cada simulação e σ_V é o desvio padrão entre os N_{SIM} valores da medida de dispersão V_m , ou seja,

$$\sigma_V = \left[\frac{\sum_{m=1}^{N_{SIM}} (V_m - \mu_V)^2}{N_{SIM} - 1} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.45)$$

De acordo com o teste de significância, proposto por Hosking e Wallis (1997) [41], se $H < 1$, considera-se a região como "aceitavelmente homogênea", se $1 \leq H < 2$, a região é "possivelmente heterogênea" e, finalmente, se $H \geq 2$, a região deve ser classificada como "definitivamente heterogênea".

2.4.1.2.3. Etapa 3: Seleção da Função Regional de Distribuição de Probabilidades

Depois dos erros grosseiros e sistemáticos terem sido eliminados das amostras individuais e das regiões homogêneas haverem sido identificadas, a etapa seguinte é a correta prescrição do modelo probabilístico. Para a seleção da função regional de distribuição de probabilidades entre diversos modelos candidatos, Hosking e Wallis (1997) [41] sugerem o emprego do teste da *medida de aderência*. Esse teste é construído de modo a poder comparar algumas características estatísticas regionais com aquelas que se espera obter de uma amostra aleatória simples retirada de uma população, cujas propriedades distributivas são as mesmas do modelo candidato.

2.4.1.2.3.1. *A Medida de Aderência (Z)*

Considere que uma dada região contenha N postos de observação, cada um deles indexado por j , com amostra de tamanho n_j e quocientes de momentos-L

amostrais representados por t^j , t_3^j e t_4^j . Considere também que t^R , t_3^R e t_4^R denotam respectivamente as médias regionais dos quocientes CV-L, Assimetria-L e Curtose-L, ponderados, de forma análoga à especificada pela Equação 2.49, pelos tamanhos das amostras individuais.

Considere também um conjunto de distribuições candidatas de três parâmetros. Hosking e Wallis (1997) [41] propõem o seguinte conjunto de distribuições candidatas: *Logística Generalizada* (LG), *Generalizada de Valores Extremos* (GEV), *Log-Normal* (LN-3P) ou *Generalizada Normal, Pearson tipo III* (P-III) e *Generalizada de Pareto* (GP). Em seguida, cada distribuição candidata deve ter seus parâmetros ajustados ao grupo de quocientes de momentos-L regionais $\{1, t^R, t_3^R, t_4^R\}$. Denota-se por τ_4^{DIST} Curtose-L da distribuição ajustada, onde *DIST* poderá ser qualquer uma das distribuições (e.g. LG, GEV, LN3).

Na sequência, deve-se ajustar a distribuição Kappa ao grupo de quocientes de momentos-L regionais e proceder à simulação de um grande número, N_{SIM} da região homogênea, cada qual tendo a Kappa como distribuição de frequência. Essa simulação deverá ser efetuada exatamente da mesma forma como a apresentada para o cálculo da medida de heterogeneidade.

Em seguida, calculam-se as médias regionais t_3^m e t_4^m da Assimetria-L e Curtose-L da $m^{ésima}$ região simulada. O viés de t_4^R é dado por:

$$\beta_4 = \frac{\sum_{m=1}^{N_{SIM}} (t_4^m - t_4^R)}{N_{SIM}} \quad (2.46)$$

enquanto o desvio padrão de t_4^R é dado pela expressão:

$$\sigma_4 = \left[\frac{\sum_{m=1}^{N_{SIM}} (t_4^m - t_4^R)^2 - N_{SIM} \beta_4^2}{N_{SIM} - 1} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.47)$$

A medida de aderência Z de cada distribuição candidata pode ser calculada pela equação:

$$Z^{DIST} = \frac{\tau_4^{DIST} - t_4^R + \beta_4}{\sigma_4} \quad (2.48)$$

A hipótese de um ajuste adequado é mais verdadeira quanto mais próxima de zero for a medida de aderência. Nesse contexto, Hosking e Wallis (1997) [41] sugerem como critério razoável o limite $|Z^{DIST}| \leq 1,64$.

Além da medida de aderência Z , recomenda-se grafar as médias regionais da assimetria-L e da curtose-L $\{t_3^R, t_4^R\}$ em um diagrama de quocientes de momentos-L. Hosking e Wallis (1993) [39] sugerem que, se o ponto $\{t_3^R, t_4^R\}$ se localizar acima da curva Logística Generalizada (GL), nenhuma distribuição de dois ou três se ajustará aos dados, devendo possivelmente se adotar uma distribuição Kappa de quatro parâmetros ou Wakeby de cinco parâmetros.

2.4.1.2.4. Etapa 4: Estimativa dos Parâmetros e Quantis da Função Regional de Distribuição de Probabilidades

Depois que os dados dos diferentes postos da área em estudo foram submetidos às etapas descritas nos itens anteriores, tem-se como resultado a partição da área em regiões aproximadamente homogêneas, nas quais as distribuições de frequência de seus indivíduos são idênticas, a menos de um fator de escala local, e podem ser modeladas por uma única distribuição de probabilidades regional, selecionada entre diversas funções candidatas. Essa relação entre as distribuições de frequência dos diversos locais representa a própria justificativa para a análise regional de frequência, permitindo a obtenção de melhores estimativas de parâmetros e quantis a partir da combinação de dados espacialmente disseminados.

Identificado o modelo probabilístico regional, representado por $\hat{x}(F) = x(F; \hat{\theta}_1^R, \dots, \hat{\theta}_p^R)$, p é o número de parâmetros da distribuição selecionada, os parâmetros locais $\hat{\theta}_k^{(j)}$, $k = 1, \dots, p$ são estimados separadamente para cada posto j e, em seguida, ponderados, conforme equação:

$$\hat{\theta}_k^R = \frac{\sum_{j=1}^N \hat{\theta}_k^{(j)}}{\sum_{j=1}^N n_j} \quad (2.49)$$

para o cálculo da estimativa dos parâmetros regionais $\hat{\theta}_k^R$ da distribuição adotada para a região homogênea, para produzir a curva regional de quantis adimensionais. Hosking e Wallis (1997) [41] também sugerem que os parâmetros da distribuição regional adotada sejam calculados a partir das estimativas adimensionais regionais dos momentos-L e razões-L, as quais são obtidas a partir das médias ponderadas dos momentos-L e razões-L amostrais das estações da região homogênea. As ponderações são feitas pelos tamanhos das amostras, ou seja, o método *index-flood* utiliza as estatísticas características dos dados locais para obter as estimativas regionais, ponderando-as através da equação:

$$\hat{\lambda}_k^R = \frac{\sum_{j=1}^N \hat{\lambda}_k^{(j)}}{\sum_{j=1}^N n_j} \quad (2.50)$$

onde $\hat{\lambda}_k^R$ denota a estimativa regional e $\hat{\lambda}_k^{(j)}, k=1, \dots, p$ representam as estatísticas locais. Se essas têm como base os quocientes de momentos-L, Hosking e Wallis (1997) [41] definem a metodologia de estimação como a do *algoritmo dos momentos-L regionais*.

Finalmente, de acordo Naguettini e Pinto (2007) [56], ao se analisar uma grande área geográfica, sujeita à divisão em várias regiões homogêneas, a especificação da distribuição de frequência de uma região pode afetar a das outras. Se uma determinada distribuição se ajusta bem aos dados da maioria das regiões, é de bom senso utilizá-la para todas, muito embora ela possa não ser a distribuição que particularmente melhor se ajusta aos dados de uma ou de algumas das regiões.

Seguindo pela análise de regressão do fator de adimensionalização, o *index-flood*, através de variáveis independentes, como as características fisiográficas e/ou meteorológicas da região. E Cálculo do quantil de interesse:

$$X_j(F) = \mu_j x(F), \quad j = 1, \dots, N \quad (2.51)$$

onde μ_j é o index-flood ou fator de adimensionalização do local j e $x(F)$ representa o quantil adimensional obtido na curva regional de quantis adimensionais.

2.4.2. CLASSIFICAÇÃO DE EVENTOS HIDROLÓGICOS EXTREMOS ATRAVÉS DO STANDARDIZED PRECIPITATION INDEX (SPI)

Em Santos (2011) [76] e Santos et al. (2011) [75], o SPI (do inglês "*Standardized Precipitation Index*", ou seja, *Índice de Precipitação Padrão*) foi um índice de seca desenvolvido por McKee et al. (1993) [52], no intuito de contribuir com a definição objetiva das secas e avançar sobre os estudos de seu comportamento no tempo e no espaço. Seu cálculo é baseado em quantis da distribuição *Normal Padrão* (distribuição normal com média igual a zero e desvio padrão igual a um) e nas probabilidades associadas a esses quantis, ou seja, nas probabilidades de superação de um determinado volume precipitado acumulado. Para seu cálculo são necessários dados de precipitação totais mensais. Esses valores de precipitações mensais são acumulados em escalas diversas, por exemplo, 3, 6, 9 ou 12 meses. A definição dessas escalas é arbitrada pelo usuário do índice de acordo com sua necessidade. Por exemplo, supondo que em determinada situação julgou-se apropriado o uso do SPI acumulado de 6 meses (SPI-6). Para seu cálculo, as precipitações são acumuladas ao longo dos 6 meses antecedentes. Por exemplo, para o mês de junho o valor a partir do qual o SPI é calculado são as precipitações acumuladas de janeiro a junho. Esse conjunto de dados, resultantes do somatório das precipitações ao longo dos meses é, em seguida, ajustado a uma função densidade de probabilidades. Na formulação original, McKee et al. (1993) [52] utilizaram a função de distribuição de probabilidades *Gama*. Outros autores fizeram uso de outras funções para o cálculo do SPI. A partir do ajuste da distribuição de probabilidades, a cada elemento da série ajustada é atribuída uma probabilidade de não superação. Cada uma dessas

probabilidades de não superação é, por fim, associada ao quantil correspondente da distribuição Normal Padrão. O valor do quantil da distribuição Normal Padrão associado à probabilidade calculada no período de interesse é o valor do SPI para o mês em questão. A Figura 17 ilustra o procedimento de cálculo do SPI.

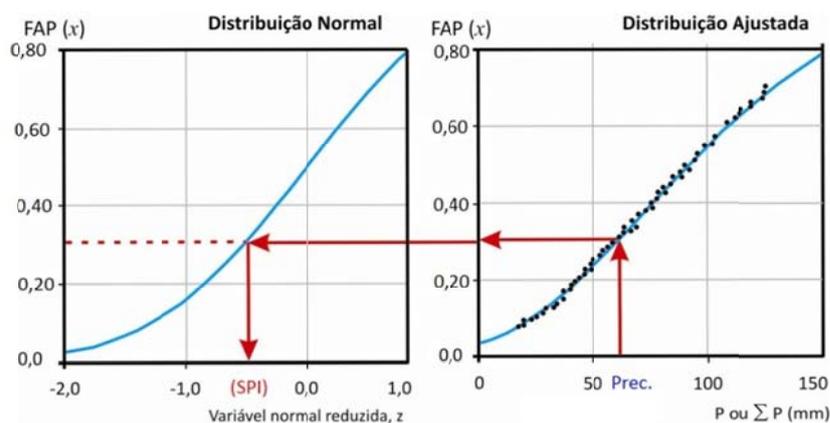


Figura 17 – Esquema dos procedimentos de cálculo do SPI.

Fonte: Weschenfelder, Pickbrenner e Pinto (2011) [95].

Ainda em Santos (2011) [76] e Santos et al. (2011) [75], uma das vantagens do uso do SPI, segundo McKee et al. (1993) [52], é o fato de que o SPI é função apenas da probabilidade. Sendo assim, independente da função de distribuição de probabilidade que se utilize, o SPI pode ser adequadamente calculado, adaptando-se a condições locais. Outras vantagens são o fato de o SPI ser capaz de caracterizar tanto períodos secos quanto chuvosos, bem como o fato do índice se adequar a qualquer variável hidrológica. Contudo, o uso desse índice também apresenta limitações. Mishra e Singh (2010) [55] argumentam que a principal delas é a necessidade de longos registros históricos para seu cálculo consistente, o que nem sempre é disponível.

Neste procedimento diversas classes de SPI podem ser definidas. A classificação da formulação original, apresentada na Tabela 2, considera também situações chuvosas. A Tabela 2 mostra as classes de precipitação, bem como as probabilidades de ocorrência em cada uma delas (Pclasse). Também são apresentadas as probabilidades

atribuídas à não superação dos limites inferior e superior (P_{inf} e P_{sup}) de cada classe de SPI considerada (SANTOS et al., 2011) [75].

Tabela 2 – Classes de precipitações e probabilidades associadas

Classe	SPI		P_{inf}	P_{sup}	P_{classe} (%)
Seca Extrema (SE)		≤ -2	0	0,0228	2,3
Seca Severa (SS)	-2	-1,5	0,0228	0,0668	4,4
Seca Moderada (SM)	-1,5	-1	0,0668	0,1587	9,2
Seca Leve (SL)	-1	0	0,1587	0,5000	34,1
Chuvoso Leve (CL)	0	1	0,5000	0,8413	34,1
Chuvoso Moderado (CM)	1	1,5	0,8413	0,9332	9,2
Chuvoso Severo (CS)	1,5	2	0,9332	0,9772	4,4
Chuvoso Extremo (CE)	> 2		0,9772	1	2,3

Fonte: Santos et al. (2011) [75].

A Tabela 2 foi adaptada para se estabelecer as classes para precipitações **diárias acumuladas máximas anuais** como apresentado na Tabela 3. A classificação de uma série histórica é realizada a partir da identificação dos limites de precipitações acumuladas máximas anuais de cada classe. Para esta análise foram utilizadas as precipitações diárias acumuladas máximas anuais de 1 dia, 2 dias, 3 dias, 4 dias e 5 dias.

Tabela 3 – Classes de precipitações diárias acumuladas máximas anuais

Classe de PMDA	SPI		$P(X \leq x)$		Tr (anos)
Chuva Fraca (CF)		0		0,5000	≤ 2
Chuva Leve (CL)	0	1	0,5000	0,8413	$2 < T \leq 6,3$
Chuva Moderada (CM)	1	1,5	0,8413	0,9332	$6,3 < T \leq 15$
Chuva Severa (CS)	1,5	2	0,9332	0,9772	$15 < T \leq 44$
Chuva Extrema (CE)	2		0,9772		> 44

Fonte: Santos et al. (2011) [75].

O cálculo dos limiares de precipitação, de acordo com Santos et al. (2011) [75], pode ser realizado por meio da análise regional de frequência com momentos-L. Após a definição das regiões homogêneas, é feito o ajuste da distribuição de probabilidades regional e estabelecida a função de quantis adimensionais. Os quantis adimensionais calculados são relativos às probabilidades dos limites superiores apresentadas na Tabela 3. O limiar de precipitação da classe é obtido pela multiplicação do quantil adimensional regional associado à probabilidade superior da classe pelo fator de adimensionalização da série. A Figura 18 ilustra o procedimento para definição dos limiares das classes.

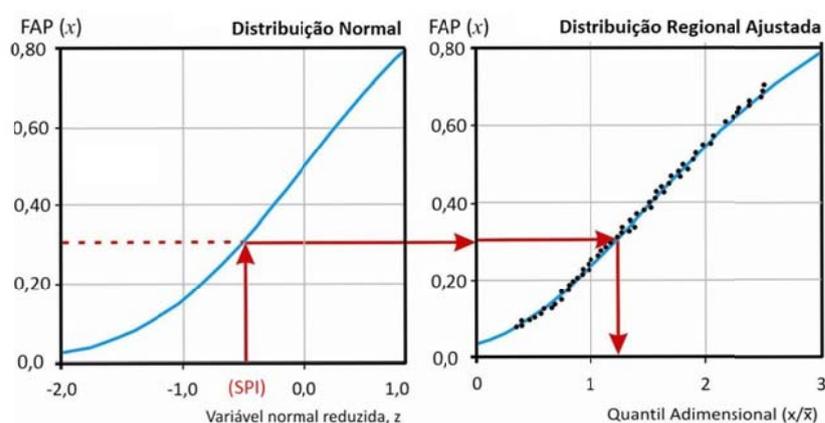


Figura 18 – Esquema dos procedimentos de cálculo dos limiares de precipitação.
Fonte: Weschenfelder, Pickbrenner e Pinto (2011) [95].

Capítulo 3

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. REGIÃO DE ESTUDO: A BACIA DO RIO UNA

3.1.1. LOCALIZAÇÃO

A bacia hidrográfica do rio Una, que corresponde à Unidade de Planejamento Hídrico 5 (UP5) em Pernambuco, está localizada no limite sul do litoral do Estado de Pernambuco, entre 08°17'14" e 08°55'28" de latitude sul, e 35°07'48" e 36°42'10" de longitude a oeste. No espaço territorial do Estado de Pernambuco encontra-se localizada na porção sul da região litorânea, como mostra a Figura 19. Por sua configuração, estende-se desde a região Agreste até o litoral do Estado. Esta unidade hídrica faz parte de áreas de 2 Mesorregiões (Agreste Pernambucano e Mata Pernambucana), de 4 Microrregiões (Vale do Ipojuca, Garanhuns, Brejo Pernambucano e Mata Meridional Pernambucana) e de 3 Regiões de Desenvolvimento (Agreste Meridional, Agreste Central e Mata Sul). A bacia do rio Una limita-se ao norte com as bacias hidrográficas dos rios Ipojuca (UP3) e Sirinhaém (UP4), e o *Grupo de bacias de pequenos rios Litorâneos 4 – GL4* (UP17); ao sul com a bacia hidrográfica do rio Mundaú (UP6), o Estado de Alagoas e o *Grupo de bacias de pequenos rios Litorâneos 5 – GL5* (UP18) e o *Grupo de bacias de pequenos rios Interiores 1 – GI1* (UP20); a leste com o Oceano Atlântico, a bacia do rio Sirinhaém, o GL4 (UP17) e GL5 (UP18); e a oeste com as bacias hidrográficas dos rios Ipanema (UP7) e Ipojuca (PERNAMBUCO, 1998 [58]; PERNAMBUCO, 2006 [61]; PERNAMBUCO, 2012 [64]).



Figura 19 – Localização espacial da bacia do rio Una com seus principais afluentes (destaque para as Mesorregiões das quais a bacia faz parte).

3.1.2. VEGETAÇÃO

Na porção ocidental da bacia do rio Una, que está localizada na região Agreste do Estado, observa-se a ocorrência do tipo de cobertura vegetal característica do semiárido, representada por espécies xerófilas, algumas com espinhos, decíduas e grande presença de Cactáceas e Bromeliáceas. A porção oriental da bacia, cuja maior parte se localiza na Zona da Mata, apresenta vegetação do tipo floresta perenifólia tropical atlântica, hoje já bastante degradada pela ação do homem para atender à exploração da cultura da cana-de-açúcar. E na área litorânea, predomina a vegetação formada por mangues, restingas e coqueiros (PERNAMBUCO, 2006) [61].

Na Figura 20 é apresentado o *Mapa de Vegetação* da bacia do rio Una.

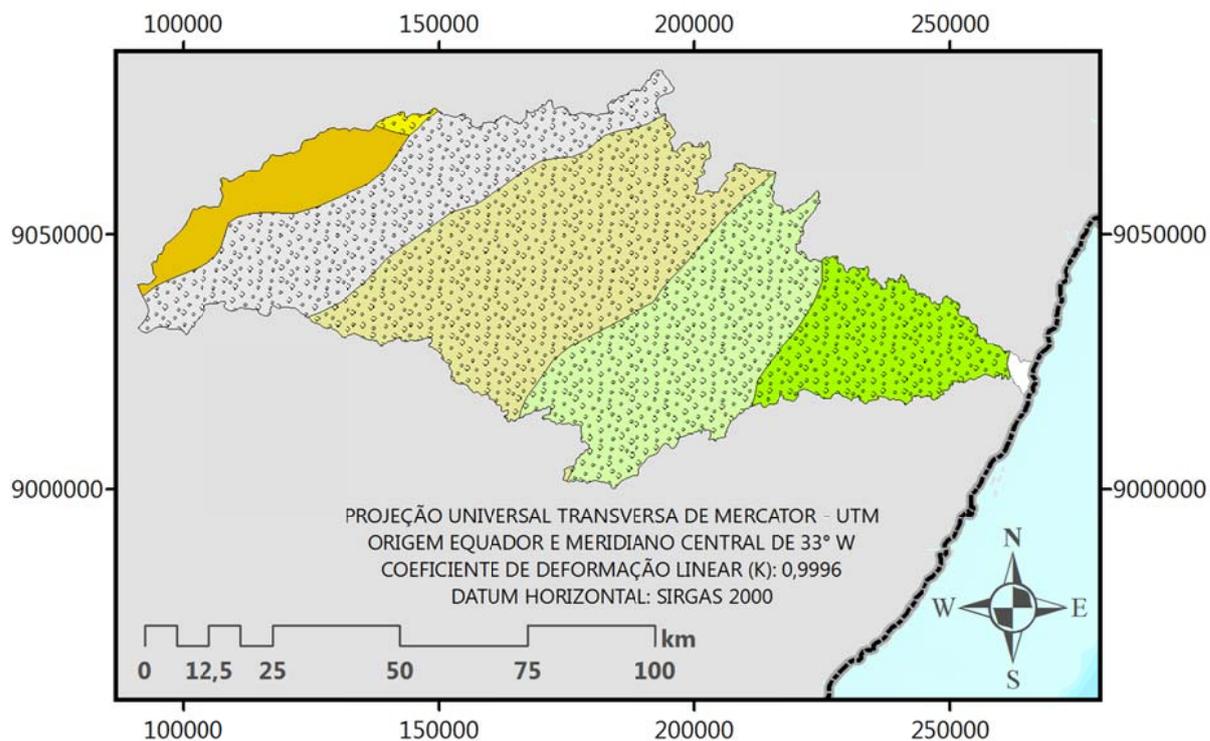


Figura 20 – Mapa de Vegetação da bacia do rio Una.
 Fonte: CPRM (2011a) [16].

3.1.3. POTAMOGRAFIA

O rio Una nasce na serra da Boa Vista no município de **Capoeiras** (Pernambuco), a uma altitude de aproximadamente 900 metros, percorre uma extensão aproximada de 255 km até o seu encontro com o Oceano Atlântico, nas vilas de Várzea do Una e Abreu do Una, no município de **São José da Coroa Grande** (Pernambuco). A direção do seu curso em geral é oeste-leste e apresenta-se intermitente até o espaço territorial do município de Altinho, quando se torna perene. Seus principais afluentes pela margem direita são o riacho Salobro, riacho Salgadinho, riacho Quatis, riacho da Mandioca, rio da Chata, **rio Piranji** e **rio Jacuípe**. E pela margem esquerda, riacho Games, riacho Gravatá, riacho Exú, rio Mentiroso, rio Maracujá, rio Camevô, rio Preto, rio Camocim-Mirim e rio José da Costa (PERNAMBUCO, 1998 [58]; PERNAMBUCO, 2006 [61]; PERNAMBUCO, 2012 [64]).

O rio Piranji, principal afluente do Una, tem seu curso iniciado no distrito de Pau Ferro, em Quipapá, a uma altitude aproximada de 600 m. Tem uma extensão de 72 km e deságua no rio Una a 3 km a montante da cidade de Palmares (PERNAMBUCO, 2006) [61].

O rio Jacuípe serve de limite entre os Estados de Pernambuco e Alagoas (PERNAMBUCO, 2012) [64].

Na Figura 21 é apresentado um *Diagrama Unifilar* para a bacia do rio Una.

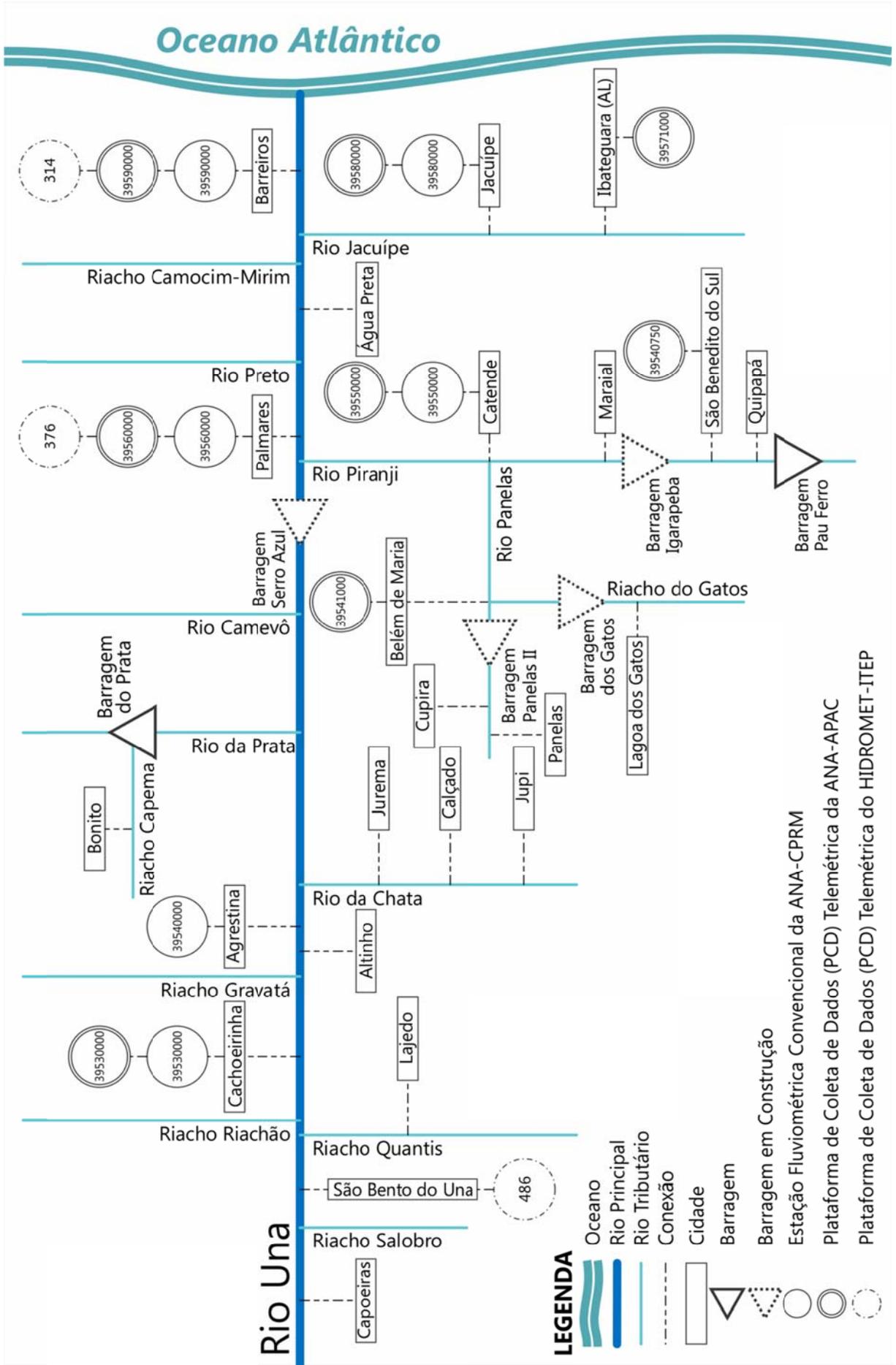


Figura 21 – Diagrama Unifilar para a bacia do rio Una

3.1.4. ÁREA E DIVISÃO POLÍTICO ADMINISTRATIVA

A bacia hidrográfica do rio Una apresenta uma área de aproximadamente 6.785,79 km², dos quais 6.292,90 km² estão inseridos no Estado de Pernambuco e os 492,89 km² restantes no Estado de Alagoas. A área da bacia, correspondente ao Estado de Pernambuco, apresenta um percentual de 6,32% do total do Estado (PERNAMBUCO, 1998 [58]; PERNAMBUCO, 2006 [61]).

A bacia do rio Una, na porção referente ao Estado de Pernambuco, abrange 42 municípios, dos quais 13 estão totalmente inseridos na bacia (Agrestina, Belém de Maria, Catende, Cupira, Ibirajuba, Jaqueira, Lagoa dos Gatos, Maraial, Palmares, Panelas, Quipapá, São Benedito do Sul e Xexéu), 14 possuem sede inserida na bacia (Água Preta, Altinho, Barreiros, Bonito, Cachoeirinha, Calçado, Capoeiras, Joaquim Nabuco, Jucatí, Jupí, Jurema, Lajedo, São Bento do Una e São Joaquim do Monte), e 15 estão parcialmente inseridos (Barra de Guabiraba, Bezerros, Caetés, Camocim de São Félix, Canhotinho, Caruaru, Gameleira, Pesqueira, Rio Formoso, Sanharó, São Caetano, São José da Coroa Grande, Tacaimbó, Tamandaré e Venturosa). Os municípios integrantes da bacia e seus percentuais de participação estão definidos na Tabela 4 (PERNAMBUCO, 1998) [58].

Na Figura 22 é apresentado o *Mapa de Divisão Político Administrativa* da bacia do rio Una.

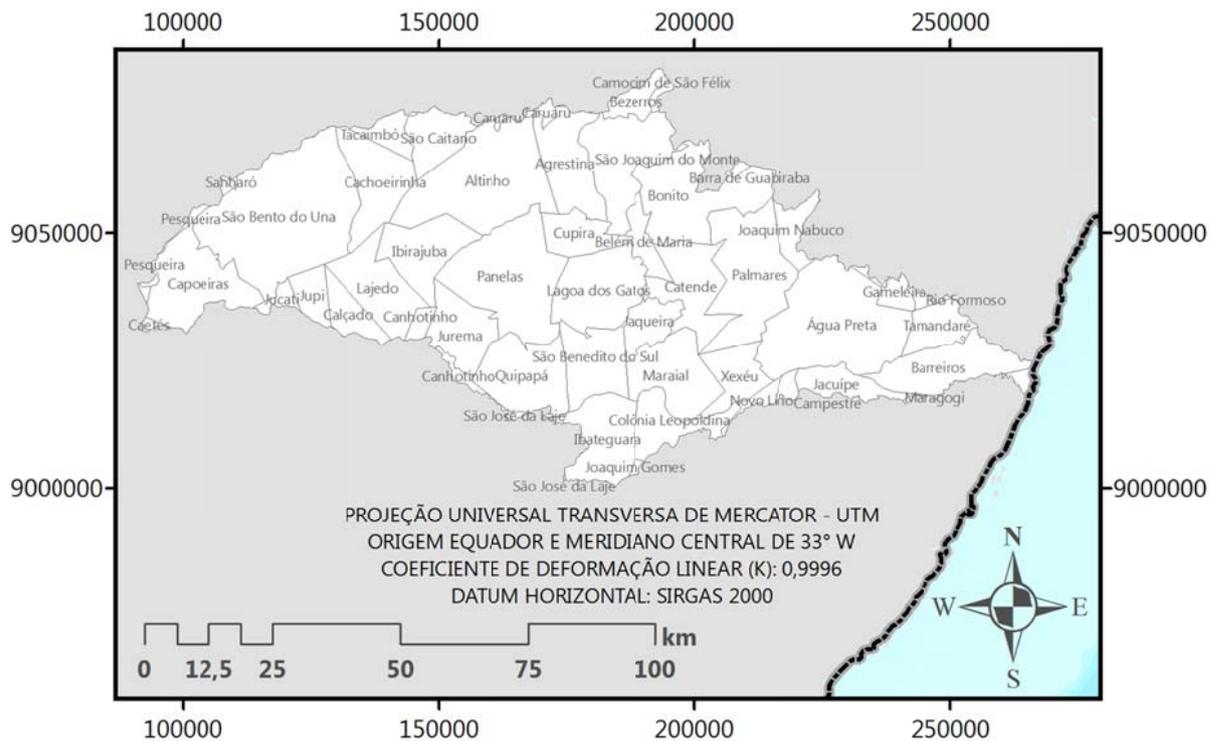


Figura 22 – Mapa de Divisão Político Administrativa da bacia do rio Una.

Tabela 4 – Relação dos Municípios de Pernambuco da bacia do rio Una

Nº	Municípios	Área do Município			
		Área total do Município	Área pertencente à bacia	Percentual pertencente à bacia	Percentual em relação à área Total ^(**) da bacia
		(km ²)	(km ²)	(%)	(%)
1	Agrestina ^(*)	198,0	198,0	100,0	2,92
2	Água Preta ^(*)	532,0	477,2	89,7	7,03
3	Altinho ^(*)	452,6	447,2	98,8	6,59
4	Barra de Guabiraba	118,1	5,0	4,2	0,07
5	Barreiros ^(*)	229,8	195,1	84,9	2,88
6	Belém de Maria ^(*)	63,8	63,8	100,0	0,94
7	Bezerros	545,7	63,8	11,7	0,94
8	Bonito ^(*)	392,9	284,1	72,3	4,19
9	Cachoeirinha ^(*)	183,2	181,2	98,9	2,67
10	Caetés	324,2	25,0	7,7	0,37
11	Calçado ^(*)	56,0	39,7	70,9	0,59
12	Camocim de São Félix	50,9	13,6	26,7	0,20
13	Canhotinho	423,0	36,4	8,6	0,54
14	Capoeiras ^(*)	344,3	253,1	73,5	3,73
15	Caruaru	932,0	11,2	1,2	0,17
16	Catende ^(*)	160,9	160,9	100,0	2,37
17	Cupira ^(*)	104,2	104,2	100,0	1,54
18	Gameleira	260,8	33,1	12,7	0,49
19	Ibirajuba ^(*)	218,0	218,0	100,0	3,21
20	Jaqueira ^(*)	90,9	90,9	100,0	1,34
21	Joaquim Nabuco ^(*)	115,6	67,9	58,7	1,00
22	Jucati ^(*)	109,4	22,0	20,1	0,32
23	Jupi ^(*)	151,2	86,5	57,2	1,27
24	Jurema ^(*)	147,0	139,4	94,8	2,05
25	Lagoa dos Gatos ^(*)	189,2	189,2	100,0	2,79
26	Lajedo ^(*)	208,9	206,2	98,7	3,04
27	Maraial ^(*)	217,3	217,3	100,0	3,20
28	Palmares ^(*)	376,2	376,2	100,0	5,54
29	Panelas ^(*)	369,6	369,6	100,0	5,45
30	Pesqueira	1.036,0	17,6	1,7	0,26
31	Quipapá ^(*)	225,6	225,6	100,0	3,32
32	Rio Formoso	235,0	15,7	6,7	0,23
33	Sanharó	247,5	2,57	1,04	0,04
34	São Benedito do Sul ^(*)	209,3	209,3	100,0	3,08
35	São Bento do Una ^(*)	715,9	638,6	89,2	9,41
36	São Caetano	373,9	105,4	28,2	1,55
37	São Joaquim do Monte ^(*)	230,6	218,8	94,9	3,22
38	São José da Coroa Grande	75,0	18,7	24,9	0,28
39	Tacaimbó	210,9	55,3	26,2	0,81
40	Tamandaré	205,0	92,3	45,0	1,36
41	Venturosa	326,1	3,6	1,1	0,05
42	Xexéu ^(*)	116,5	116,5	100,0	1,72
	TOTAL		6.295,8		92,78^(**)

(*) Município com sede inserida na bacia. (**) Em relação à área Total de 6.785,79 km².

Fonte: Pernambuco (1998) [58].

3.1.5. CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS

O clima da região onde estão situadas as unidades hídricas em estudo está caracterizado da seguinte forma: na área costeira, localizada na Zona da Mata (parte da bacia do rio Una), apresenta-se quente e úmido, com totais anuais de precipitação elevados (superiores a 1.000 mm), e com o período chuvoso iniciando-se no mês de março e prolongando-se até agosto; a região do Agreste Pernambucano é uma área intermediária entre a Zona da Mata (quente e úmido) e o Sertão (semiárido), apresentando similaridade ora com uma, ora com outra região. A bacia do rio Una possui claramente esses dois comportamentos climáticos, tendo o espaço territorial do município de Agrestina como o limite desses dois regimes climáticos: sendo as áreas do Agreste mais próximas do Sertão, com o período de chuvas que vai de fevereiro a maio e têm o mês de março como o mês mais chuvoso (a precipitação anual média está entre 600 e 800 mm), salientando-se que estas precipitações são menos concentradas do que no Sertão. Já nas áreas da região localizadas próxima da Zona da Mata, com o período de chuvas que vai de março a julho e o mês mais chuvoso é junho (PERNAMBUCO, 2006) [61].

Ainda segundo Pernambuco (2002) [60], o comportamento hidrológico da bacia é caracterizado por precipitações elevadas no médio e baixo curso da bacia, enquanto no alto curso, as precipitações médias observadas tendem a diminuir:

- O curso superior, com cerca de 2.900 km² de área e precipitação média anual de 700 mm, é caracterizado por escoamentos intermitentes anuais e grandes picos de enchentes de média recorrência;
- No curso médio, com cerca de 2.100 km² de área e precipitação média anual de 1.500 mm, encontram-se o afluente Piranji e seu tributário Pannels. Os escoamentos são permanentes, com picos de cheias elevados e maior repetição de vazões máximas, comparadas à sua bacia de contribuição, do que os observados no curso superior; e

- No curso inferior, com cerca de 1.700 km² de área e precipitação média anual de 2.000 mm, encontram-se os afluentes Santo Antônio e Jacuípe. Os escoamentos são permanentes, os picos de enchentes são elevados e a recorrência é semelhante à observada no curso médio.

Na Figura 23 é apresentado o *Mapa de Isoietas das Médias de Totais Anuais* da bacia do rio Una.

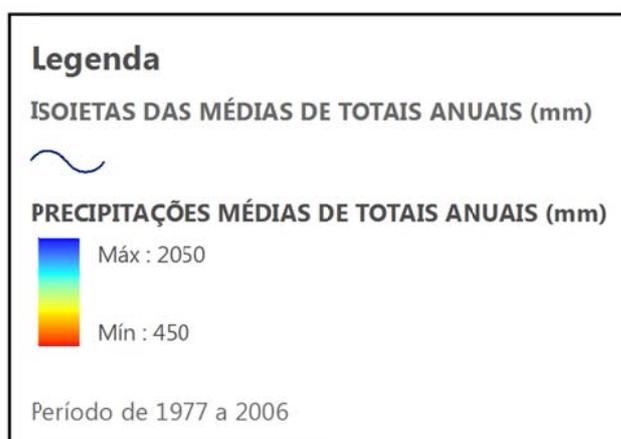
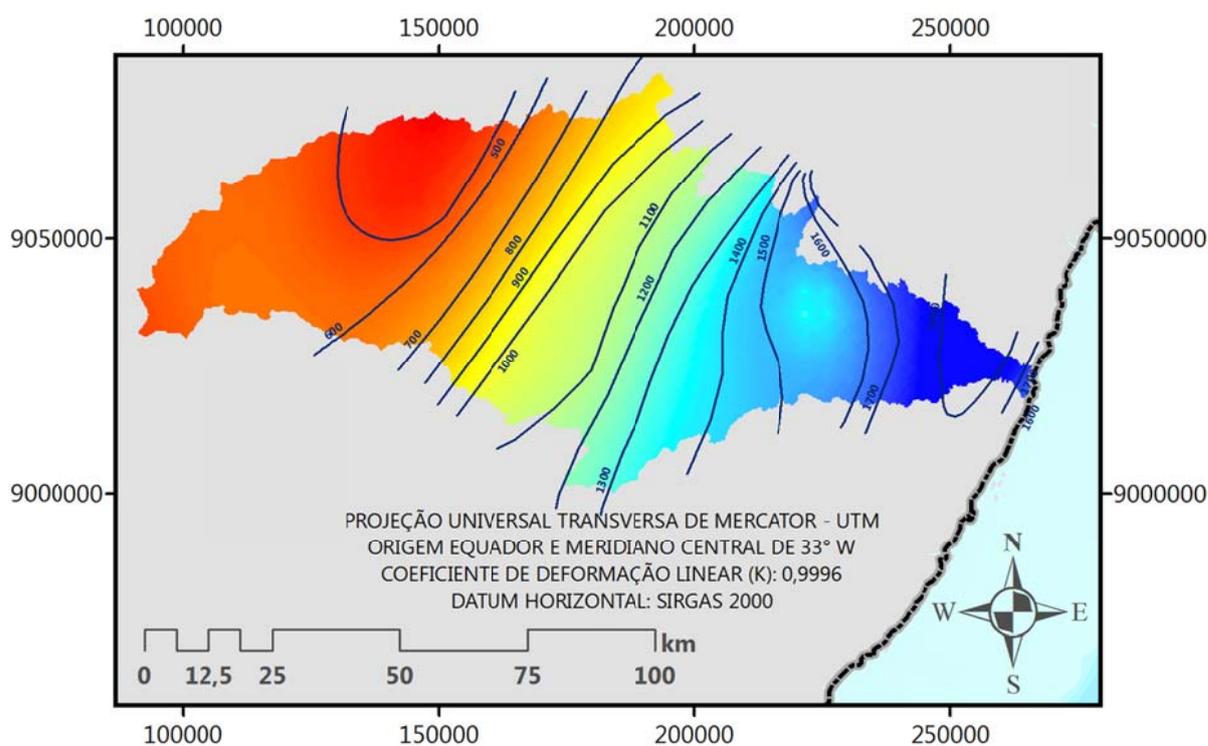


Figura 23 – Mapa de Isoietas das Médias de Totais Anuais da bacia do rio Una.
Fonte: CPRM (2011b) [17].

3.1.6. RELEVO

A região oriental da unidade hídrica apresenta formas de relevo bem distintas. Uma planície, correspondente à faixa costeira (com cotas altimétricas inferiores a 100 m). Outra formada por um conjunto de morros e colinas, de formato *mamelonar*, que se estende até as proximidades do **planalto da Borborema**, no espaço territorial dos municípios de Maraial, Catende e Palmares (as altitudes chegam até 300 m). A partir deste ponto na parte ocidental da bacia, sobre o planalto da Borborema, localizam-se superfícies *aplainadas* (com altitudes variando entre 400 e 700 m). As áreas com cotas altimétricas mais elevadas estão situadas na porção oeste (com altitudes variando entre 800 e 1000 m), em áreas dos municípios de Capoeiras, Pesqueira e Jupi (PERNAMBUCO, 2006) [61].

Na Figura 24 é apresentado o *Mapa de Hipsometria* da bacia do rio Una e na Figura 25, o *Mapa de Relevo* da bacia do rio Una.

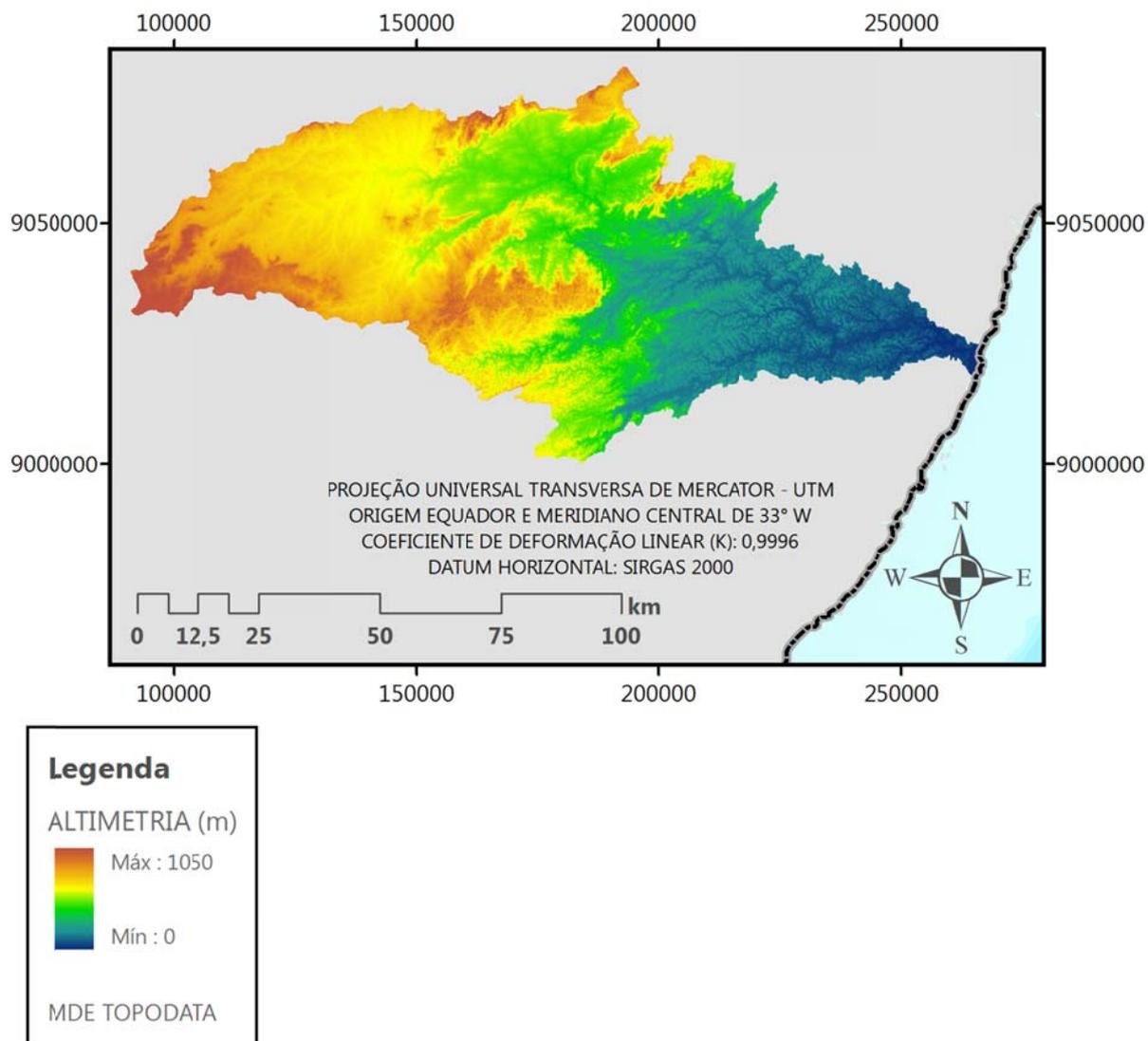


Figura 24 – Mapa de Hipsometria da bacia do rio Una.
Fonte: INPE (2008) [42]

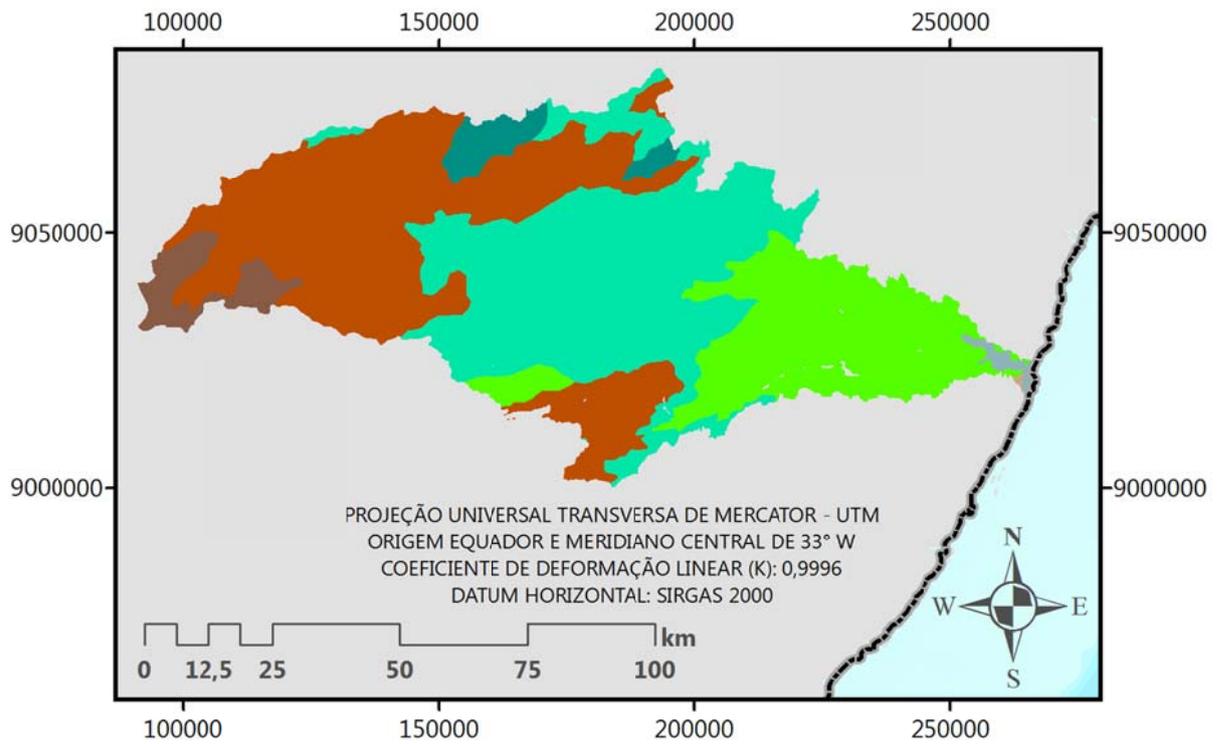


Figura 25 – Mapa de Relevo da bacia do rio Una.

Fonte: CPRM (2012) [18].

3.1.7. GEOLOGIA

A bacia do rio Una é representada, quase inteiramente, por rochas cristalinas e cristalofílicas do Pré-Cambriano Indiviso. Grande parte de sua área é constituída pelo Complexo Migmatítico-Granitóide - pCmi com participação aproximadamente igualitária entre os migmatitos e os granitos. Os migmatitos, dos tipos estromático, epibolítico, nebulítico e diadisítico, com composição predominantemente granodiorítica possuindo paleossoma anfibolítico e neossoma quartzo-feldspático, ocorrem principalmente nas áreas de Belém de Maria, Maraial até Água Preta e, mais a oeste, de São Bento do Una a Agrestina. Quanto aos granitos associados a granodioritos dominam áreas de Barreiros, de Jurema, de Lagoa dos Gatos a Bonito; isolados como corpos graníticos ocorrem ainda a oeste de Lagedo e Jupi e ao sul de Belo Jardim. Um corpo de sienito com variações entre quartzo-sienito e melasienito, do Pré-Cambriano Superior, ocorre em Cachoeirinha, em forma elíptica de direção NNE-SSW. As estruturas dúcteis predominam nos migmatitos da região que abrange os municípios de Catende e Água Preta com eixos antiformes e sinformes segundo direção NE-SW. Eventuais falhamentos transcorrentes destrógiros de direção NW-SE ocorrem nesses migmatitos, além de um falhamento transcorrente levógiro de maior extensão, de Capoeiras a São Bento do Una, com direção NE-SW a NNE-SSW. Quanto a área sedimentar, correspondente a uma pequena parte da bacia, é representada quase inteiramente por depósitos areno-argilosos de aluviões recentes, além de reduzidos testemunhos da Formação Barreiras com composição areno-argilosa, em morros isolados (PERNAMBUCO, 1998 [58]; PERNAMBUCO, 2006 [61]).

Na Figura 26 é apresentado o *Mapa de Geológico Simplificado* da bacia do rio Una.

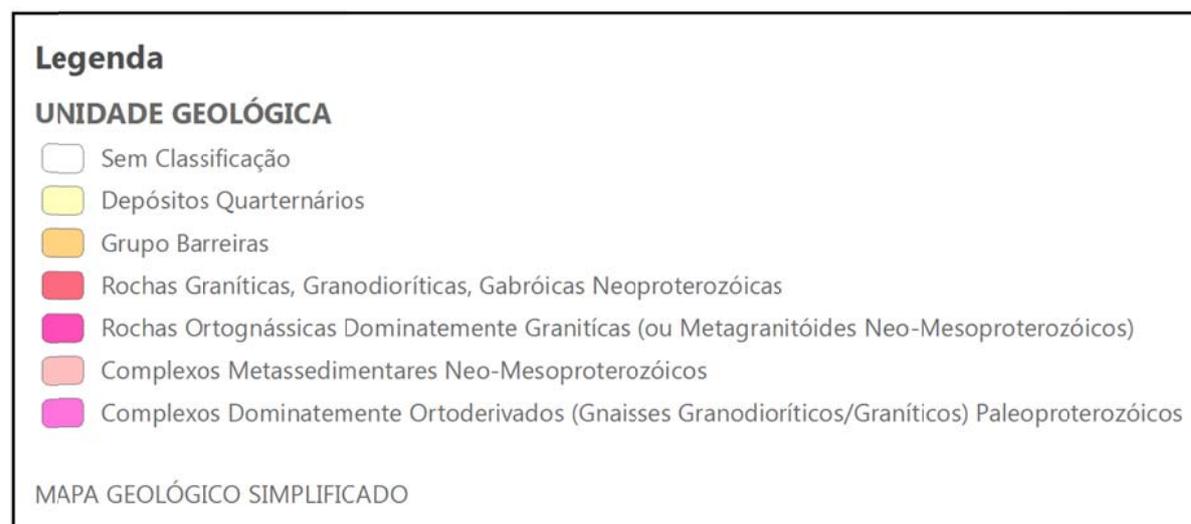
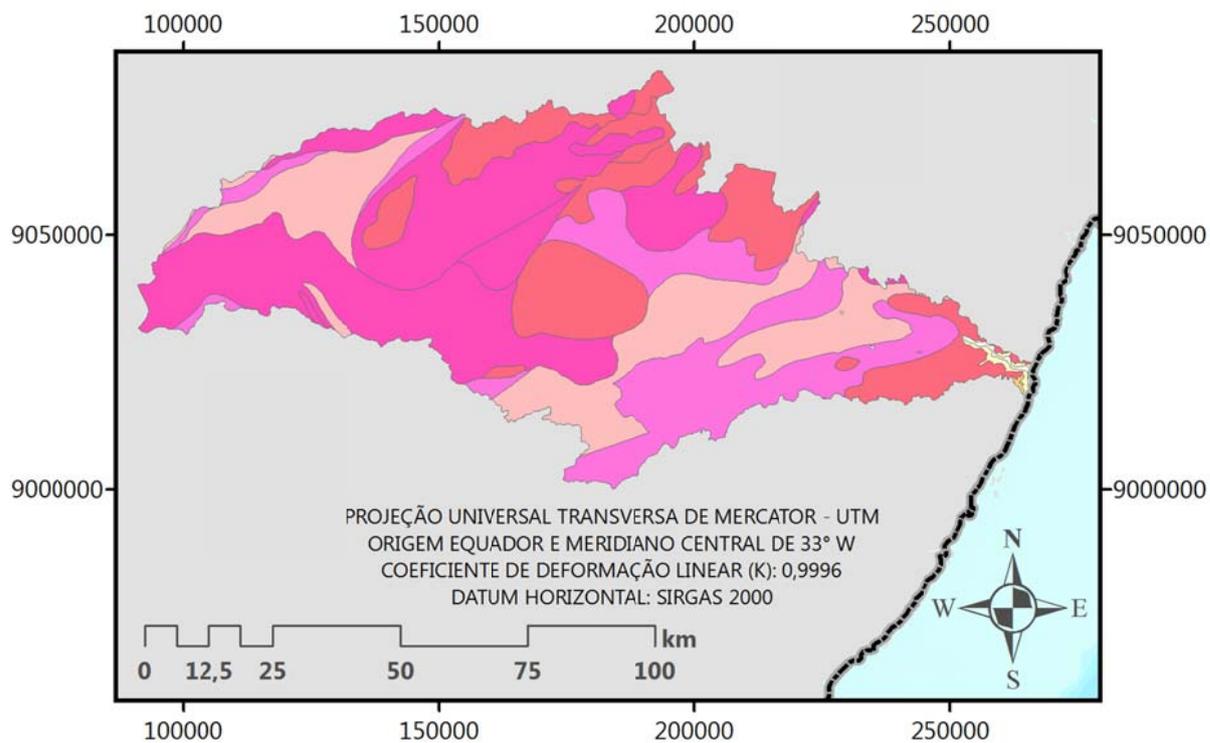


Figura 26 – Mapa Geológico Simplificado da bacia do rio Una.
Fonte: CPRM (2011a) [16].

3.1.8. SOLOS

Os solos mais expressivos da bacia hidrográfica do rio Una são: Planossolos, Regossolos, Vertissolos, Solos Litólicos, Podzólicos Distróficos, Latossolos Distróficos e Areias Quartzosas Marinhas. Na porção semiárida da bacia, já situada na região fisiográfica do **Agreste**, encontra-se ocorrência de Regossolos (REe e REd), Planossolos (PL), Vertissolos (V) e Solos Litólicos (Re), que têm no geral potencial de aproveitamento econômico com pastagem e com agricultura. Os **Regossolos** ocorrem em áreas isoladas ao norte, a nordeste e a sudoeste da bacia do rio Una. São solos pouco desenvolvidos, arenosos, medianamente profundos, com presença de materiais primários no perfil. A utilização mais apropriada para esses solos é o cultivo de pastagens adaptadas à região que não devem dispensar um bom manejo de vegetação natural de caatinga, em especial no período de estiagem. Do ponto de vista hidrológico, os Regossolos conseguem aproveitar a maioria das chuvas em face da elevada capacidade de infiltração que apresentam. Como são pouco desenvolvidos, atingem rapidamente o ponto de saturação nas chuvas de maior significação, chegando a gerar escoamentos superficiais e provocar erosão. Nas áreas onde são associados com Planossolos, as águas escoadas carreiam sais, fornecidos pelo Planossolo. Por sua reduzida capacidade de retenção hídrica, são solos muito susceptíveis a seca edáfica. O **Planossolos Solódicos** são solos rasos, de baixa permeabilidade, que frequentemente apresentam excesso de água no período chuvoso e extremo ressecamento no período seco. Tem relevo plano e suavemente ondulado e salienta-se que eles representam grandes áreas ao longo dos principais rios na bacia. Devem ser utilizados para o cultivo de pastagens. Do ponto de vista hidrológico, os Planossolos por serem pouco permeáveis são capazes de gerar escoamentos representativos na maioria das chuvas. Em face da sua composição química e ao caráter solódico que o classifica, são capazes de ceder sais às águas escoadas, chegando mesmo, a comprometer a qualidade das águas armazenadas. Os **Vertissolos** são solos com relevo suave ondulado, alta fertilidade e elevado teor de

argila. A utilização mais apropriada para esses solos é mesmo a produção de pastagens nativas e/ou cultivadas. Do ponto de vista hidrológico, possuem dois comportamentos hídricos diversos. Quando seco, torna-se muito duro, forma blocos e apresenta rachaduras na superfície e subsuperfície, dando ao solo elevada capacidade de absorção das primeiras chuvas. Depois de molhado, tornam-se difíceis de manejar por serem escorregadios e pegajosos, assumindo uma lenta drenagem no perfil, o que modifica sensivelmente o comportamento hidrológico fazendo-os lento na absorção das chuvas, ensejando a formação de escoamentos superficiais representativos elevando seu risco de erosão, em geral baixo, pelo relevo aplainado que apresentam. Os **Solos Litólicos** são muito pouco desenvolvidos e fortemente sujeitos à erosão face ao relevo forte ondulado e montanhoso que apresentam. Do ponto de vista hidrológico, têm baixa capacidade de retenção hídrica e elevado poder de escoamento superficial quando da ocorrência de chuvas. Devem ser reservados a preservação da fauna e da flora. A porção da bacia, que fica localizada na região fisiográfica do **Litoral-Mata**, apresenta solos mais desenvolvidos, Podzólicos Distróficos (PV), Latossolos Distróficos (LVd) todavia, com relevo movimentado, raramente ondulado, e, mais frequentemente, forte ondulado a montanhoso. Atualmente esses solos são cultivados com cana-de-açúcar e pequenas áreas de pastagens para os animais de trabalho. Do ponto de vista hidrológico, estes solos tem elevada capacidade de absorção das chuvas e de retenção hídrica, alto grau de erodibilidade pelo relevo movimentado e pela textura argilosa que possuem, além do que são geradores de escoamentos representativos tendo em vista a lenta capacidade de absorção das chuvas, típicas dos solos argilosos, sobretudo num padrão climático que, não raro, supera os 80 dias de chuva no período chuvoso de 6 a 7 meses. Na **baixada litorânea**, próximo à orla marítima, ocorrem as **Areias Quartzosas Marinhas Distroficas** (AMd). São planas, excessivamente arenosas e drenadas, muito ácidas e de baixa fertilidade natural. É utilizada com pastagem e coqueiros. Atualmente o uso dessas terras tem interessado mais a atividades urbanas de loteamentos pela proximidade do mar, em detrimento ao uso agrícola. Do ponto

de vista hidrológico, por serem excessivamente drenados, absorvem bem as primeiras chuvas, porém, ao longo do período chuvoso, sofrem problemas de elevação de lençol freático nas áreas mais baixas. Oferecem baixa retenção de unidade e nutrientes, e nas áreas expostas a brisa marítima podem sofrer erosão eólica (PERNAMBUCO, 1998 [58]; PERNAMBUCO, 2006 [61]).

Na Figura 27 é apresentado o *Mapa de Solos* da bacia do rio Una.

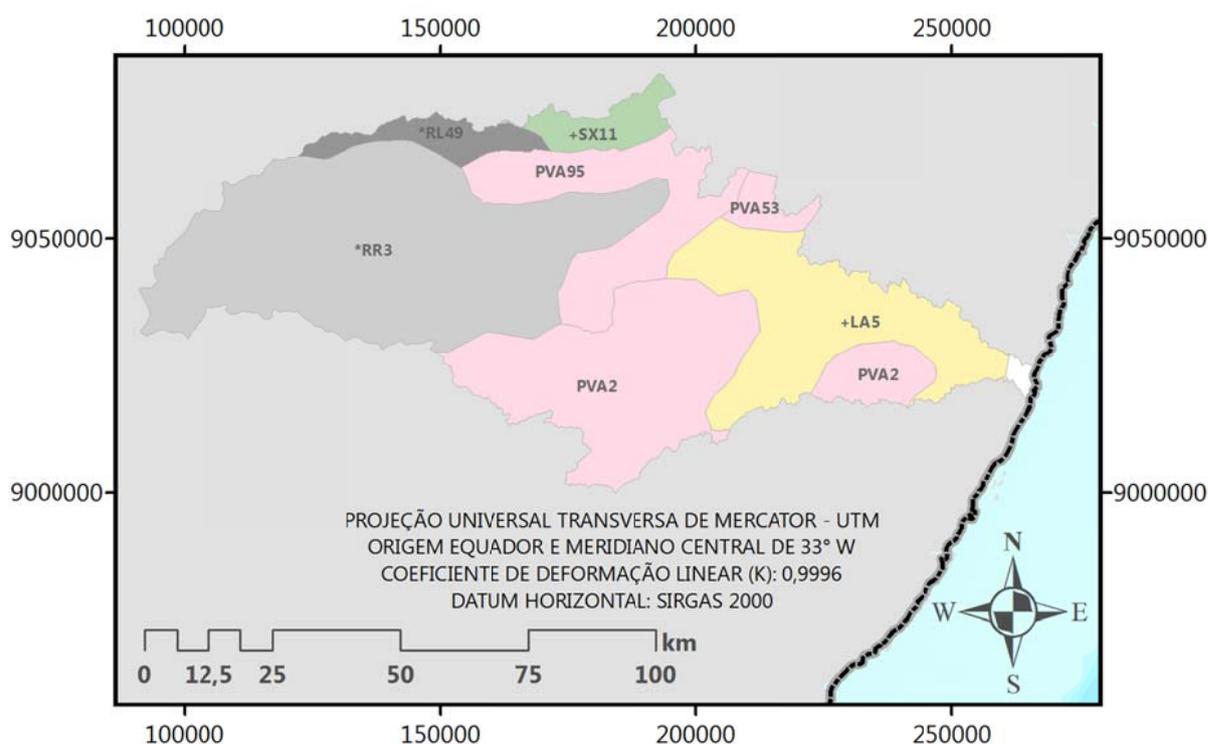


Figura 27 – Mapa de Solos da bacia do rio Una.

3.1.9. USO E OCUPAÇÃO DO SOLO

De acordo com Pernambuco (2006) [61] na área da bacia do rio Una o uso e ocupação do solo tem a seguinte tipologia:

- Ocupação urbana e industrial;
- Áreas exploradas com a cultura da cana-de-açúcar;
- Policultura e pecuária;
- Áreas de vegetação *arbórea fechada, arbustivo-arbórea aberta e arbustivo-arbórea fechada*;
- Manguezal; e
- Barramentos.

3.2. COLETA, AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DOS DADOS

3.2.1. LEVANTAMENTO DE DADOS DE INUNDAÇÃO NA BACIA

3.2.1.1. MARCAS DE CHEIA PARA O EVENTO DE 2000

A partir de um trabalho da *Fundação de Desenvolvimento Municipal* (FIDEM) da Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Social do Estado de Pernambuco, atualmente, *Agência Estadual de Planejamento e Pesquisas de Pernambuco* (CONDEPE/FIDEM), sob a coordenação do Professor Mariano Aragão da UFPE e do Arquiteto Luiz Gonzaga da FIDEM, publicado em dezembro de 2000, com o levantamento das áreas atingidas pela inundação de agosto de 2000 nos municípios pernambucanos de Água Preta, Barreiros, Catende e Palmares (PERNAMBUCO, 2000) [59], foram digitalizadas em scanner A0 e implantadas em um ambiente SIG para a realização do registro das imagens, georreferenciamento, com base nas ortofotos digitais do levantamento realizado pelo LACTEC (2011) [44], seguido do delineamento manual da mancha de inundação, como apresentado na Figura 28 para o município de Palmares, Pernambuco. Note-se que este levantamento apenas contemplou a **margem esquerda** do rio. Na Figura 29 mostra-se o mesmo contorno da mancha de inundação do evento de agosto de 2000 em Palmares, mapeado pela equipe da UFPE.

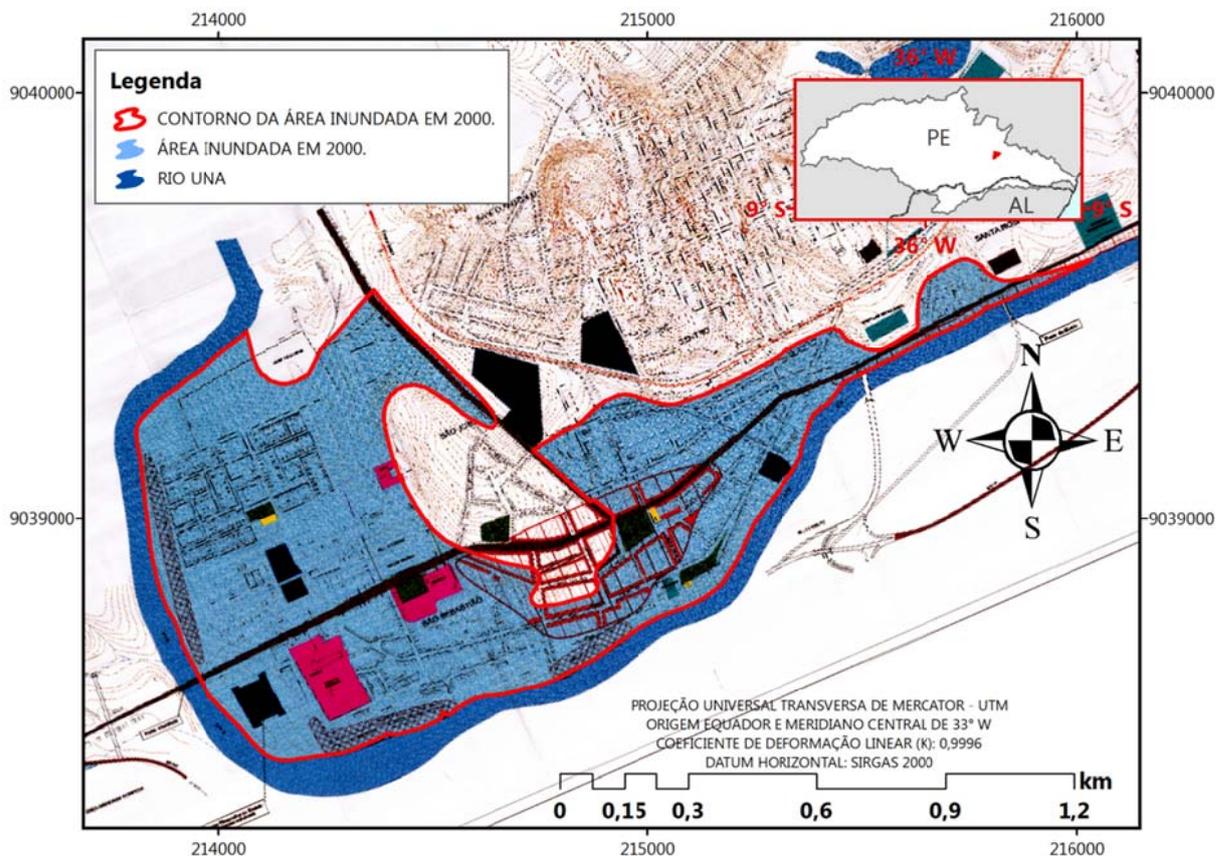


Figura 28 – Delineamento da mancha de inundação em Palmares da FIDEM.
Fonte: Pernambuco (2000) [59].

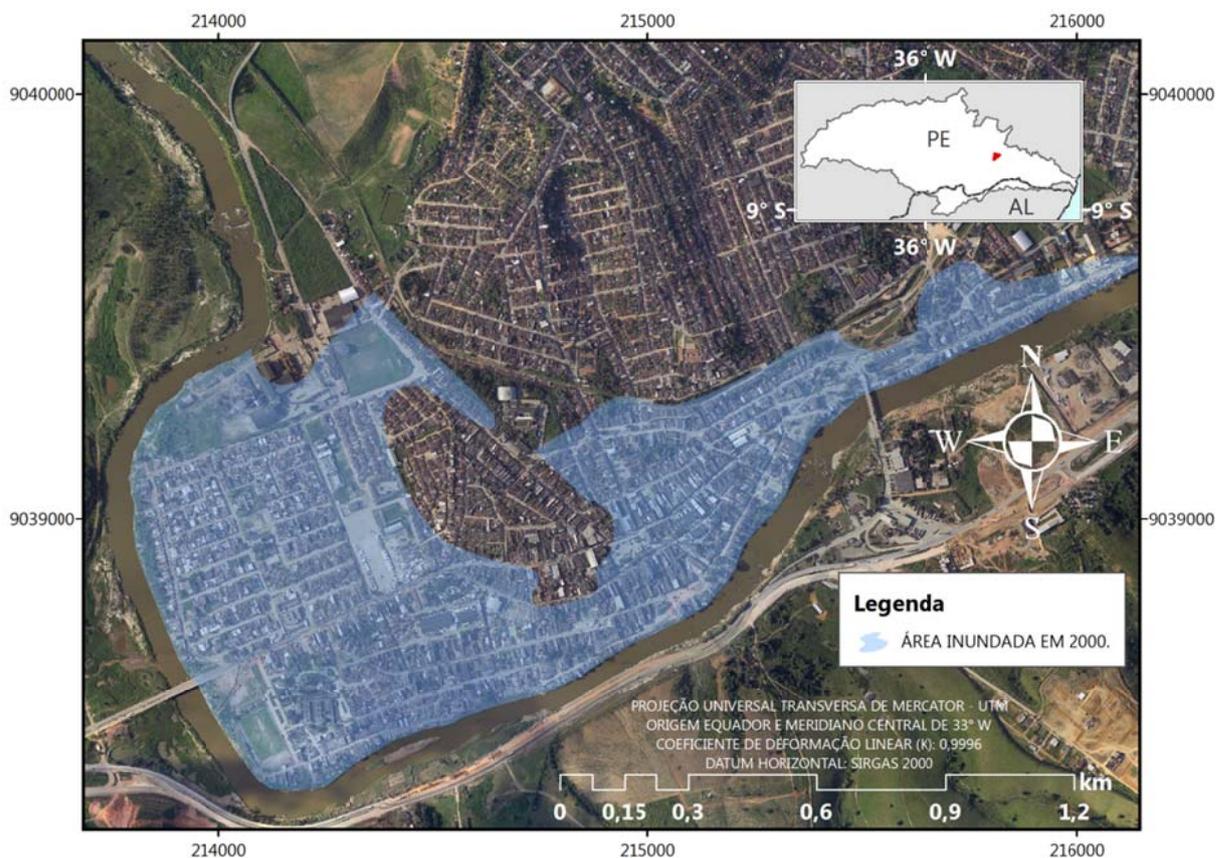


Figura 29 – Mancha de inundação de 2000 em Palmares do levantamento da FIDEM.

3.2.1.2. MARCAS DE CHEIA PARA O EVENTO DE 2010

Logo após a inundação de junho de 2010 em Palmares, Pernambuco, equipe do Corpo de Bombeiros do estado promoveu registro das alturas, em relação ao terreno, das marcas de cheia, posicionados através das Coordenadas Geográficas (Lat/Long) tomadas por GPS de navegação no Datum horizontal WGS84. Este levantamento foi igualmente inserido em ambiente SIG e ajustado às ortofotos digitais do levantamento realizado pelo LACTEC (2011) [44]. Por meio do MDT LiDAR (LACTEC, 2011) [44] de Palmares, os pontos do levantamento passaram a ter cotas das marcas de cheia em vez de alturas em relação ao terreno, gerando-se uma grade regular de pontos, um raster, de mesmo espaçamento do MDT LiDAR, através do interpolador IDW (do inglês "*Inverse Distance Weighted*", ou seja, *Peso do Inverso da Distância*) com expoente 1. O IDW foi escolhido por ser um interpolador exato, ou seja, nos locais em que o grid coincide com os pontos levantados, as cotas calculadas são iguais aos registros de campo, gerando superfícies mais suaves apesar da não adoção de fator de suavização. O processamento computacional é rápido e gera bons resultados quando os pontos são levantados segundo uma malha igualmente distribuída na área do levantamento. Daí foi possível aplicar uma *álgebra de mapas*: a subtração do raster interpolado em relação ao MDT LiDAR, e obter um raster do alcance da inundação, para ser comparado com as simulações a serem apresentadas no capítulo posterior.

A Figura 30 mostra o contorno da mancha de inundação extrapolada para o evento de junho de 2010 em Palmares, a partir das medições do Corpo de Bombeiros.

Esta metodologia de obtenção do contorno da mancha de inundação pode apresentar algumas falhas na extrapolação da superfície das marcas de cheia observadas para a definição do alcance da inundação, com a inclusão de regiões de depressões em áreas adjacentes sem conectividade hidráulica com o canal de

propagação do escoamento, podendo superestimar a mancha de inundação obtida a partir dos dados observados. Isso efetivamente aconteceu e será mostrado adiante.

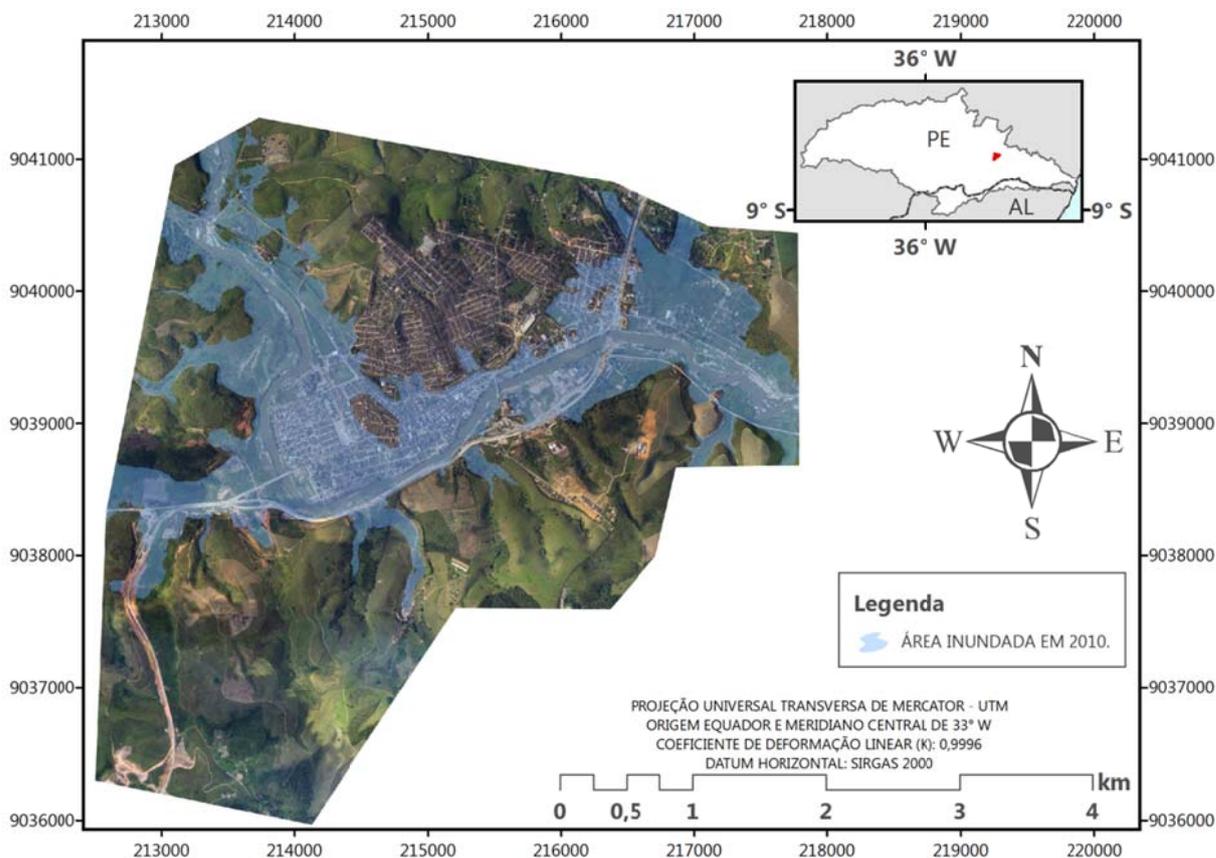


Figura 30 – Mancha de inundação de 2010 do levantamento do Corpo de Bombeiros.

3.2.1.3. MARCAS DE CHEIA PARA O EVENTO DE 2011

Em decorrência da cooperação técnico-científica firmada entre a SRHE-PE, APAC, UFPE e CPRM, foi constituída uma equipe formada por pesquisadores da UFPE e CPRM para realizar o levantamento das marcas da cheia (Figura 31), no município de Palmares em Pernambuco, após o evento de inundação do rio Una de maio de 2011.

Os equipamentos utilizados neste levantamento (Figura 32) são:

- GPS Geodésico L1/L2 TechGeo, modelo GTR-G², com precisão no modo estático de 3 mm+0,5 ppm⁵ horizontal e 10 mm+0,5 ppm vertical; e
- Estação Total Leica, modelo TC 407, com precisão de 5 mm±2 ppm.

⁵ Parte por milhão.



Figura 31 – Fotos das marcas de cheia levantadas em Palmares em 2011.
Fonte: Autor.



Figura 32 – Fotos do levantamento em Palmares em 2011.
Fonte: Autor.

Como a RN 384K, pertencente à Rede Altimétrica do *Sistema Geodésico Brasileiro* (SGB) do *Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística* (IBGE) ilustrada na Figura 33a localizada na antiga *Estação Ferroviária de Palmares*, encontra-se materializada próxima a uma edificação, em área cujo rastreo GPS é impossível ou suscetível a erros de multicaminho⁶, foi realizado o transporte da *cota ortométrica* da RN 384K para um vértice provisório (Figura 33b), base do levantamento, em local livre de obstruções, por meio de nivelamento geométrico, sendo denominado RN_{Trilho}. O GPS geodésico de dupla frequência L1/L2, que alcança maiores precisões em relação aos equipamentos de simples frequência que recebem somente a frequência L1, foi então colocado sobre a RN_{Trilho} para realização do transporte altimétrico e determinação das informações de planimetria dos pontos de amarração das linhas poligonais utilizadas para o levantamento das marcas de cheia por meio de estação total.



Figura 33 – (a) RN_{Trilho} utilizada como base do levantamento. Fonte: Autor.
(b) RN 384K de Rede Altimétrica Brasileira do IBGE. Fonte: Autor.

⁶ O multicaminho, como o seu próprio nome diz são sinais providos de caminhos secundários e captados pela antena do receptor GPS, tais sinais são refletidos em objetos próximos à antena.

Após o processamento dos dados levantados em campo, com uso do *GTR Processor 2.80* (TECHGEO, 2011) [81] para os dados do levantamento com o GPS e do *TopoEVN 6* (MÉTRICA, 2008) [53] para os dados do levantamento com estação total, foi feito um novo processamento destas informações pré-processadas na plataforma SIG, da mesma forma que o levantamento do item anterior, com interpolação IDW¹ e álgebra de mapas, gerando o contorno referente à mancha de inundação do evento de maio de 2011 em Palmares, como ilustrado na Figura 34. Novamente pode-se superestimar a mancha de inundação obtida a partir dos dados observados, devido ao mesmo motivo já exposto no item anterior.

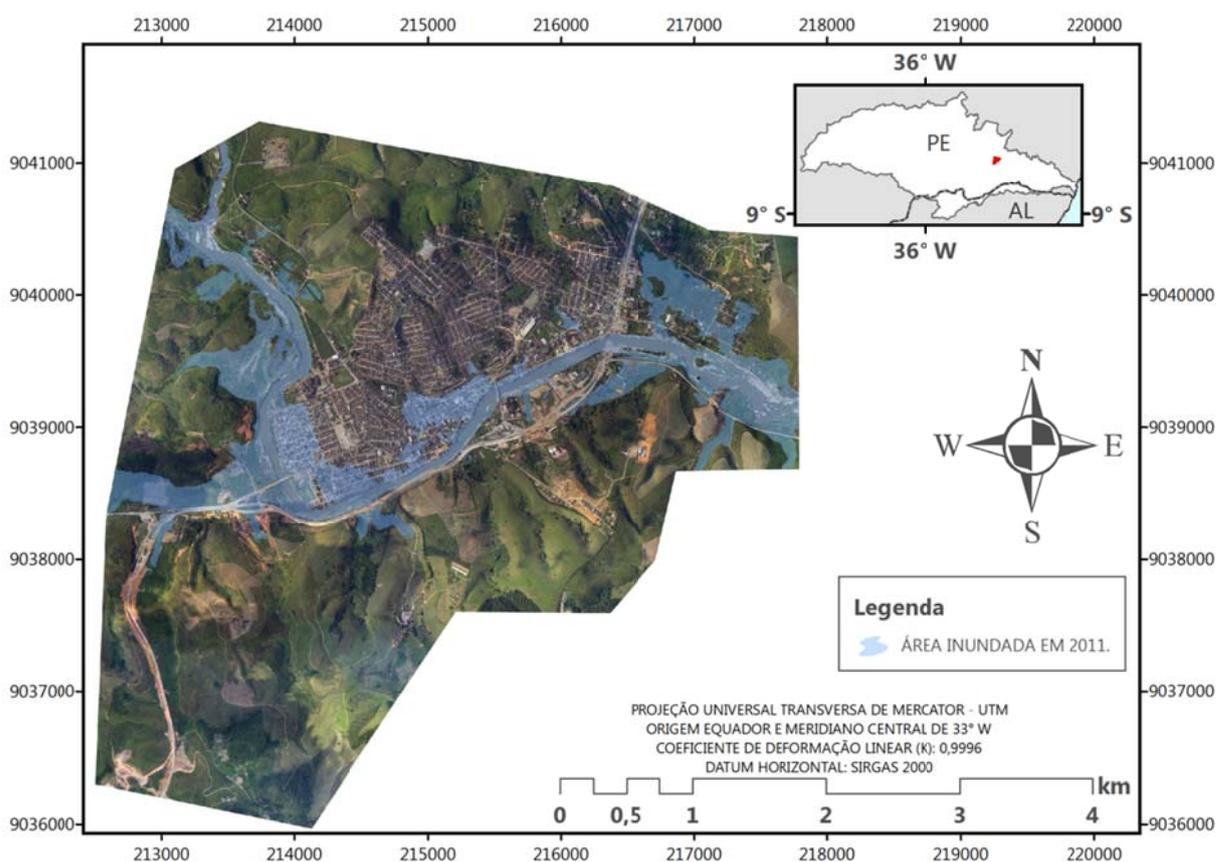


Figura 34 – Mancha de inundação de 2011 do levantamento da UFPE/CPRM.

3.2.2. DADOS HIDROLÓGICOS

3.2.2.1. SÉRIE HISTÓRICA DA SUDENE

Foram selecionadas séries de estações pluviométricas com no mínimo 15 anos de dados. A Tabela 5 apresenta uma listagem das 40 estações selecionadas da antiga *Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste* (SUDENE), com registros até o ano de 1998, e sua configuração espacial pode ser vista na Figura 35. Foi feita uma análise preliminar das séries para a detecção de erros grosseiros e uma análise de consistência dentro de uma visão regional, ou seja, comprovar o grau de *homogeneidade dos dados* disponíveis numa estação com relação às observações registradas em estações vizinhas, através do método de *análise de dupla massa* aplicado às séries de precipitação anual acumulada.

Tabela 5 – Estações pluviométricas da SUDENE utilizadas no estudo

Código	Nome (Continua)	SB	Entidade	Latitude ^(*)	Longitude ^(*)	Série (anos)
3866762	Pesqueira	49	SUDENE	-8° 22' 00,0"	-36° 42' 00,0"	58
3866788	Sanhoro	39	SUDENE	-8° 22' 00,0"	-36° 34' 00,0"	30
3866939	Alagoinha	49	SUDENE	-8° 28' 60,0"	-36° 49' 00,0"	30
3867324	Brejo da Madre de Deus	39	SUDENE	-8° 09' 00,0"	-36° 22' 60,0"	74
3867429	Serra do Vento	39	SUDENE	-8° 13' 60,0"	-36° 22' 00,0"	28
3867613	Belo Jardim	39	SUDENE	-8° 19' 60,0"	-36° 27' 00,0"	25
3867642	Tacaimbo	39	SUDENE	-8° 19' 00,0"	-36° 17' 60,0"	29
3867672	S. Caitano	39	SUDENE	-8° 19' 00,0"	-36° 08' 60,0"	43
3867956	Cachoeirinha	39	SUDENE	-8° 28' 60,0"	-36° 13' 60,0"	28
3867986	Altinho	39	SUDENE	-8° 28' 60,0"	-36° 04' 60,0"	25
3868453	Bezerros	39	SUDENE	-8° 13' 60,0"	-35° 45' 00,0"	28
3868488	Gravata	39	SUDENE	-8° 13' 00,0"	-35° 34' 00,0"	47
3868509	Caruaru	39	SUDENE	-8° 16' 60,0"	-35° 58' 00,0"	47
3868832	S. Joaquim do Monte	39	SUDENE	-8° 25' 00,0"	-35° 51' 00,0"	25
3868992	Cortes	39	SUDENE	-8° 28' 00,0"	-35° 32' 60,0"	31
3876576	Caetes	39	SUDENE	-8° 46' 60,0"	-36° 37' 60,0"	27
3876868	Paranatama	49	SUDENE	-8° 55' 00,0"	-36° 40' 00,0"	27
3876967	Saloa	49	SUDENE	-8° 57' 00,0"	-36° 40' 00,0"	30
3877166	Ibirajuba	39	SUDENE	-8° 34' 60,0"	-36° 10' 60,0"	27
3877338	Lajedo	39	SUDENE	-8° 40' 00,0"	-36° 19' 00,0"	30
3877395	Panelas	39	SUDENE	-8° 40' 00,0"	-36° 01' 60,0"	51

Código	Nome (Conclusão)	SB	Entidade	Latitude ^(*)	Longitude ^(*)	Série (anos)
3877411	Jucati	39	SUDENE	-8° 42' 00,0"	-36° 27' 00,0"	30
3877475	Jurema	39	SUDENE	-8° 43' 00,0"	-36° 07' 60,0"	30
3877692	Quipapa	39	SUDENE	-8° 49' 00,0"	-36° 02' 60,0"	26
3877706	Garanhuns	39	SUDENE	-8° 52' 60,0"	-36° 28' 60,0"	38
3877878	Paquevira	39	SUDENE	-8° 55' 00,0"	-36° 07' 00,0"	27
3878383	Palmares	39	SUDENE	-8° 40' 60,0"	-35° 36' 00,0"	62
3878678	Xexeu	39	SUDENE	-8° 49' 00,0"	-35° 37' 00,0"	22
3878858	Colonia Leopoldina	39	SUDENE	-8° 55' 00,0"	-35° 43' 00,0"	22
3879126	Gameleira	39	SUDENE	-8° 34' 60,0"	-35° 22' 60,0"	27
3879179	Sirinhaem	39	SUDENE	-8° 34' 60,0"	-35° 07' 00,0"	23
3879246	Cucau	39	SUDENE	-8° 37' 60,0"	-35° 16' 60,0"	21
3879372	Rio Formoso	39	SUDENE	-8° 40' 00,0"	-35° 08' 60,0"	42
3879663	Barreiros	39	SUDENE	-8° 49' 60,0"	-35° 12' 00,0"	27
3887092	S. Jose Da Lage	39	SUDENE	-9° 01' 00,0"	-36° 02' 60,0"	23
3887162	Munguba	39	SUDENE	-9° 04' 00,0"	-36° 12' 00,0"	25
3887287	Rocha Cavalcanti	39	SUDENE	-9° 05' 60,0"	-36° 04' 00,0"	20
3887392	Uniao dos Palmares	39	SUDENE	-9° 10' 00,0"	-36° 02' 60,0"	71
3889055	Maragogi	39	SUDENE	-9° 01' 00,0"	-35° 13' 60,0"	30
3889122	Porto Calvo	39	SUDENE	-9° 04' 00,0"	-35° 23' 60,0"	53

(*) Coordenadas geográficas com Datum horizontal WGS84.

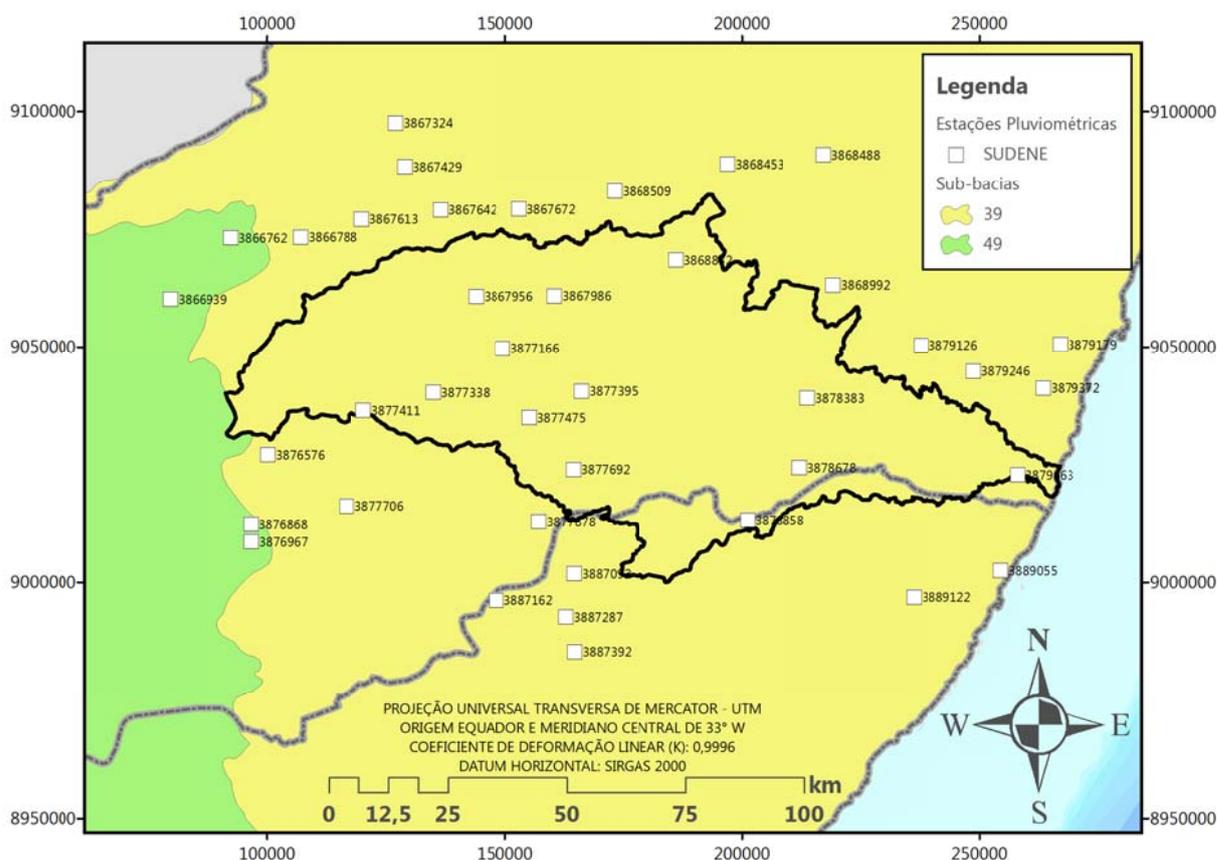


Figura 35 – Localização das estações pluviométricas da SUDENE.

3.2.2.2. SÉRIE HISTÓRICA DA HIDROMET-ITEP

Foram selecionadas séries de estações pluviométricas com no mínimo 15 anos de dados. A Tabela 6 apresenta uma listagem das 63 estações selecionadas da *Unidade de Monitoramento da Rede Hidrometeorológica de Pernambuco* (HIDROMET) do *Instituto de Tecnologia de Pernambuco* (ITEP), com séries até o ano de 2011, e sua configuração espacial pode ser vista na Figura 36. Da mesma forma, também foi feita uma análise preliminar e de consistência das séries de precipitação.

Também da HIDROMET-ITEP foram utilizadas séries de precipitações de 3 *Plataformas de Coletas de Dados* (PCDs) listadas na Tabela 7 e dispostas na Figura 37.

Tabela 6 – Estações pluviométricas da HIDROMET-ITEP utilizadas no estudo

Código	Nome (Continua)	SB	Entidade	Latitude ^(*)	Longitude ^(*)	Série (anos)
18	Pesqueira	49	HIDROMET-ITEP	-8° 21' 11,2"	-36° 41' 49,9"	75
19	Garanhuns	39	HIDROMET-ITEP	-8° 52' 59,9"	-36° 29' 16,1"	57
20	Belo Jardim	39	HIDROMET-ITEP	-8° 20' 12,1"	-36° 25' 31,1"	42
21	São Bento do Una (IPA)	39	HIDROMET-ITEP	-8° 31' 37,9"	-36° 27' 33,8"	49
24	Caruaru (IPA)	39	HIDROMET-ITEP	-8° 14' 17,9"	-35° 54' 56,9"	53
25	Palmares	39	HIDROMET-ITEP	-8° 40' 41,9"	-35° 34' 46,9"	79
52	Angelim	39	HIDROMET-ITEP	-8° 53' 17,9"	-36° 17' 10,0"	19
53	Canhotinho	39	HIDROMET-ITEP	-8° 52' 57,0"	-36° 11' 37,0"	31
55	Rio Formoso	39	HIDROMET-ITEP	-8° 39' 49,0"	-35° 09' 11,9"	54
56	Riacho das Almas	39	HIDROMET-ITEP	-8° 08' 17,2"	-35° 51' 33,1"	18
58	Gravatá	39	HIDROMET-ITEP	-8° 12' 02,2"	-35° 32' 35,2"	61
67	Bezerros	39	HIDROMET-ITEP	-8° 14' 35,9"	-35° 45' 10,1"	36
68	Brejo da Madre de Deus	39	HIDROMET-ITEP	-8° 08' 55,0"	-36° 21' 56,2"	80
80	Água Preta	39	HIDROMET-ITEP	-8° 42' 09,0"	-35° 31' 18,8"	19
85	Caruaru	39	HIDROMET-ITEP	-8° 17' 42,0"	-35° 59' 17,2"	21
102	Rio Formoso (Usina Cucau)	39	HIDROMET-ITEP	-8° 38' 22,9"	-35° 16' 05,9"	40
103	Cortês	39	HIDROMET-ITEP	-8° 30' 10,1"	-35° 30' 51,8"	49
104	Barra de Guabiraba	39	HIDROMET-ITEP	-8° 25' 08,0"	-35° 39' 34,9"	37
106	Barreiros	39	HIDROMET-ITEP	-8° 48' 45,0"	-35° 11' 25,1"	46
108	Primavera	39	HIDROMET-ITEP	-8° 20' 53,9"	-35° 20' 51,0"	18
109	Ribeirão (Fazenda Capri)	39	HIDROMET-ITEP	-8° 30' 36,0"	-35° 22' 36,8"	35
110	São José da Coroa Grande	39	HIDROMET-ITEP	-8° 53' 44,9"	-35° 08' 58,9"	18
111	Sirinhaém	39	HIDROMET-ITEP	-8° 37' 09,8"	-35° 07' 09,8"	42
113	Brejo da Madre de Deus (Fazenda Nova)	39	HIDROMET-ITEP	-8° 10' 54,8"	-36° 11' 39,1"	28
114	Sanharó	39	HIDROMET-ITEP	-8° 21' 50,0"	-36° 33' 59,0"	49
116	Altinho	39	HIDROMET-ITEP	-8° 29' 26,2"	-36° 03' 34,9"	37
117	Chã Grande	39	HIDROMET-ITEP	-8° 14' 31,9"	-35° 27' 33,1"	15

Código	Nome (Conclusão)	SB	Entidade	Latitude^(*)	Longitude^(*)	Série (anos)
119	Ibirajuba	39	HIDROMET-ITEP	-8° 34' 58,1"	-36° 10' 40,1"	39
121	Panelas	39	HIDROMET-ITEP	-8° 39' 47,9"	-36° 00' 28,1"	64
122	São Caetano	39	HIDROMET-ITEP	-8° 19' 41,9"	-36° 08' 15,0"	57
123	São Joaquim do Monte	39	HIDROMET-ITEP	-8° 25' 58,1"	-35° 48' 47,9"	37
125	Cachoeirinha	39	HIDROMET-ITEP	-8° 28' 50,2"	-36° 14' 13,9"	40
126	Jurema	39	HIDROMET-ITEP	-8° 43' 05,2"	-36° 08' 12,8"	42
128	Lajedo	39	HIDROMET-ITEP	-8° 39' 20,2"	-36° 19' 04,1"	42
140	Alagoinha	49	HIDROMET-ITEP	-8° 27' 58,0"	-36° 46' 26,0"	45
153	Saloá	49	HIDROMET-ITEP	-8° 58' 09,8"	-36° 41' 30,1"	44
154	Paranatama	49	HIDROMET-ITEP	-8° 55' 09,1"	-36° 39' 29,9"	41
157	Jucati	39	HIDROMET-ITEP	-8° 42' 24,1"	-36° 29' 34,1"	43
188	São Benedito do Sul	39	HIDROMET-ITEP	-8° 40' 08,0"	-35° 56' 20,0"	18
200	Quipapá	39	HIDROMET-ITEP	-8° 49' 39,0"	-36° 00' 45,0"	30
208	Pedra (São Pedro do Cordeiro)	49	HIDROMET-ITEP	-8° 51' 45,0"	-36° 56' 34,1"	43
214	Canhotinho (Paquevira)	39	HIDROMET-ITEP	-8° 52' 59,9"	-36° 06' 49,0"	28
221	Pesqueira (Lagoa do Felix)	39	HIDROMET-ITEP	-8° 12' 41,0"	-36° 36' 25,9"	27
223	Belo Jardim (Serra do Vento)	39	HIDROMET-ITEP	-8° 13' 34,0"	-36° 21' 43,9"	43
237	Tacaimbó	39	HIDROMET-ITEP	-8° 18' 47,9"	-36° 17' 34,1"	35
282	Camocim de São Felix	39	HIDROMET-ITEP	-8° 19' 03,0"	-35° 44' 30,1"	15
284	Catende (Usina Catende)	39	HIDROMET-ITEP	-8° 40' 00,1"	-35° 34' 59,9"	26
286	Caetés	39	HIDROMET-ITEP	-8° 46' 22,1"	-36° 37' 16,0"	35
316	Maraial	39	HIDROMET-ITEP	-8° 48' 00,0"	-35° 49' 59,9"	29
326	Garanhuns	39	HIDROMET-ITEP	-8° 51' 00,0"	-36° 28' 00,1"	36
366	Riacho das Almas (Barriguda)	39	HIDROMET-ITEP	-8° 05' 60,0"	-35° 52' 00,1"	28
371	Brejo Madre de Deus (Mandacaia)	39	HIDROMET-ITEP	-8° 05' 60,0"	-36° 16' 59,9"	30
386	São Bento do Una	39	HIDROMET-ITEP	-8° 31' 00,1"	-36° 22' 00,1"	67
389	Caruaru (Carapotos)	39	HIDROMET-ITEP	-8° 07' 59,9"	-36° 04' 00,1"	29
393	Gameleira	39	HIDROMET-ITEP	-8° 34' 54,1"	-35° 23' 16,1"	40
403	Quipapa	39	HIDROMET-ITEP	-8° 49' 59,9"	-36° 02' 60,0"	26
412	Caruaru	39	HIDROMET-ITEP	-8° 16' 59,9"	-35° 58' 58,1"	48
423	Pedra (Tará)	49	HIDROMET-ITEP	-8° 43' 59,9"	-36° 52' 00,1"	54
435	Pesqueira (Salobro)	39	HIDROMET-ITEP	-8° 37' 00,1"	-36° 42' 00,0"	32
444	Gameleira	39	HIDROMET-ITEP	-8° 33' 00,0"	-35° 22' 00,1"	20
461	Garanhuns	39	HIDROMET-ITEP	-8° 52' 00,1"	-36° 28' 59,9"	28
510	Tamandaré	39	HIDROMET-ITEP	-8° 45' 56,2"	-35° 18' 51,1"	23
511	Xexeu	39	HIDROMET-ITEP	-8° 50' 17,9"	-35° 38' 04,9"	30

^(*) Coordenadas geográficas com Datum horizontal WGS84.

Tabela 7 – PCDs da HIDROMET-ITEP utilizadas no estudo

Código	Nome	Sub-bacia	Entidade	Latitude^(*)	Longitude^(*)
314	Barreiros – PCD	39	HIDROMET-ITEP	-8° 49' 25,0"	-35° 11' 37,0"
376	Palmares – PCD	39	HIDROMET-ITEP	-8° 39' 51,8"	-35° 34' 07,0"
486	São Bento do Una – PCD	39	HIDROMET-ITEP	-8° 31' 41,2"	-36° 27' 36,0"

^(*) Coordenadas geográficas com Datum horizontal WGS84.

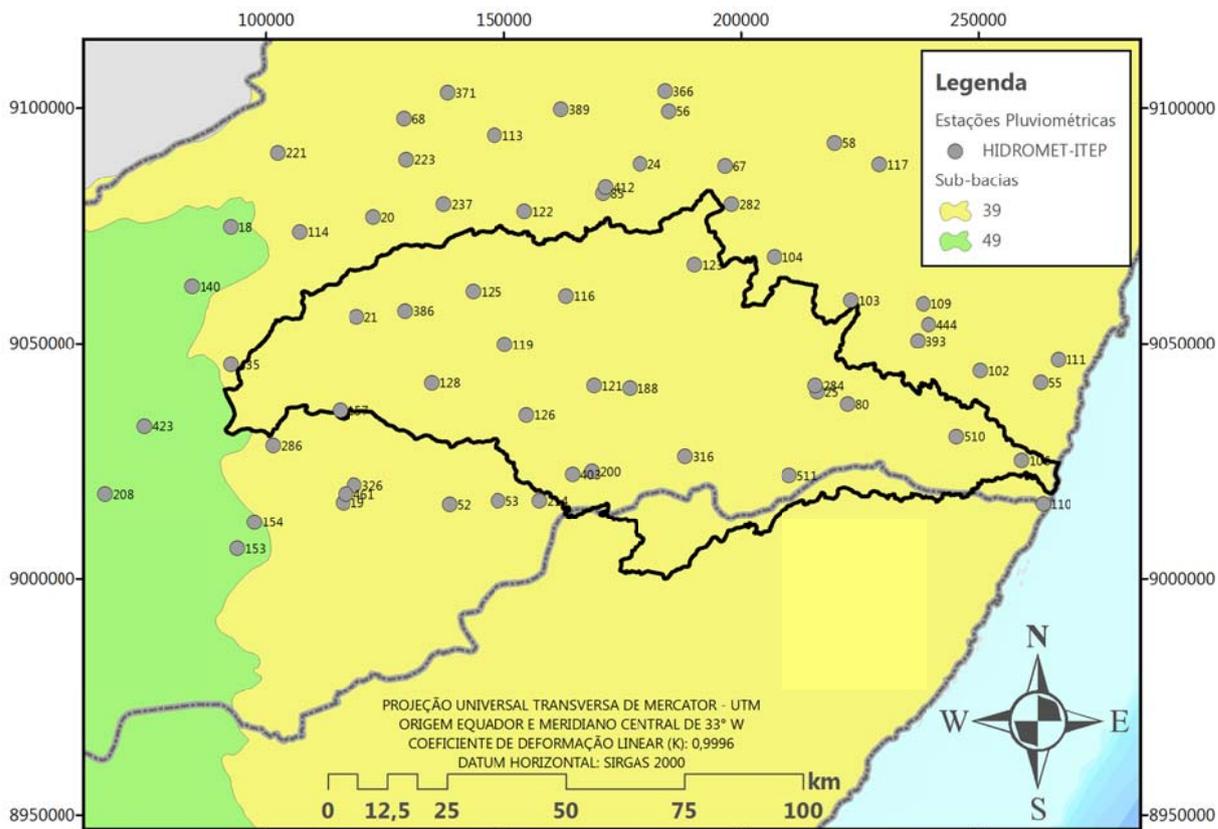


Figura 36 – Localização das estações pluviométricas da HIDROMET-ITEP.

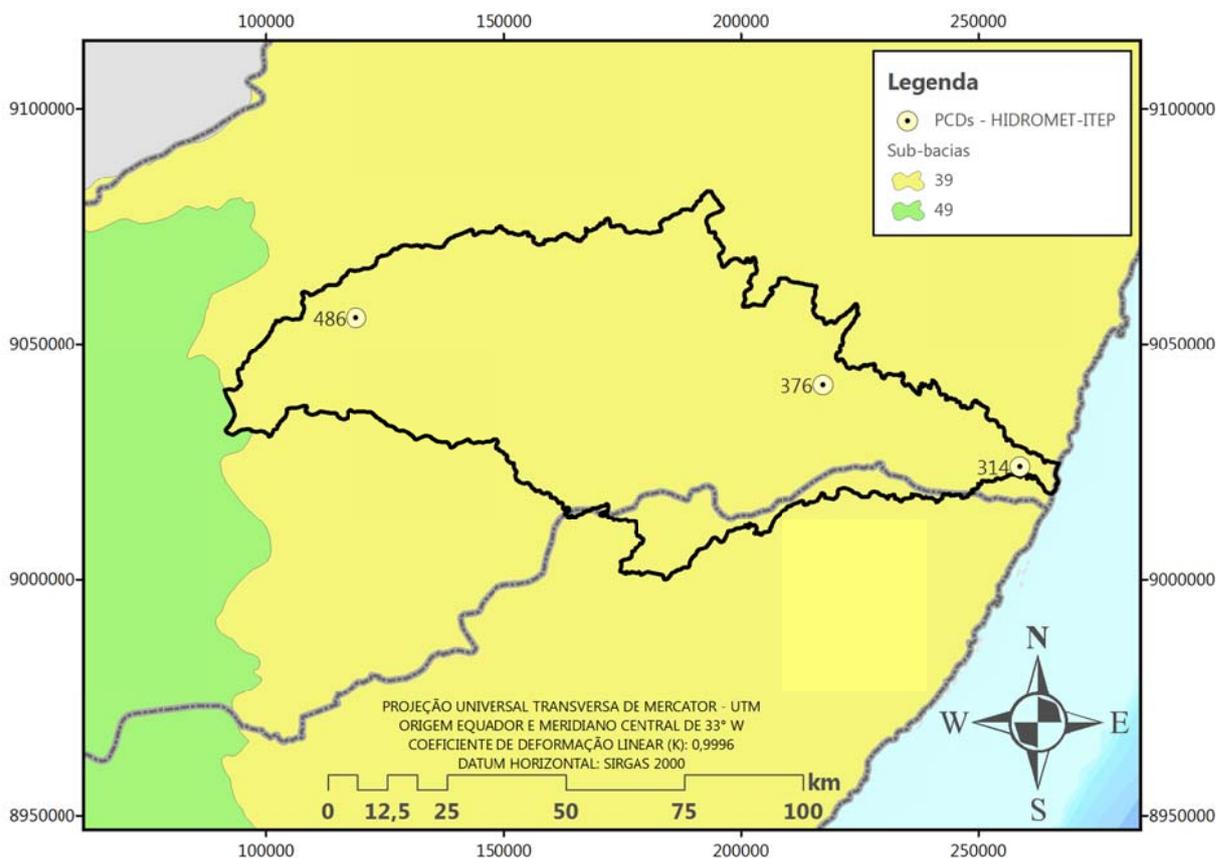


Figura 37 – Localização das estações PCDs da HIDROMET-ITEP.

3.2.2.3. SÉRIE HISTÓRICA DA REDE HIDROMETEOROLÓGICA NACIONAL

Foram selecionadas séries de estações pluviométricas com no mínimo 15 anos de dados. A Tabela 8 apresenta uma listagem das 5 estações selecionadas da *Rede Hidrometeorológica Nacional* de responsabilidade da ANA e operadas pela CPRM, com séries até o ano de 2011, e sua configuração espacial pode ser vista na Figura 38. Da mesma forma, também foi feita uma análise preliminar e de consistência das séries de precipitação.

Também da ANA-CPRM foram utilizadas séries de vazões médias diárias de 6 estações fluviométricas listadas na Tabela 9 e dispostas na Figura 39 obtidas a partir da média diária das cotas das leituras de 7:00h e 17:00h nas régua linimétricas destas estações aplicadas a suas curvas-chave, sendo necessária a análise destas curvas-chave, que foram atualizadas e estendidas as suas validades de até o ano de 2008 para Palmares (39560000), 2009 para Catende (39550000), 2010 para Capivara (39540000) e 2011 para as demais estações.

Tabela 8 – Estações pluviométricas da ANA-CPRM utilizadas no estudo

Código	Nome	SB	Entidade	Latitude ^(*)	Longitude ^(*)	Série (anos)
00835106	Caruaru	39	ANA-CPRM	-8° 17' 57,1"	-36° 00' 10,1"	32
00835140	Engenho Mato Grosso	39	ANA-CPRM	-8° 38' 15,0"	-35° 18' 20,2"	23
00835141	Palmares	39	ANA-CPRM	-8° 40' 45,8"	-35° 34' 37,9"	21
00836043	Sanharó	39	ANA-CPRM	-8° 21' 56,2"	-36° 33' 37,1"	48
00836092	Brejo da Madre de Deus	39	ANA-CPRM	-8° 08' 44,2"	-36° 22' 13,1"	26

^(*) Coordenadas geográficas com Datum horizontal WGS84.

Tabela 9 – Estações fluviométricas da ANA-CPRM utilizadas no estudo

Código	Nome	Rio	Área de drenagem (km ²)	Latitude ^(*)	Longitude ^(*)	Série (anos)
39530000	Cachoeirinha	Una	1.210	-8° 29' 02,0"	-36° 13' 59,2"	9
39540000	Capivara	Una	2.610	-8° 29' 51,0"	-35° 54' 55,1"	34
39550000	Catende	Piranji	718	-8° 40' 43,0"	-35° 43' 23,9"	10
39560000	Palmares	Una	4.910	-8° 40' 45,8"	-35° 34' 36,8"	42
39580000	Jacuípe	Jacuípe	756	-8° 50' 28,0"	-35° 26' 48,8"	12
39590000	Barreiros	Una	6.550	-8° 47' 57,1"	-35° 12' 18,0"	9

^(*) Coordenadas geográficas com Datum horizontal WGS84.

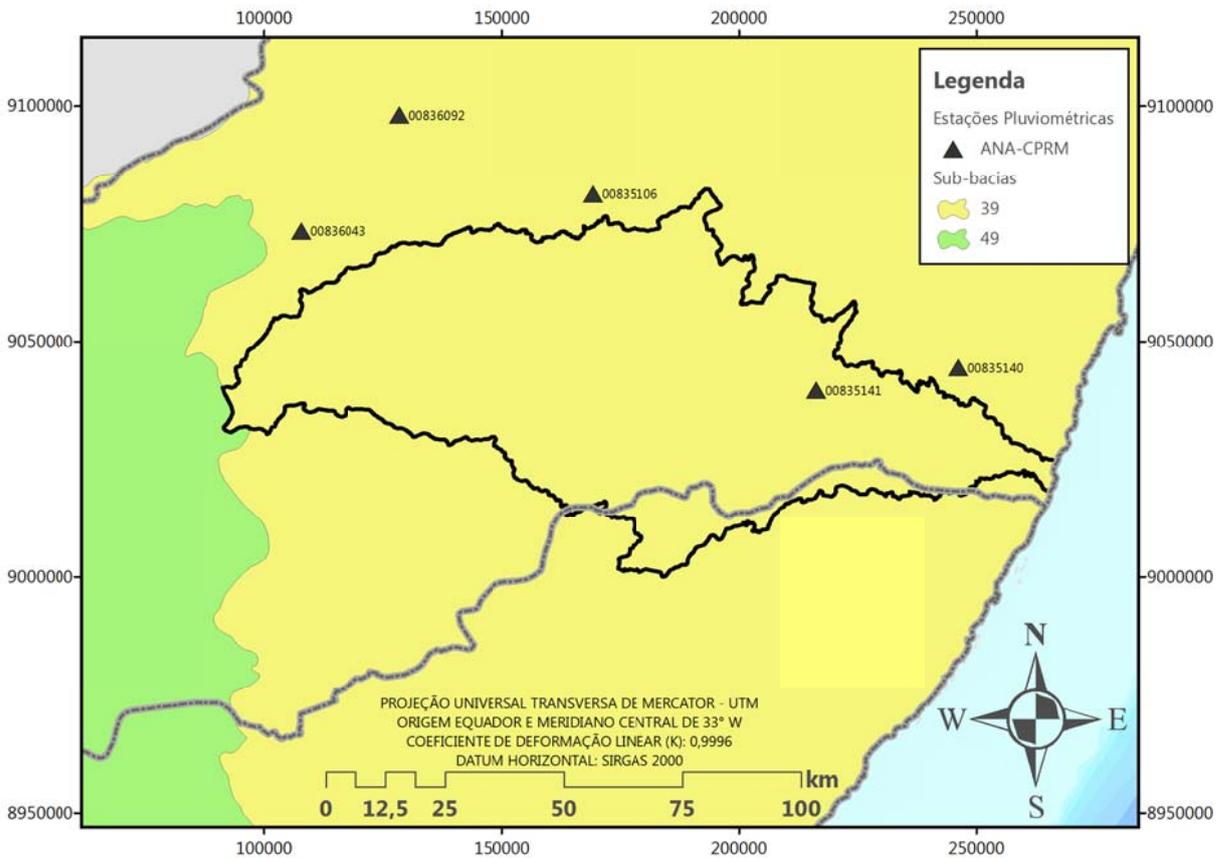


Figura 38 – Localização das estações pluviométricas da ANA-CPRM.

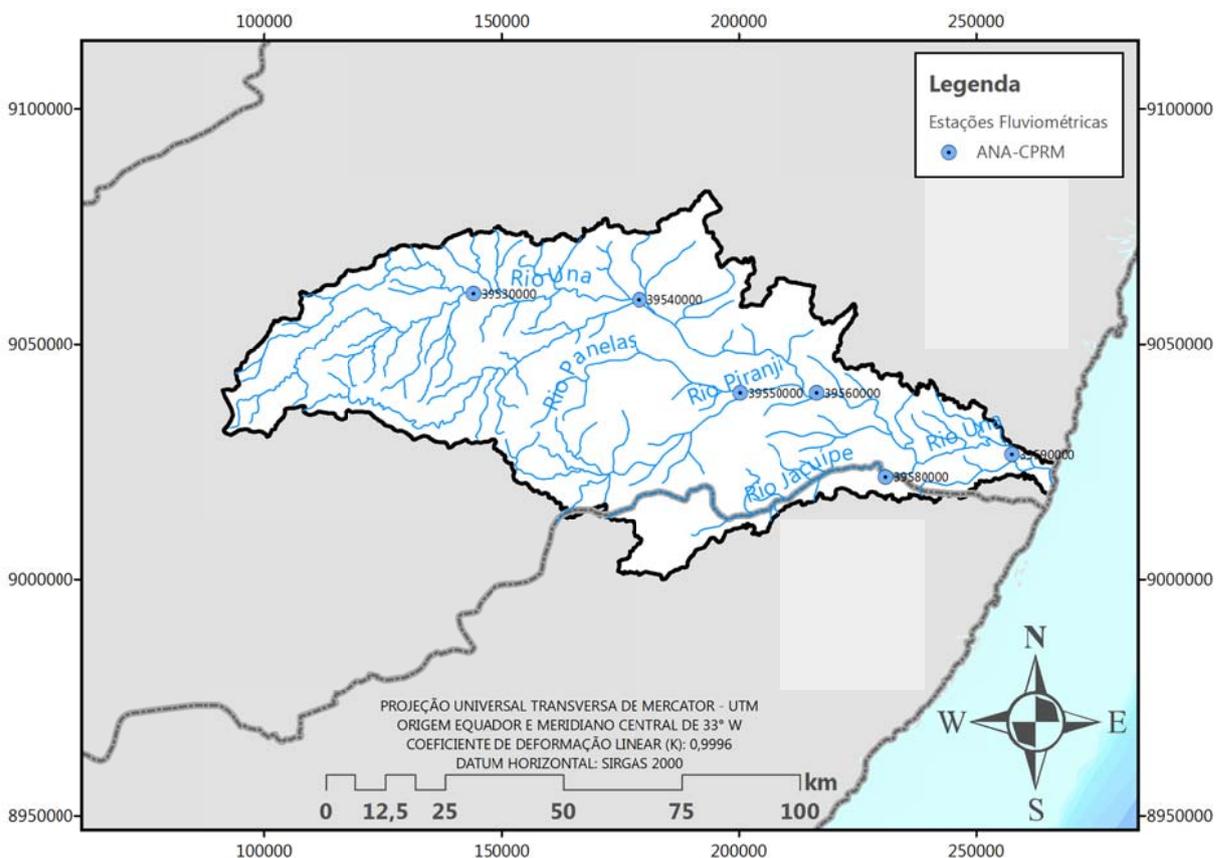


Figura 39 – Localização das estações fluviométricas da ANA-CPRM.

3.2.2.4. SÉRIE SINTÉTICA DE MARÉS SIMULADAS

A *Série Sintética de Marés Simuladas* utilizada no sistema de simulação hidrológico-hidrodinâmica da bacia do rio Una foi obtida com o método de *Análise Harmônica de Registros Maregráficos* descrito em Franco (1988 [27], 1997 [28]).

Segundo HIDROGRÁFICO (2012) [35], **Análise Harmônica de Registros Maregráficos** consiste em um processo matemático através do qual a maré observada num dado local é separada em constituintes harmônicas simples, com a finalidade de determinar as constantes harmônicas H (amplitude) e g (ângulo de fase), das diferentes constituintes harmônicas da maré, a partir da série de alturas de água registadas de um maregrama.

Ainda de acordo com HIDROGRÁFICO (2012) [35], os movimentos relativos da Terra, Lua e Sol provocam um número elevado de forças periódicas geradoras de maré. As variações da altura de água associadas podem ser representadas pela soma de um número finito de termos harmônicos (cossenos) aos quais se dá o nome de constituintes harmônicas da maré. O período de cada constituinte é determinado a partir de estudos astronômicos. Porém, a amplitude e a fase da resposta da maré a cada constituinte é impossível de determinar através das forças geradoras. Chamam-se constantes harmônicas (CHs) aos pares de valores (amplitude, fase) de cada constituinte. As CHs não dependem do tempo, sendo típicas de cada lugar, constituem a base fundamental para a caracterização da maré num dado local, e também, para a boa qualidade das previsões. Na prática, as CHs são calculadas como sendo os parâmetros da seguinte fórmula harmônica que melhor se ajustam às séries temporais:

$$h(t) = A_0 + \sum_i^n f_i H_i \cos[w_i t + (V_0 + u)_i - g_i] \quad (3.1)$$

onde, $h(t)$ é a altura de água no instante t , w é a velocidade angular da onda constituinte, $(V_0 + u)$ é o seu argumento inicial, isto é, o argumento inicial é o argumento na maré de equilíbrio para o instante inicial da série de dados, g é a fase ou ângulo de defasagem ou atraso, isto é, a fase de uma constituinte harmônica de

maré é o atraso em relação à chamada maré de equilíbrio, i representa cada uma das n CHs envolvidas na descrição da maré, e A_0 é o nível médio na localidade. A importância da aplicação da fórmula harmônica deve-se à sua universalidade, ou seja, serve para qualquer tipo de maré.

O Hidrógrafo Vice-Almirante Alberto dos Santos Franco escreveu um pacote de programas para análise de marés, baseados na FFT (do inglês "Fast Fourier Transform") com embasamento teórico explicado em Franco (1988 [27], 1997 [28]), em linguagem Turbo Basic, para DOS (do inglês "*Disk Operating System*"), que foi denominado PAC, sendo, mais tarde, convertidos para Visual Basic, e a nova versão foi denominada PAC2000 (FRANCO, 2000) [29], contendo os seguintes programas:

- ANHACOR: análise de correntes de maré;
- ANHAMA: análise harmônica de elevações de maré;
- ANHAREF: análise harmônica refinada de registros de maré com duração média;
- LONGSERIE: análise de séries longas;
- ANACRUZ: análise espectral cruzada *nível x nível* ou *nível x corrente*;
- EXTREMOS: avaliação dos níveis extremos resultado de marés e ruído;
- NIMED: estudo de variações do Nível Médio do Mar (NMM);
- PREVISÃO: previsão de marés e correntes;
- HARM: edição de constantes harmônicas de marés e correntes para previsão;
- VERALT: verificação de registros de maré pelo método de Karunaratne;
- AGRASA: geração de uma tabela de componentes de água rasa e suas satélites.

O programa PREVISÃO, do pacote PAC2000 (FRANCO, 2000) [29], permite a previsão de alturas horárias da maré com qualquer período de tempo em blocos de um mês. Para tal, fazem-se necessárias as constantes harmônicas do local de interesse da previsão, sendo então, obtidas através do Catálogo de Estações Maregráficas Brasileiras (SALLES; BENTES; SANTOS, 2000) [73] da *Fundação de Estudos do Mar* (FEMAR), as CHs para a estação Tamandaré em Pernambuco (Figura 40), local mais próximo à Foz do rio Una com CHs disponíveis, para a geração da *Série Sintética de Marés Simuladas* utilizada na modelagem.

FEMAR-FUNDAÇÃO DE ESTUDOS DO MAR <i>Catálogo de Estações Maregráficas Brasileiras</i>					
Nome da Estação :		TAMANDARÉ – PE			
Localização :		No trapiche da Escola de Pesca			
Organ. Responsável :		DHN			
Latitude :		08° 45,6' S	Longitude :		35° 06,0' W
Período Analisado :		18/03/61 a 18/04/61	Nº de Componentes :		36
Análise Harmônica :		Método Tidal Liverpool Institute			
Classificação :		Maré Semidiurna			
Estabelecimento do Porto: (HWF&C)		IV H 54 min	Nível Médio (Zo):		124 cm acima do NR.
Médias das Preamares de Sизία (MHWS) :		226 cm acima do NR.	Média das Preamares de Quadratura (MHWN) :		171 cm acima do NR.
Média das Baixa-mares de Sизία (MLWS) :		22 cm acima do NR.	Média das Baixa-mares de Quadratura (MLWN) :		77 cm acima do NR.
CONSTANTES HARMÔNICAS SELECIONADAS					
Componentes	Semi-amplitude (H) cm	Fase (g) graus (°)	Componentes	Semi-amplitude (H) cm	Fase (g) graus (°)
Sa	-	-	MU ₂	2,8	199
Ssa	-	-	N ₂	14,3	164
Mm	4,7	194	NU ₂	2,8	164
Mf	-	-	M ₂	74,8	123
MTM	-	-	L ₂	8,7	038
Msf	0,9	303	T ₂	1,6	128
Q ₁	1,8	229	S ₂	27,6	128
O ₁	6,0	150	K ₂	7,5	128
M ₁	1,1	303	MO ₃	0,1	212
P ₁	1,7	213	M ₃	0,6	139
K ₁	5,1	213	MK ₃	0,6	097
J ₁	0,5	197	MN ₄	0,6	207
OO ₁	0,3	58	M ₄	1,7	171
MNS ₂	-	-	SN ₄	0,5	207
2N ₂	1,9	204	MS ₄	0,6	129
Referências de Nível: RN-1 instalada no Farol					
Obs: Não há referências a outros períodos.					
Código BNDO: 30680					

Figura 40 – Constantes Harmônicas para a estação Tamandaré em Pernambuco.
Fonte: Salles, Bentes e Santos (2000) [73].

3.2.3. DADOS FISIAGRÁFICOS

3.2.3.1. MAPEAMENTO DIGITAL A LASER E ORTOFOTOS DIGITAIS

3.2.3.1.1. O LiDAR

LiDAR (do inglês "*Light Detection and Ranging*") é um termo que tem sido utilizado para designar esta nova tecnologia de **sensoriamento remoto**, também conhecida como LaDAR (do inglês "*Laser Detection and Ranging*"), porém com mais frequência, em aplicações militares. Em português vem sendo utilizada a terminologia de *Sistema de Varredura a Laser* ou de *Perfilamento a Laser* (GIONGO et al., 2010) [31].

Schawlow e Townes (1958 apud GIONGO et al., 2010) [31], pela primeira vez, estabeleceram a teoria para obter a amplificação de luz por emissão estimulada de radiação (laser) com base nos fundamentos estabelecidos por Einstein em 1917.

Nas décadas de 1960 e 1970, várias experiências demonstraram o poder de utilização do laser em sensoriamento remoto, incluindo diversas aplicações, como monitoramento atmosférico e estudos oceanográficos. Durante a década de 1980, o laser passou a ser utilizado na medição de distâncias, sendo implementados instrumentos como o AOL (do inglês "*Atmospheric Oceanographic Lidar*") da NASA e ATM (do inglês "*Airborne Topographic Mapper*"). Mais recentemente, na década de 1990, foram desenvolvidos sensores mais confiáveis, como o SLA (do inglês "*Shuttle Laser Altimeter*") e o MOLA (do inglês "*Mars Observer Laser Altimeter*") usados para medidas em extensas áreas da superfície terrestre e dos oceanos (GIONGO et al., 2010) [31]. Atualmente, dispõe-se de uma grande quantidade de *laser altimétricos aerotransportados*, facilitando o desenvolvimento de instrumentos e de técnicas de processamento de dados, como fontes de novas aplicações científicas. Como exemplos, estes sistemas incluem o ATLAS (do inglês "*Airborne Topographic Laser Altimeter System*") e o SLICER (do inglês "*Scanning Lidar Imager of Canopy by Echo Recovery*").

Apesar de o laser não ser uma tecnologia nova, sua utilização na aquisição de dados geográficos é relativamente recente. Seu uso em sistemas LiDAR vem demonstrando uma excelente capacidade para a aquisição de uma grande quantidade de informações, em pequeno intervalo de tempo.

A tecnologia LiDAR é baseada nos mesmos princípios utilizados no sistema de RADAR, com a diferença de que, ao invés do uso de ondas de rádio para localizar os objetos de interesse, o sistema LiDAR utiliza pulsos laser. A tecnologia LiDAR foi inicialmente prevista para a utilização em levantamento de dados para a elaboração de MDEs, em que os métodos tradicionais não eram suficientes, principalmente em áreas de difícil acesso (GIONGO et al., 2010) [31].

O LiDAR vem demonstrando grande potencial em diversas áreas de aplicação, tais como: planejamento costeiro, avaliação de risco de inundações, telecomunicações e redes de transmissão de energia, florestas, agricultura, petróleo, transportes, planejamento urbano, mineração, entre outros.

3.2.3.1.1.1. PRINCÍPIOS E COMPONENTES DE FUNCIONAMENTO DO LiDAR

Segundo Giongo et al. (2010) [31], o princípio de funcionamento do sistema de varredura laser consiste na emissão de um pulso laser de uma plataforma (aérea, terrestre ou orbital) com uma elevada frequência de repetição. O tempo de retorno dos pulsos laser ("*Time of Flight*") entre a plataforma e os alvos é medido pelo sensor, permitindo a estimativa destas distâncias.

Os sistemas *Laser Scanner Aerotransportados* (em inglês "*Airborne Laser Scanning*" – ALS), com tecnologia LiDAR, são compostos por um sensor laser que essencialmente registra o tempo entre o sinal emitido e recebido de um determinado ponto, um *Sistema Inercial de Navegação* (do inglês "*Inertial Navigation System*" – INS) e um receptor GPS em uma plataforma aerotransportada. Em terra, é necessária uma rede de GPS que trabalhe de forma conjunta ao GPS instalado na plataforma (Figura 41).

Desta forma, o princípio de funcionamento está baseado na emissão de um feixe laser infravermelho em direção à superfície terrestre. Na superfície, estes feixes são refletidos por obstáculos (construções, vegetação ou o próprio terreno) e são captados pelo sensor. Para cada feixe emitido é registrado o tempo de percurso aeronave – obstáculo – aeronave e o ângulo do espelho de varredura correspondente ao instante da emissão do pulso. A atitude, definida pelos movimentos de asa, nariz e deriva da aeronave, é constantemente registrada pelo INS, e o posicionamento da aeronave é obtido pelo GPS através do método de posicionamento cinemático relativo pós-processado com a utilização de uma ou mais estações base no solo. Com essas informações, associadas à atitude e posição relativa da aeronave, são determinadas coordenadas tridimensionais dos objetos na superfície.

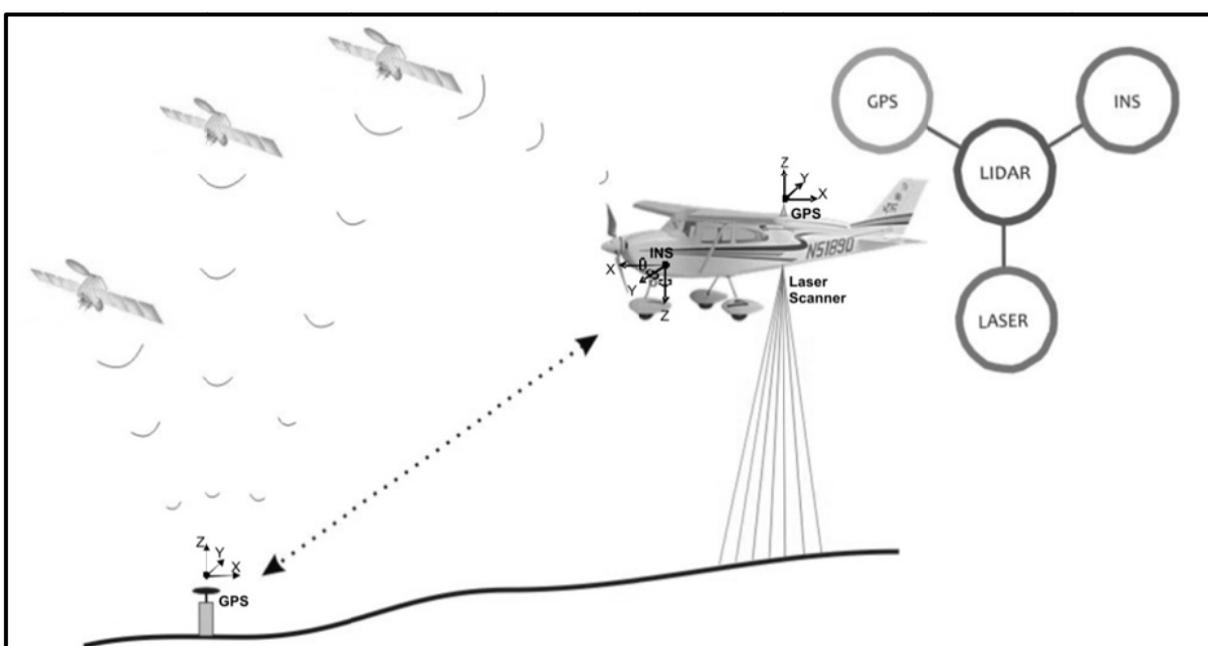


Figura 41 – Princípios e componentes de um sistema ALS.

Fonte: Giongo et al. (2010) [31].

O sistema LiDAR apresenta sua própria fonte de energia, neste caso, uma fonte de luz, o laser, a qual emite radiação eletromagnética em ondas de comprimento na faixa de 1-10 μm , sendo sensível às perturbações atmosféricas e, assim, é considerado um método direto na captura de dados e classificado como um sensor ativo (GIONGO et al., 2010) [31].

De acordo com Giongo et al. (2010) [31], uma vantagem dos sensores de varredura a laser em relação aos clássicos sensores passivos (fotografias aéreas e imagens de satélite) é que os scanners a laser não dependem do sol como uma fonte de iluminação. Sendo assim, a análise dos dados não é prejudicada por sombras causadas por nuvens ou objetos vizinhos. Outra característica importante deste sensor é que os pulsos de laser podem penetrar por pequenas aberturas no dossel da floresta e fornecer informações sobre a estrutura florestal e também sobre o relevo destas áreas.

3.2.3.1.1.1.1. SENSOR LASER

Os primeiros sistemas ALS, para Giongo et al. (2010) [31], foram desenvolvidos em um sistema de pulsos (do inglês "*discrete echo*"), o qual registra o intervalo para o primeiro ou o último retorno dos pulsos. A evolução dos sistemas permitiu o armazenamento simultâneo de ambos os ecos e alguns sistemas mais avançados permitem determinar o retorno dos pulsos intermediários (Figura 42b). Nos últimos anos, uma nova geração de sistemas ALS foi desenvolvida, conhecida como sistema de ondas contínuas (do inglês "*full-waveform*"), sendo capazes de registrar integralmente todo o sinal do pulso (Figura 42a).

O sistema receptor do sinal laser recebe um sinal analógico de retorno e, por meio de um conversor analógico/digital, transforma o sinal analógico em digital, sendo que o sinal digital da radiação refletida passa por um filtro de suavização que verifica se o sinal recebido possui a mesma intensidade do sinal emitido.

Outro parâmetro que define o funcionamento do sensor é o mecanismo utilizado no conjunto ótico do sistema. Após o pulso ser gerado, ele é dirigido para o espelho de varredura. Um conjunto ótico de lentes e espelhos orienta os pulsos laser originados do gerador de pulsos, emitindo-os para os objetos no terreno e sequencialmente recebendo os sinais de retorno e direcionando-os para o receptor.

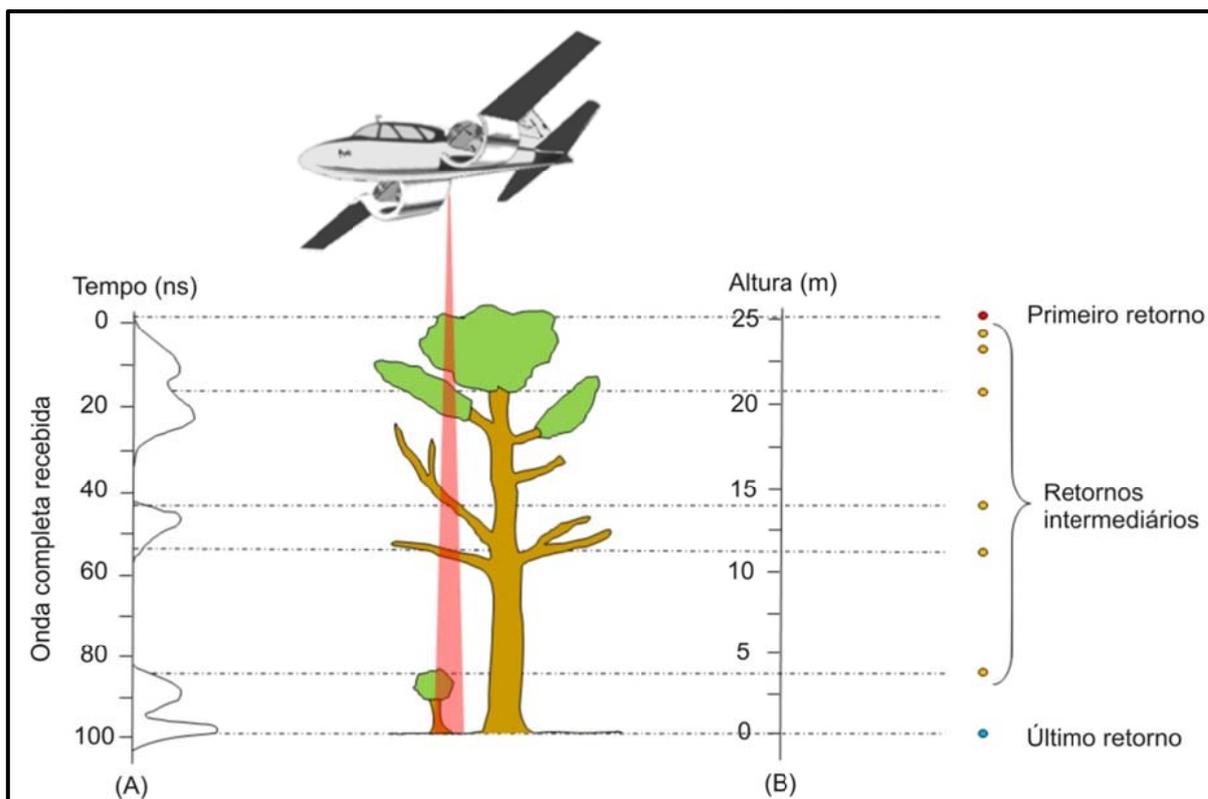


Figura 42 – Característica dos diferentes sistemas ALS.

(a) Sistema de ondas contínuas (*full-waveform*).

(b) Sistema de pulsos (*discrete echo*).

Fonte: Giongo et al. (2010) [31].

3.2.3.1.1.1.2. SISTEMA DE NAVEGAÇÃO INERCIAL

Um *Sistema de Navegação Inercial* utiliza uma *Unidade de Medição Inercial* que contém *Arranjos de Sensores Inerciais* (do inglês "*Inertial Sensors Array*" – ISA). Estes arranjos devem conter conjuntos de acelerômetros para a medição de força específica e conjuntos de giroscópios para detecção de movimentos de rotação. A IMU é constituída por uma série de acelerômetros e giroscópios, com um circuito de digitalização e uma unidade de cálculo. Por meio de integradores, as acelerações e os parâmetros angulares no sistema de navegação inercial produzem a posição, a velocidade e a orientação da IMU, ou seja, os giroscópios mantêm os acelerômetros em posição horizontal com o terreno, fornecendo a orientação azimutal, enquanto os acelerômetros colocados na plataforma fornecem as componentes específicas da aceleração (GIONGO et al., 2010) [31].

Os integradores recebem as indicações dos acelerômetros e fornecem a velocidade e a distância. A instalação rigorosa de um sistema IMU num sensor remoto produz a posição, a velocidade e a orientação do próprio sensor e para assegurar uma boa exatidão, o IMU deve ser pequeno e o mais leve possível, de modo a poder ser instalado o mais perto possível do sensor (MOSTAFA; HUTTON, 2001 apud GIONGO et al., 2010) [31].

3.2.3.1.1.1.3. SISTEMA DE POSICIONAMENTO GLOBAL

O objetivo do GPS é a determinação da posição da plataforma aerotransportada. Para alcançar **maiores precisões**, utiliza-se na plataforma um receptor de GPS de dupla frequência (L1 e L2), e na terra se estabelece uma rede de estações GPS que realizam observações simultâneas (Figura 41).

Nas observações obtidas pelo GPS da plataforma são aplicados métodos de correções diferenciais de posicionamento que consistem de correção baseada em estações de referência geradas a partir de observações da fase do código, da portadora, ou do código suavizado pela portadora. A aplicação desta técnica com a observação da fase da portadora é capaz de gerar resultados com elevada exatidão; entretanto, as correções tornam-se menos efetivas à medida que se aumenta a distância entre a estação móvel e a de referência, degradando progressivamente a qualidade do posicionamento (RAMOS et al., 2007) [69].

Assim, uma alternativa é o pós-processamento dos dados com base nas observações obtidas das bases instaladas em terra. Entretanto, é recomendado que as bases utilizadas apresentem uma distância máxima de 20 km em relação à área sobrevoada.

Apesar da distância da base ser um fator muito importante, outras condições são necessárias para a obtenção de uma elevada exatidão dos pontos levantados com o uso dos sistemas ALS, como, por exemplo, a presença de, no mínimo, cinco satélites e um PDOP (do inglês "*Position Dilution of Precision*") inferior a quatro (GUTIERREZ et

al., 2001 apud GIONGO et al., 2010) [31], ou seja, quanto melhor distribuídos espacialmente apresentam-se os satélites em órbita da Terra, menor será o PDOP, o que significa maior precisão.

3.2.3.1.2. MAPEAMENTO DIGITAL A LASER E ORTOFOTOS DIGITAIS EM ÁREA DE 1.235KM² NO ESTADO DE PERNAMBUCO

O *Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento* (LACTEC), de Curitiba-PR, foi contratado para realizar o mapeamento digital a laser de importantes rios e dez municípios atingidos pelas inundações, ocorridas em junho de 2010, e em situação de calamidade, no Estado de Pernambuco.

Segundo o LACTEC (2010) [43], o modelo digital do LiDAR pode ser o ponto de partida para diversas intervenções estruturais e não estruturais, no sentido de minimizar os prejuízos em casos de novos episódios de chuvas intensas e enchentes de grandes proporções. A partir deste material é possível definir as intervenções desejadas de reconstrução e delimitação de áreas impedidas para edificações. O levantamento ao longo da calha dos rios vem fornecendo os dados espaciais necessários à definição das cotas de segurança à inundação, também nas cidades atingidas, com diferentes margens de risco. O MDT LiDAR está também servindo de base para a reconstrução das cidades atingidas pelas enchentes.

O resultado deste levantamento é o *"Mapeamento Digital a Laser e Ortofotos Digitais em Área de 1.235 km² no Estado de Pernambuco"*, detalhado em LACTEC (2011) [44], realizado através da aquisição de dados LiDAR, e de imagens aéreas digitais, gerando produtos cartográficos de alta precisão, totalizando, aproximadamente, 1.452 km², sendo 1.341 km² para as áreas no entorno dos rios numa faixa de 850 m de cada lado, com extrapolação em alguns trechos de interesse da SRHE-PE. A escala cartográfica foi 1:5.000, para os estirões dos rios, sendo que, para 111 km² que cobrem as áreas das cidades mais atingidas, a escala cartográfica do levantamento foi 1:2.000, com Datum horizontal SIRGAS2000 e Datum vertical

Imbituba (Santa Catarina). Os rios mapeados foram: Una, Panelas, Piranji e Sirinhaém desde a nascente até a foz, e os rios Paraíba, Canhoto e Mundaú mapeados até a divisa estadual com o Estado de Alagoas. E as cidades mapeadas foram: Correntes, São Benedito do Sul, Jaqueira, Palmares, Maraial, Catende, Água Preta, Barreiros, Cortês e Barra de Guabiraba, no Estado de Pernambuco. A Figura 43 mostra a área mapeada pelo LACTEC (2011) [44] na bacia do rio Una, com os rios em azul na escala de 1:5.000 e as cidades em vermelho na escala de 1:2.000.

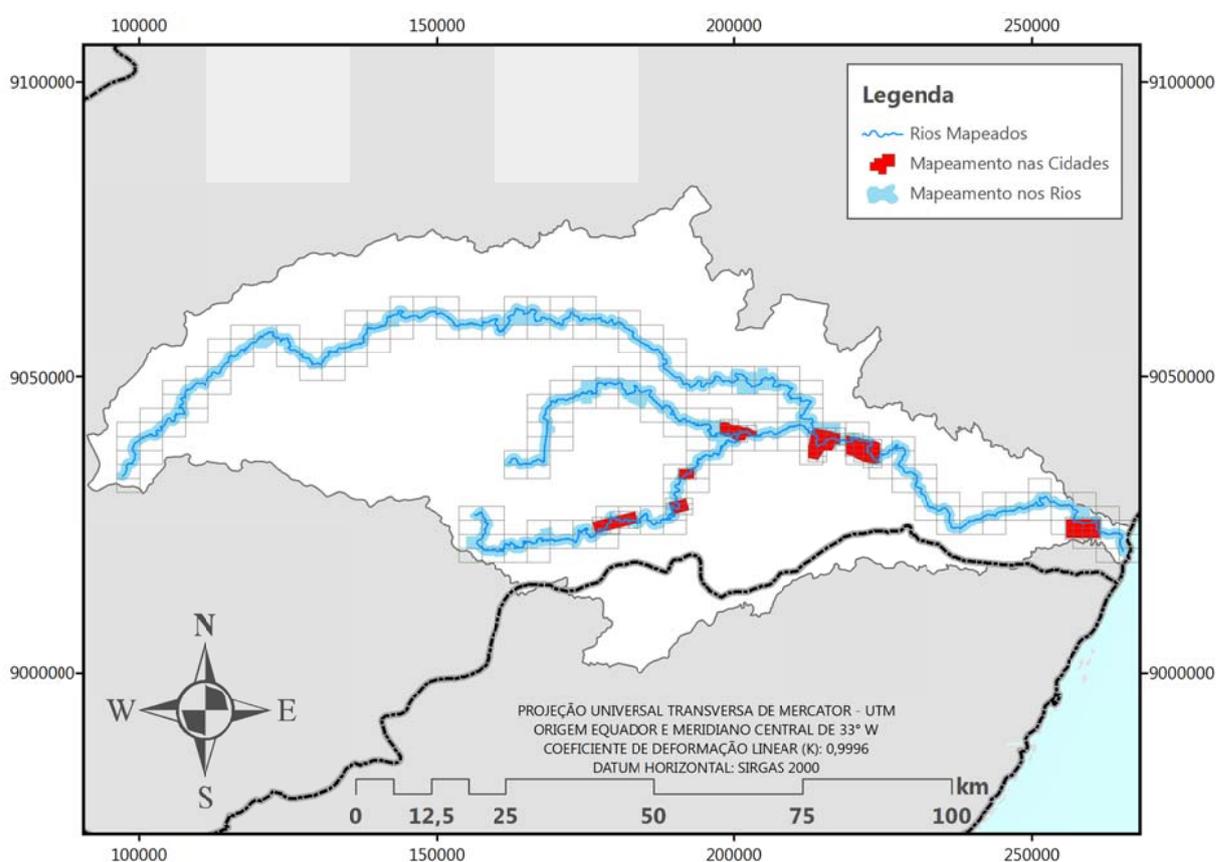


Figura 43 – Área levantada na bacia do rio Una do LACTEC (2011) [44].

O *Padrão de Exatidão Cartográfica* (PEC) foi regulamentado no Decreto nº 89.817 de 20 de Junho de 1984, que estabelece as Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Brasileira através de procedimentos e padrões a serem obedecidos na elaboração e apresentação de documentos cartográficos no território brasileiro (BRASIL, 1984) [5]. O Decreto considera equivalente as expressões *Erro*

Padrão, Desvio-Padrão e Erro Médio Quadrático (EMQ). O **Erro Médio Quadrático** é calculado da seguinte forma:

$$EMQ = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta h_i^2} \quad (3.2)$$

em que Δh_i é a diferença entre o dado de referência para um ponto i , e n é o tamanho da amostra (número de pontos de verificação independentes, também chamados de *pontos de validação*, ou, em inglês, "*Independent Check Points*" – ICPs).

Segundo o Artigo 8 do Decreto nº 89.817, as cartas, quanto à exatidão, devem obedecer ao PEC, segundo os critérios abaixo discriminados:

- Noventa por cento dos pontos bem definidos em uma carta, quando testados no terreno, não deverão apresentar erro superior ao PEC planimétrico estabelecido; e
- Noventa por cento dos pontos isolados de altitude, obtidos por interpolação de curvas de nível, quando testados no terreno, não deverão apresentar erro superior ao PEC altimétrico estabelecido.

O PEC é um indicador estatístico por dispersão, relativo a 90% de probabilidade, que define a exatidão de trabalhos cartográficos. A probabilidade de 90% corresponde a 1,6449 vezes o Erro Padrão ($PEC = 1,6449 \times EP$). O Erro Padrão isolado em um trabalho cartográfico, não pode ultrapassar 60,8% do PEC.

De acordo com o Artigo 9 do Decreto nº 89.817, as cartas, quanto à precisão, são classificadas nas classes A, B e C, de acordo com a Tabela 10.

Tabela 10 – Critérios do PEC

Carta	PEC Planimétrico	Erro Padrão	PEC Altimétrico	Erro Padrão
Classe A	0,5 mm x Escala	0,3 mm x Escala	1/2 x Equidistância	1/3 x Equidistância
Classe B	0,8 mm x Escala	0,5 mm x Escala	3/5 x Equidistância	2/5 x Equidistância
Classe C	1,0 mm x Escala	0,6 mm x Escala	3/4 x Equidistância	1/2 x Equidistância

Fonte: Brasil (1984) [5].

Segundo estudos do LACTEC (2011) [44], foi permitido classificar este mapeamento realizado como Classe A tanto para a planimetria como para a altimetria, onde durante os testes de aceitação, apresentou-se um Desvio-Padrão de 33 cm na planimetria e 10 cm na altimetria na escala de 1:2.000.

A execução do mapeamento do LACTEC (2011) [44] seguiu as seguintes etapas:

- Atividades de apoio de campo, definição e rastreamento das bases GPS;
- Definição do mapa geoidal local e dos pontos de apoio fotogramétricos;
- Aerolevantamento com aquisição de dados LiDAR e de *imagens aéreas digitais*;
- Controle de qualidade e verificação da cobertura dos dados;
- Processamento da trajetória da aeronave;
- Processamento dos dados LiDAR;
- Transformação de referencial;
- Projeção cartográfica;
- Aplicação do modelo geoidal local;
- Classificação da nuvem de pontos;
- Classificação de pontos de terreno;
- Tratamento das imagens digitais;
- Georreferenciamento, ortorretificação e mosaicagem das imagens digitais; e
- Geração dos produtos finais.

O sistema de ALS adotado em LACTEC (2011) [44] é o modelo ALTM 2050 (do inglês "*Airborne Laser Terrain Mapper*") da Optech. Suas especificações técnica são demonstradas na Tabela 11. A câmera utilizada na aquisição das imagens aéreas digitais é uma câmera digital Kodak Professional modelo DCS Pro 14n. Essa câmera tem uma resolução de 13.5 megapixel e é associada ao sistema LiDAR.

Tabela 11 – Especificações do sistema ALS modelo ALTM 2050 da Optech

Descrição do sistema	Características
Modelo do equipamento	ALTM 2050
Fabricante do equipamento	Optech
Ano de fabricação	2002
Frequência do pulso laser	50.000 pulsos por segundo – 50 kHz
Frequência de varredura	Variável de 1 Hz a 100 Hz
Ângulo de varredura	Variável 0° a 40°
Sistema Inercial (IMU) / GPS	Applanix
Capacidade de armazenamento	36 Gigabytes
Software da operação de voo	ALTM-NAV (Optech)
Software do processamento	REALM (Optech)
Tipo de coleta de dados	Primeiro e último retorno do pulso
Densidade de pontos	Variável de 400.000 de 4.000.000
Número de pontos por m ²	Variável de 1 a 4 pontos
Precisões (voo a 1.000 m de altura)	50 cm na planimetria e 15 cm na altimetria
Precisões (voo a 2.000 m de altura)	70 cm na planimetria e 25 cm na altimetria

Fonte: LACTEC (2011) [44].

3.2.3.2. DADOS SRTM

Segundo Valeriano (2004) [89], a SRTM (do inglês "*Shuttle Radar Topography Mission*", ou seja, *Missão de Radar Topográfico em Ônibus Espacial*), um projeto que advém de cooperação entre a NASA (do inglês "*National Aeronautics and Space Administration*"), e a NIMA (do inglês "*National Imagery and Mapping Agency*"), do DoD (do inglês "*U.S. Department of Defense*", ou seja, *Departamento de Defesa dos Estados Unidos*), a NGA (do inglês "*National Geospatial-Intelligence Agency*"), e as agências espaciais: DLR (do alemão "*Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt*", ou seja, *Centro Aeroespacial Alemão*), e ASI (do italiano "*Agenzia Spaziale Italiana*", ou seja, *Agência Espacial Italiana*). A missão usou o mesmo instrumento utilizado em 1994 no programa SIR-C/X-SAR (do inglês "*Spaceborne Imaging Radar-C/X-Band Synthetic Aperture Radar*"), a bordo do ônibus espacial *Endeavour*, porém o arranjo foi projetado para coletar medidas tridimensionais da superfície terrestre através de *interferometria*. A **interferometria** compara duas imagens de radar, sobre um mesmo local, tomadas de pontos diferentes para obter dados de altimetria da superfície. Para tanto, a nave foi munida de um mastro de 60 m, em cuja extremidade foram instaladas antenas para bandas C e X, além de melhorados os dispositivos de controle e navegação (Figura 44). O sobrevoo da SRTM ocorreu no período de 11 a 22 de fevereiro de 2000. A cobertura foi feita em 80% da área terrestre do planeta, entre latitudes 60° N e 56° S (Figura 45). Foram gerados MDEs com células de 1° de latitude por 1° de longitude, resolução de 30 m (a rigor, em coordenadas geográficas, como 1 arco-segundo, ou 1", ou ainda 0,000277°) relativos à banda X, processados no DLR com distribuição pública apenas dos dados da região dos EE.UU., e de 90 m (a rigor, em coordenadas geográficas, como 3 arco-segundos, ou 3", ou ainda 0,000833°) relativos à banda C, processados no JPL (do inglês "*Jet Propulsion Laboratory*") da NASA com distribuição pública de toda a área restante levantada do globo. Os dados estão projetados em *Coordenadas Geográficas* (Lat/Long) com Datum horizontal WGS84 e Datum vertical EGM96 e valores inteiros para altimetria.

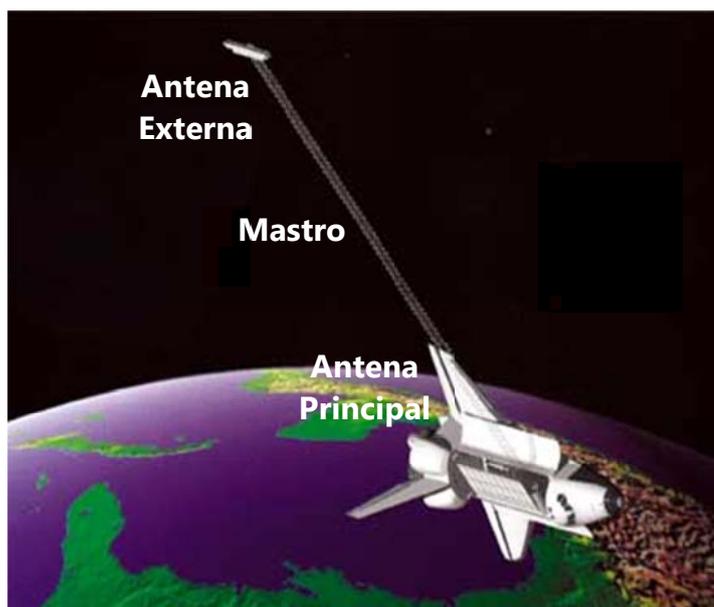


Figura 44 – Configuração das antenas a bordo do Endeavour para a missão SRTM (detalhe para o mastro que permitiu a interferometria na mesma órbita).

Fonte: USGS (2003) [87].

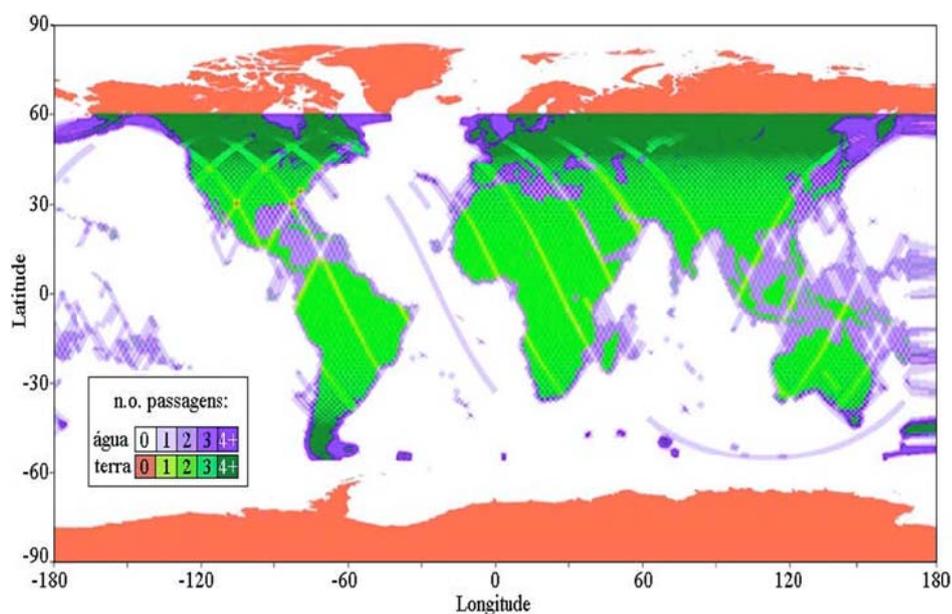


Figura 45 – Distribuição da cobertura e número de passagens da SRTM.

Fonte: Valeriano (2004) [89].

Atualmente estes dados estão disponíveis em sua versão 4.1 de atualizações através do CSI (do inglês "*Consortium for Spatial Information*") do CGIAR (do inglês "*Consultative Group on International Agricultural Research*") disponível em: <<http://srtm.csi.cgiar.org/>>, com acesso em: 31 maio 2012.

3.2.3.2.1. O TOPODATA

Os dados SRTM, na forma em que foram disponibilizados para a América do Sul em meados de 2003, apresentam resolução horizontal (i.e., resolução espacial) de 3 arco-segundos (~90 m) e resolução vertical de 1 m, com acurácia de 16 m com nível um de confiança de 95%, e toda a aquisição dos dados SRTM foi planejada a suprir mapeamentos em escalas entre 1:100.000 e 1:250.000. Embora aplicadas várias operações de pós-tratamento, os dados SRTM ainda apresentavam falhas como: a falta de dados em algumas áreas (buracos), presença de picos (valores extremamente altos) e vórtices (valores extremamente baixos), e má definição dos corpos d'água e das linhas de costa. Com a iniciativa TOPODATA do *Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais* (INPE), conduzida na forma de projeto, lançada pela primeira vez em agosto de 2008, foram gerados e disponibilizados produtos que oferece livre acesso a variáveis geomorfométricas locais derivadas de dados SRTM para todo o território nacional. Estes dados foram refinados da resolução espacial original de 3 arco-segundos (~90 m) para 1 arco-segundo (~30 m) por *krigagem*. Em seguida, foram aplicados algoritmos de análise geomorfométrica sobre os dados refinados para o cálculo das variáveis declividade, orientação de vertentes, curvatura horizontal e curvatura vertical. Além dessas variáveis, uma derivação de segundo grau foi aplicada para evidenciação de talwegues e divisores de água, cujos resultados foram combinados à orientação de vertentes para favorecer a interpretação das feições de drenagem e caracterização de sua estrutura. As variáveis geomorfométricas foram ainda classificadas para a geração de mapas não-numéricos, tais como as classes de declividade consagradas pela pesquisa agrônômica (classes EMBRAPA, por exemplo), as curvaturas em convexo/planar/côncavo, bem como possíveis formas de vertentes, entre outras representações qualitativas (VALERIANO, 2008) [90].

O processamento dos dados foi sucessivamente inspecionado e revisado, com vistas a aprimoramentos e correções, levando a um novo tratamento dos dados desde sua preparação, e detalhes do processamento de derivação geomorfométrica

foram oportunamente melhorados, com produtos disponíveis a partir de maio de 2009. Para possibilitar uma futura expansão do TOPODATA, foi feita uma nova revisão dos produtos e processos, que culminou numa metodologia passível de aplicação onde quer que existam dados SRTM. Os dados atualmente disponíveis desde novembro de 2011 (INPE, 2008) [42].

Em INPE (2008) [42], os dados foram disponibilizados em formatos correspondentes às etapas de processamento dos dados SRTM: preenchimento de falhas, refinamento, derivação e pós-processamento, de acordo com o fluxograma da Figura 46, com os conjuntos de arquivos do TOPODATA produzidos ao longo do processamento dos dados SRTM, sendo os cinco conjuntos disponibilizados em caixas cinza.

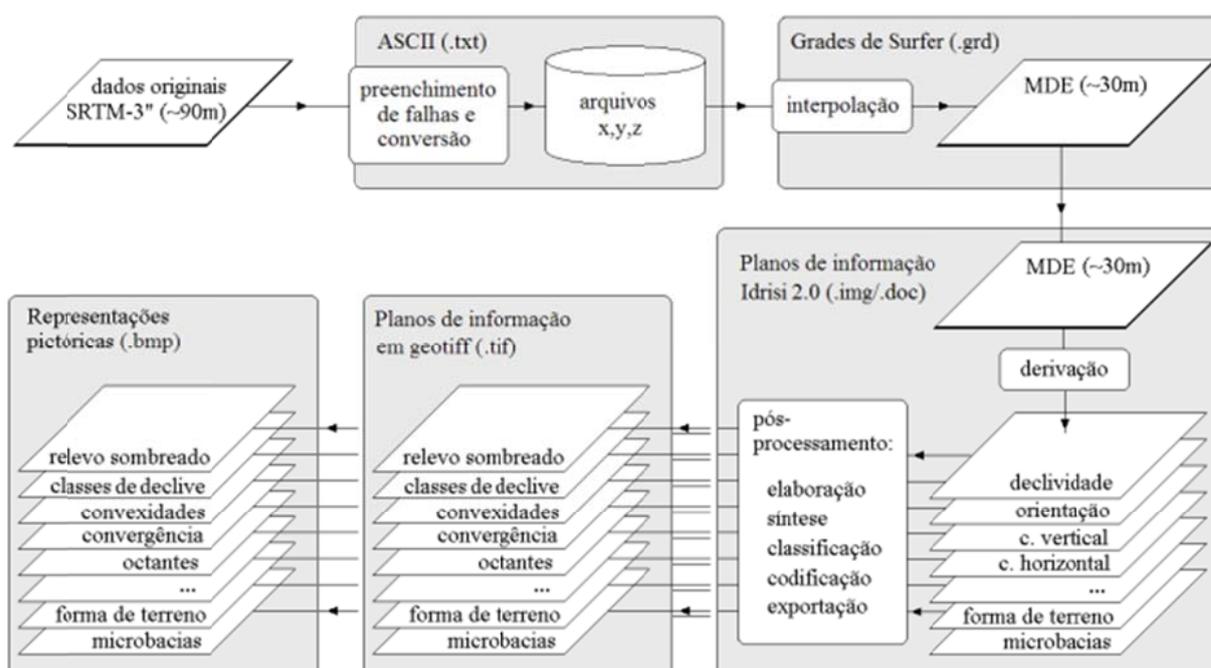


Figura 46 – Etapas processamento dos dados SRTM do projeto TOPODATA.

Fonte: INPE (2008) [42].

Ainda, de acordo com INPE (2008) [42], após o preenchimento de falhas dos dados originais SRTM, estes foram convertidos em arquivos ASCII (*.txt) estruturados em colunas x,y,z, que constituem um primeiro conjunto de dados, ainda com espaçamento (resolução) de 3 arco-segundos. Deste arquivo foram interpoladas as

grades de altitude, em um MDE refinado então para 1 arco-segundo (~30 m), sob formato de Surfer grid (*.grd). Um terceiro conjunto de arquivos, disponibilizado em formato GeoTiff (*.tif), contém este MDE refinado e suas derivações (variáveis) geomorfométricas locais, algumas das quais classificadas em intervalos ou combinações de interesse. Estes mesmos planos de informação foram preparados sob representações pictóricas não georreferenciadas, num quarto conjunto de arquivos (*.bmp), para rápida visualização em editores comuns. Além dos arquivos de dados associados a cada folha (ou quadrícula), paletas correspondentes aos esquemas de cores usados nestas representações foram também disponibilizadas para facilitar sua visualização em diferentes programas de SIG. Os dados estão todos estruturados em quadrículas compatíveis com a articulação 1:250.000, portanto, em folhas de 1° de latitude por 1,5° de longitude, e disponíveis em: <<http://www.dsr.inpe.br/topodata/index.php>>, com acesso em: 31 maio 2012.

3.3. SISTEMA DE SIMULAÇÃO HIDROLÓGICO-HIDRODINÂMICA DE INUNDAÇÕES

Esta fase do trabalho foi um esforço conjunto da equipe de pesquisadores no âmbito da cooperação técnico-científica, já mencionada, firmada entre a SRHE-PE, APAC, UFPE e CPRM, com o objetivo da montagem de um Sistema de Simulação Hidrológico-Hidrodinâmica para uma reprodução computacional do comportamento das inundações na bacia do rio Una, como descrito no item 2.3 do Capítulo 2. Trabalhos como o de Cirilo et al. (2011a) [12] e o de Ribeiro Neto, Cirilo e Dantas (2011) [30] apresentam o sistema gerado.

A partir deste sistema, foi possível, então, montar o *Modelo de Previsão* proposto neste trabalho de Tese como alternativa na *Gestão Territorial* e na *Gestão das Inundações* na bacia do rio Una, ou seja, no suporte aos projetos das barragens de contenção de cheias, no suporte ao planejamento urbano, no suporte ao monitoramento de inundações e na previsão de inundações para alerta à população.

3.3.1. PRÉ-PROCESSAMENTO DOS DADOS DE ENTRADA DO SISTEMA

3.3.1.1. DADOS DO LiDAR NA MODELAGEM HIDRODINÂMICA

A partir do mapeamento do LACTEC (2011) [44], o MDT LiDAR e as ortofotos digitais foram utilizados no pré-processamento da geometria do rio Una e dos afluentes Piranji e Pannels, realizado com o uso da extensão *HEC-GeoRAS 10* (USACE, 2012) [86] para ambiente *ArcGIS Desktop v10* (ESRI, 2012) [24], como descrito em Cirilo et al. (2011a) [12] e Ribeiro Neto, Cirilo e Dantas (2011) [30]. Nessa etapa, foram construídas as linhas que representam o eixo do rio e as margens, com uso das *ortofotos digitais* (Figura 48), e as seções transversais, por meio das informações

LiDAR (Figura 49), de onde se retiram os valores característicos de área, perímetro, raio hidráulico e declividade (decorrente do leito de seções subsequentes) para a resolução das equações de Saint-Venant no HEC-RAS (BRUNNER, 2010) [6].

Como o perfilamento a laser não se adequa à identificação da superfície sob a água, foram utilizadas seções trapezoidais estimadas a partir das ortofotos digitais. Essa caracterização é pouco relevante para os estudos de inundação, dado que o leito de inundação prevalece na conservação da massa, porém se torna relevante para ações de intervenção direta na calha dos rios ou projetos de navegabilidade, por exemplo. A Figura 47 ilustra um trecho do rio Una com os elementos geométricos representativos do sistema modelado. O espaçamento entre seções foi de 1 km nas áreas fora das cidades e 100 m nas cidades, a exemplo na Figura 49 para a cidade de Palmares, que permite um melhor detalhamento dos resultados e, conseqüentemente, do mapeamento das áreas de inundação.

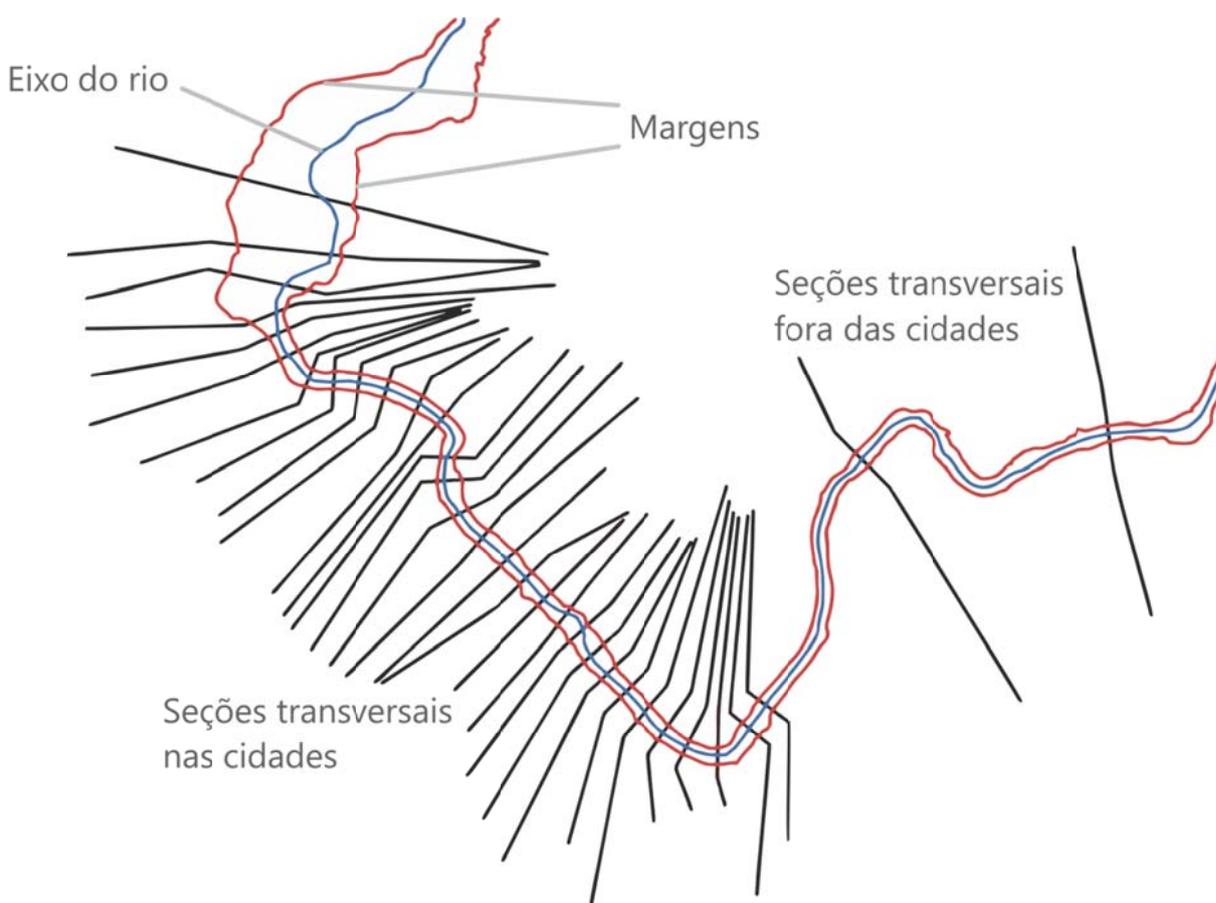


Figura 47 – Elementos geométricos representativos do sistema no HEC-RAS.
Fonte: Ribeiro Neto, Cirilo e Dantas (2011) [71].

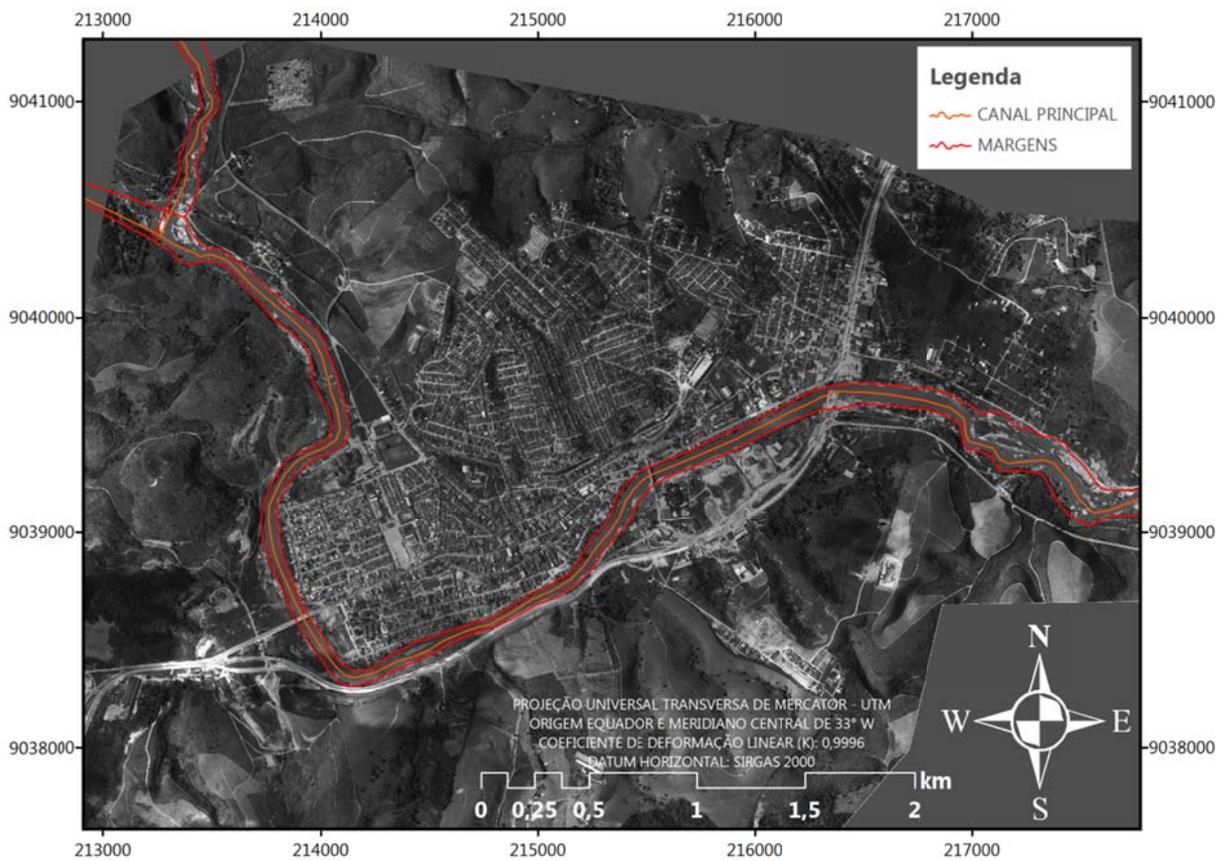


Figura 48 – Delineamento das margens e eixo do rio a partir das ortofotos digitais.

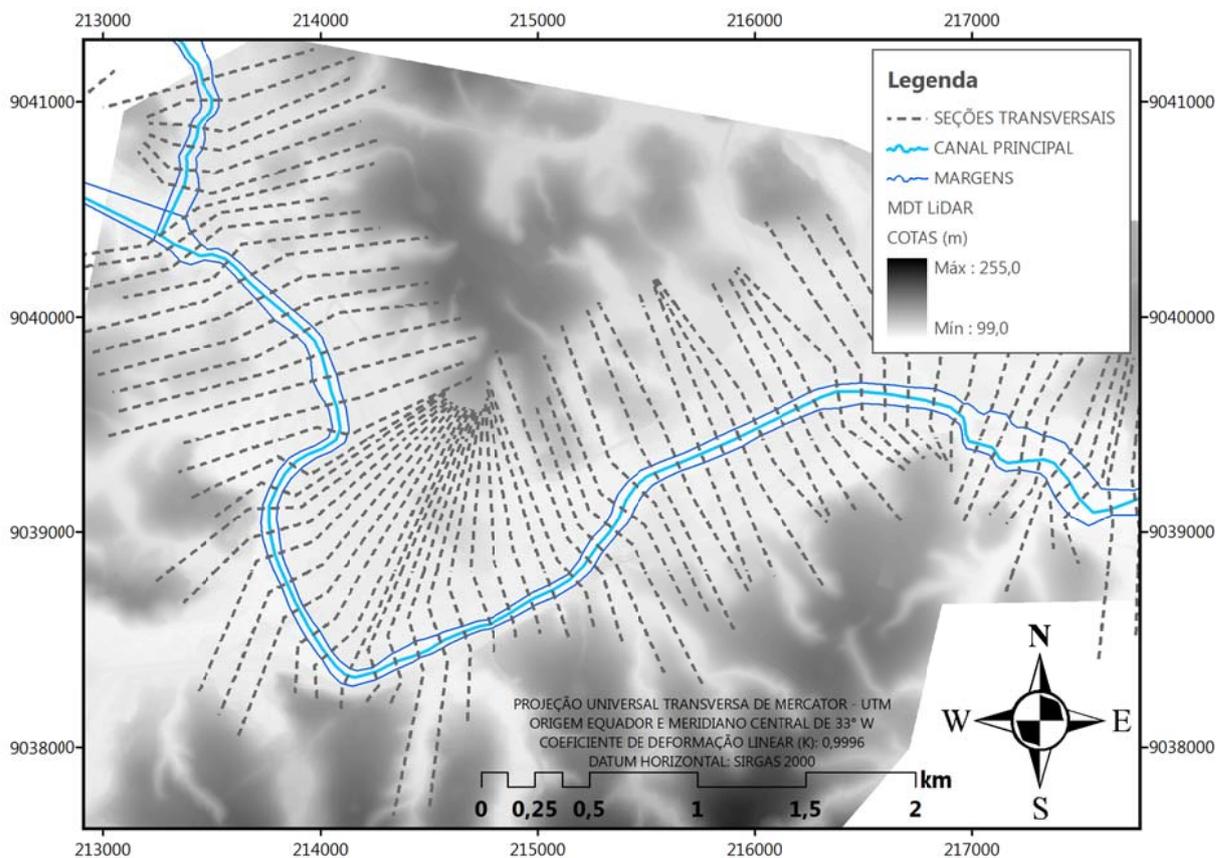


Figura 49 – Dados LiDAR na extração das seções transversais (detalhe para o espaçamento de 100 m entre as seções).

3.3.1.2. DADOS TOPODATA NA MODELAGEM HIDROLÓGICA

Como o mapeamento do LACTEC (2011) [44] não contemplou toda a área da bacia do rio Una, precisou-se buscar um novo MDT que estivesse disponível para esta extensão, a alternativa utilizada por Ribeiro Neto, Cirilo e Dantas (2011) [30] foi fazer uso do MDE TOPODATA (INPE, 2008) [42], visto na Figura 51, para o pré-processamento dos dados de entrada do modelo hidrológico HEC-HMS (FELDMAN, 2000) [25]. Nesta etapa foi utilizada a extensão *HEC-GeoHMS 10* (USACE, 2012) [86] para ambiente SIG, com a finalidade da delimitação da bacia do rio Una, extração da rede de drenagem e discretização em sub-bacias, dividindo-se a bacia em 51 sub-bacias como mostra a Figura 50. Esta discretização foi feita com o objetivo de realizar uma abordagem distribuída por sub-bacias no modelo, além da determinação de parâmetros de características da bacia, como tempo de concentração e parâmetros utilizados no método de Muskingum-Cunge por exemplo, a partir do TOPODATA, necessários ao modelo HEC-HMS.

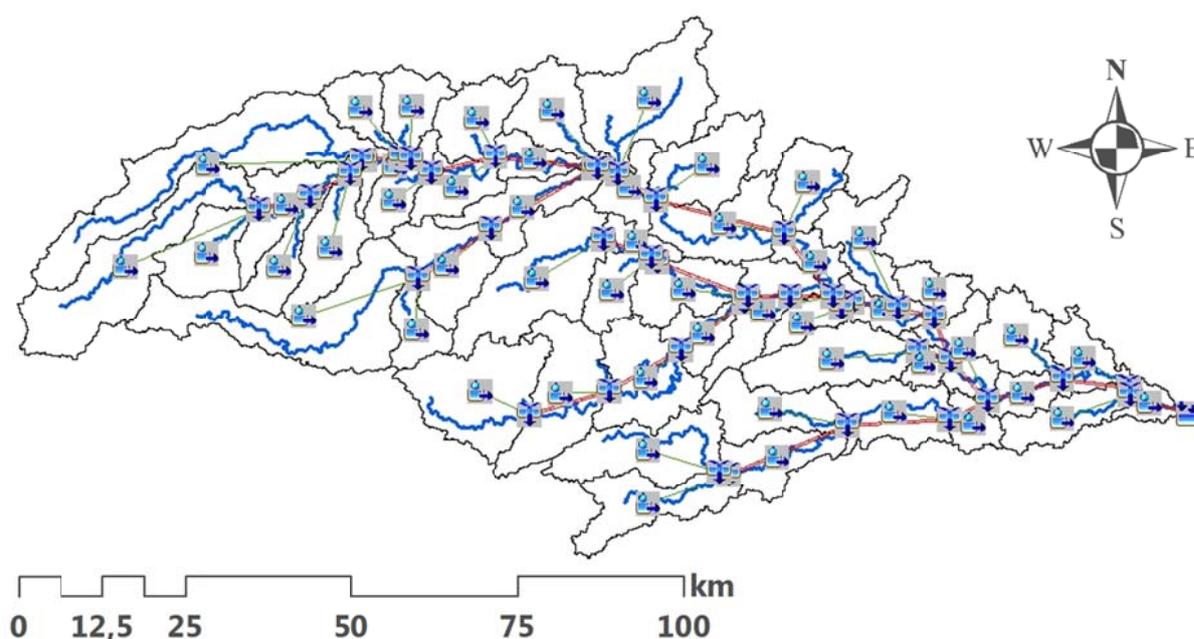


Figura 50 – Discretização da bacia do rio Una no HEC-HMS.
Fonte: Ribeiro Neto, Cirilo e Dantas (2011) [30].

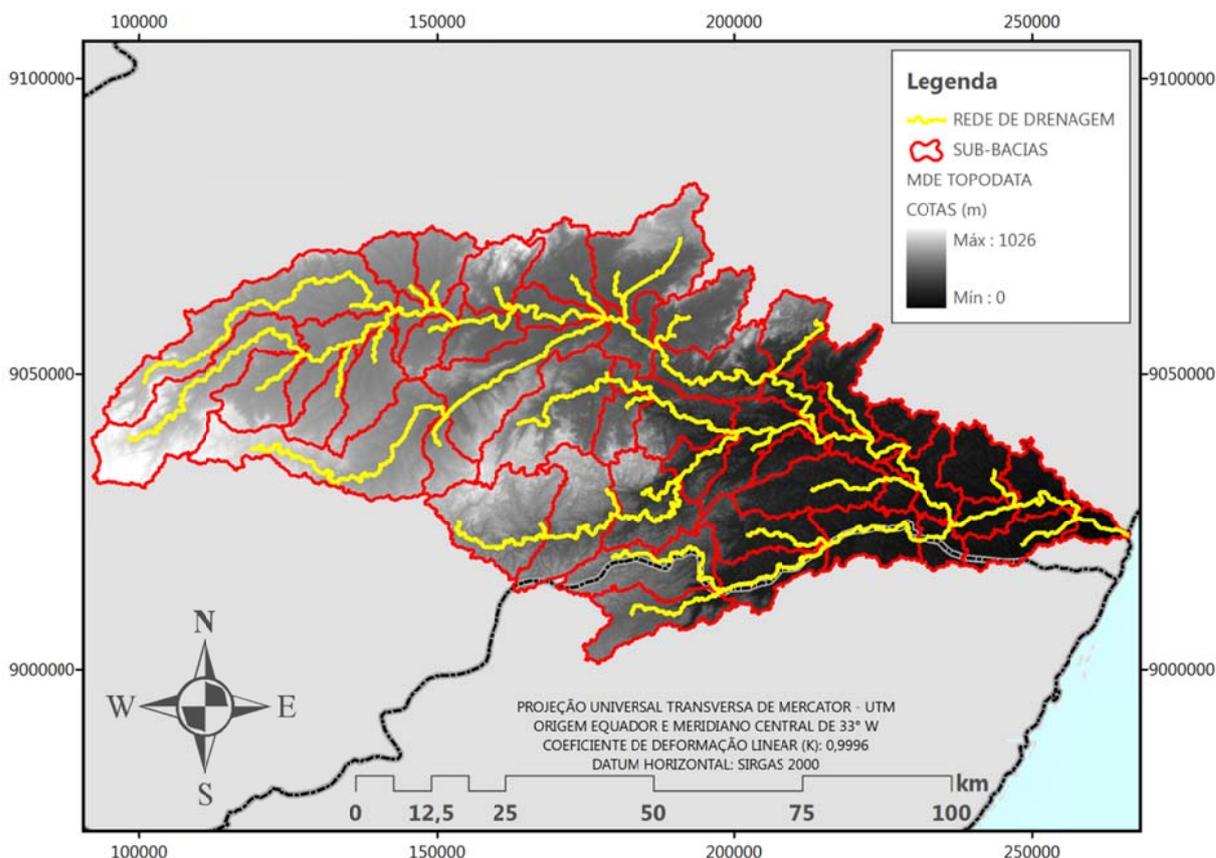


Figura 51 – Uso do TOPODATA (INPE, 2008) [42] na modelagem hidrológica.

3.3.2. CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DOS MODELOS QUE COMPÕEM O SISTEMA

3.3.2.1. MODELAGEM HIDROLÓGICA

O modelo hidrológico utilizado foi o HEC-HMS (FELDMAN, 2000) [25] (do inglês "*Hydrologic Modeling System*", ou seja, *Sistema de Modelagem Hidrológica*) desenvolvido pelo HEC (do inglês "*Hydrologic Engineering Center*", ou seja, *Centro de Engenharia Hidrológica*) do USACE como sucessor do HEC-1.

O HEC-HMS possui um conjunto de métodos, formulações e equações que podem ser escolhidos para representar cada parte da fase terrestre do ciclo hidrológico com o objetivo de modelar os processos de transformação de chuva em vazão em sistemas de bacias e sub-bacias hidrográficas (FELDMAN, 2000) [25]: i) balanço

hídrico na interface solo-vegetação; ii) propagação do escoamento superficial; iii) propagação do escoamento subterrâneo; iv) propagação do escoamento na calha dos rios e reservatórios. O esquema de simulação dos processos hidrológicos no HEC-HMS é apresentado na Figura 52.

O modelo é capaz de realizar simulações de eventos (de poucas horas ou dias) ou simulação contínua de longo período de modo que englobe períodos de cheia e de estiagem, e assume que uma bacia hidrográfica é reproduzida como um grupo interligado de sub-bacias, onde os processos hidrológicos podem ser representados pelos parâmetros que refletem as condições médias dentro de cada sub-bacia, o que possibilita a modelagem com uma abordagem **distribuída por sub-bacias**, que em bacias de maior porte torna-se importante devido ao efeito de variabilidade espacial ser significativo.

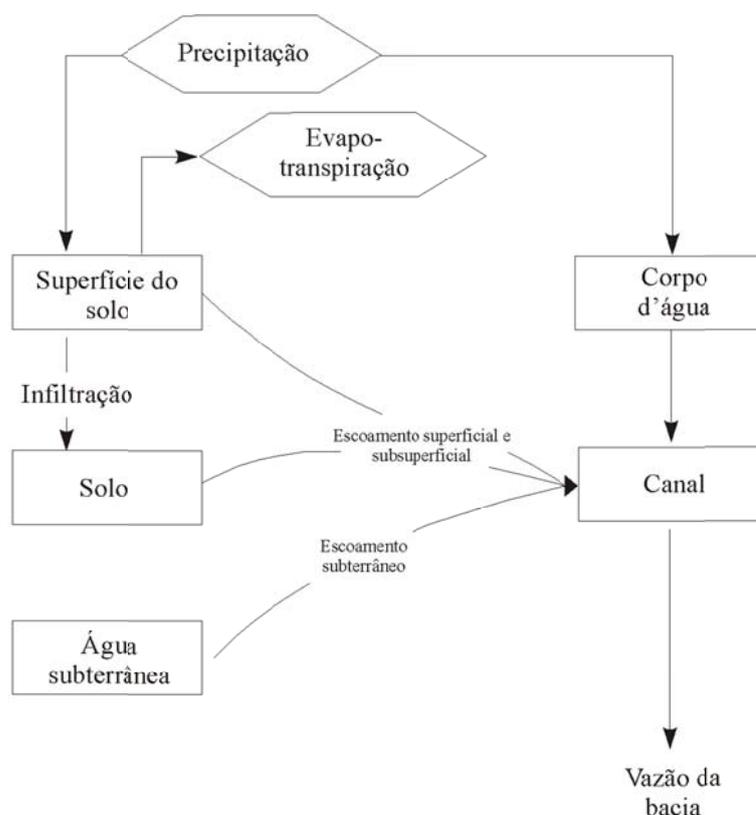


Figura 52 – Esquema de representação do escoamento na bacia no HEC-HMS.
Fonte: Adaptado de Feldman (2000, apud RIBEIRO NETO; CIRILO; DANTAS, 2011) [71].

Segundo Macedo (2010) [47], o modelo HEC-HMS é constituído por três componentes: o *Modelo de Bacia*, o *Modelo Meteorológico* e as *Especificações de Controle*. Requer, inicialmente, a entrada de dados da bacia hidrográfica, bem como dados meteorológicos. Posteriormente, são escolhidos os modelos para o cálculo das perdas, de transformação chuva-vazão, de composição do escoamento de base, de propagação em rios, considerando parâmetros relacionados a tais modelos, como a área das sub-bacias, tempo de concentração, fatores de perda por infiltração, evapotranspiração, e perdas em sumidouros. A Figura 53 mostra uma representação esquemática das fases da modelagem no HEC-HMS.

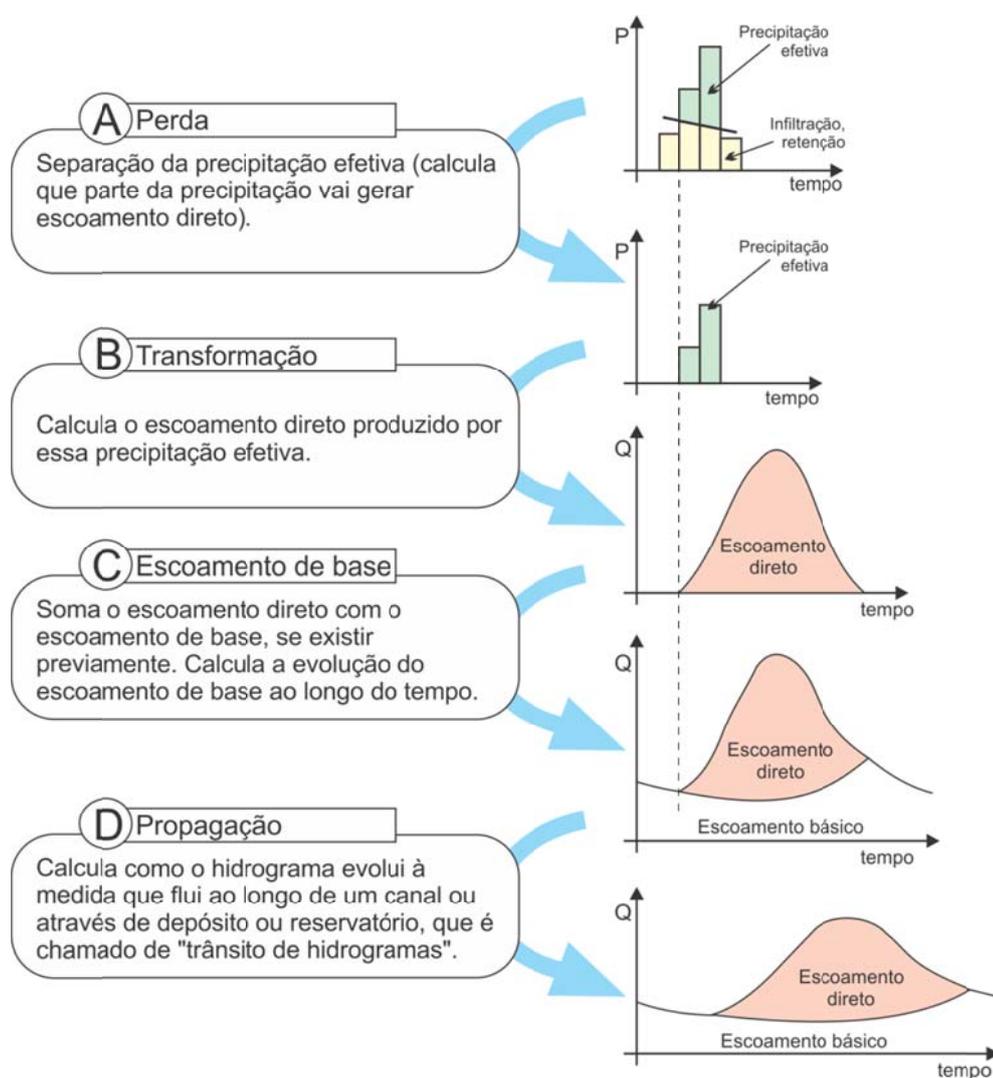


Figura 53 – Fases da modelagem no HEC-HMS.
Fonte: Santos, Cirilo e Ribeiro Neto (2012) [74].

A modelagem no HEC-HMS é realizada de maneira modular, em que conjuntos de dados podem ser independentemente manipulados, mas que respeitam uma sequência de acionamento para a realização de simulações. As informações são, então, agrupadas nos três componentes mencionados (MACEDO, 2010) [47]:

(a) Modelo de Bacia

Nesta categoria são inseridos e manipulados os dados referentes à geometria da bacia hidrográfica, sendo representado o esquema hidrológico da área, com as sub-bacias, os trechos de rios, possíveis reservatórios, junções e divisões dos canais. Inclui, neste componente, a definição dos métodos e respectivos parâmetros referentes à perda por infiltração, evaporação, interceptação, os métodos de transformação chuva-vazão, de cálculo do escoamento de base e propagação em rios.

(b) Modelo Meteorológico

Constitui na entrada dos dados de precipitação e evapotranspiração, sendo selecionado o método de distribuição temporal destes.

(c) Especificações de Controle

Refere-se aos períodos de tempo para os quais serão realizados os cálculos, incluindo data e horário de início e fim do determinado período, bem como o intervalo ou "passo" de computação dos dados.

O modelo chuva-vazão HEC-HMS foi configurado utilizando-se os métodos:

- i) **SMA (do inglês, "Soil Moisture Accounting"):** para o balanço hídrico na bacia. O modelo SMA utiliza reservatórios para representar o armazenamento e o movimento da água na camada superficial do solo, na camada superior da zona saturada e na camada inferior da zona saturada;
- ii) **Hidrograma Unitário SCS (do inglês "Soil Conservation Service"):** para a propagação na superfície da bacia;
- iii) **Reservatório Linear:** para a propagação da água subterrânea; e
- iv) **Muskingum-Cunge:** para a propagação nos rios, apenas nos trechos de canais a montante dos pontos considerados para condições de contorno do modelo hidrodinâmico utilizado no Sistema.

Ribeiro Neto, Cirilo e Dantas (2011) [71] utilizaram os eventos de janeiro de 2004 e junho de 2005 registrados nas estações fluviométricas listadas na Tabela 9 (item 3.2.2.3), com exceção da estação de Cachoeirinha (39530000), dados das estações pluviométricas listadas nas Tabela 5, Tabela 6 e Tabela 8 (itens 3.2.2.1, 3.2.2.2 e 3.2.2.3, respectivamente) e os dados pré-processados descritos no item 3.3.1.2, para calibrar o modelo. Os parâmetros que se mostraram mais sensíveis sobre a vazão de saída foram a infiltração máxima do solo, capacidade de armazenamento do solo, área impermeável e interceptação superficial. Maior atenção foi dada para a calibração da bacia contribuinte das estações fluviométricas de Capivara, no rio Una, Catende, no rio Piranji, e Jacuípe no rio Jacuípe. As áreas da bacia até a estação de Capivara mais os afluentes Piranji e Jacuípe correspondem a 72% da bacia do rio Una e possuem papel importante na formação das cheias na bacia.

Os resultados da calibração do modelo HEC-HMS que podem ser vistos na Figura 54, apontam para um bom ajuste para os picos de vazões observadas e calculadas pelo modelo, ou seja, mostraram que, na maior parte do tempo da simulação, a vazão calculada acompanhou o momento de ocorrência dos picos de vazão

observados. A deficiência ficou por conta da magnitude da vazão de pico, como verificado na estação de Capivara.

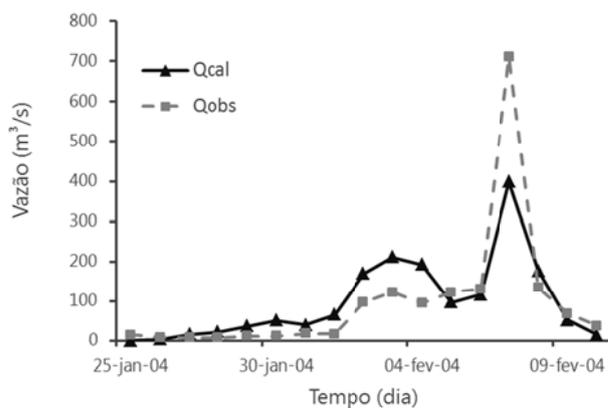
O ajuste foi avaliado considerando a análise visual dos hidrogramas e verificando os valores do coeficiente de Nash e Sutcliffe (R^2), um dos mais importantes critérios estatísticos para avaliar a precisão de modelos hidrológicos, que é dado pela equação:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q_i^{est})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - \bar{Q})^2} \quad (3.3)$$

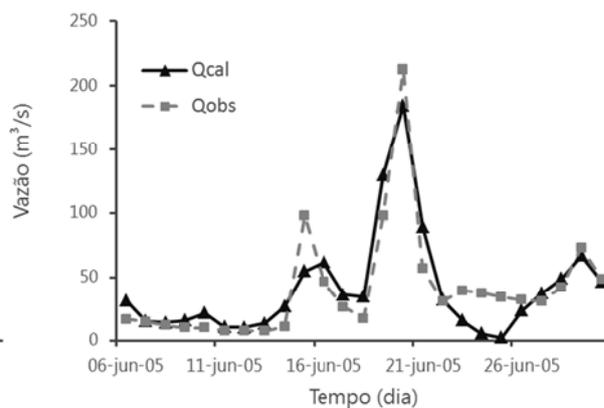
sendo: Q^{obs} – vazão observada; Q^{est} – vazão estimada pelo modelo; \bar{Q} – vazão média observada; n – número de dados no evento considerado.

O coeficiente de Nash e Sutcliffe (R^2) pode variar de $-\infty$ a 1, sendo 1 o valor máximo que corresponde a um ajuste perfeito entre vazões calculadas e observadas. O valor de R^2 é fortemente influenciado por erros nas vazões máximas, por esta razão, quando R^2 é próximo de 1, o modelo está obtendo um bom ajuste para as cheias. O desempenho de um modelo é considerado adequado e bom se o valor de R^2 supera 0,75, e é considerado aceitável se o valor de R^2 fica entre 0,36 e 0,75.

CAPIVARA

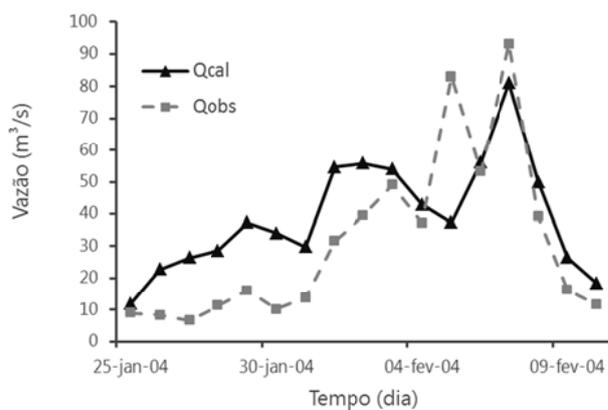


$$R^2 = 0,708$$

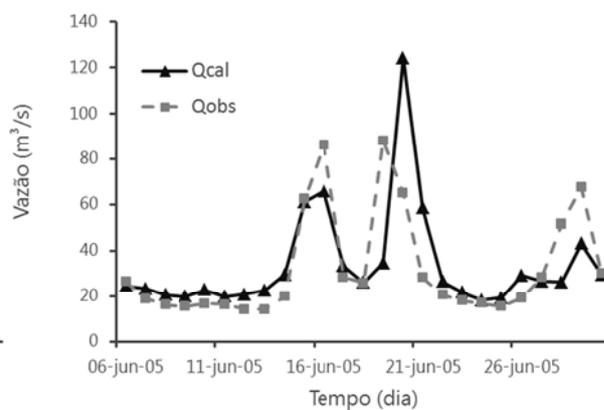


$$R^2 = 0,808$$

CATENDE

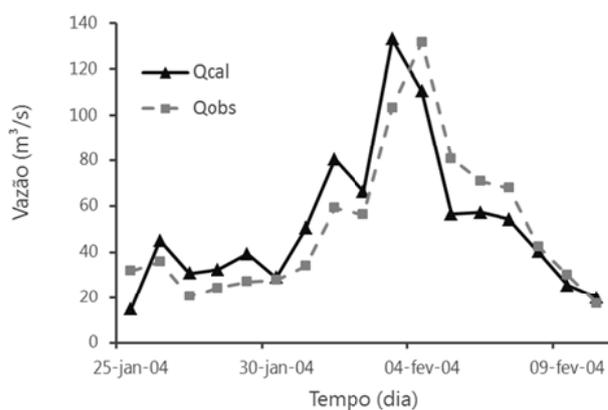


$$R^2 = 0,500$$



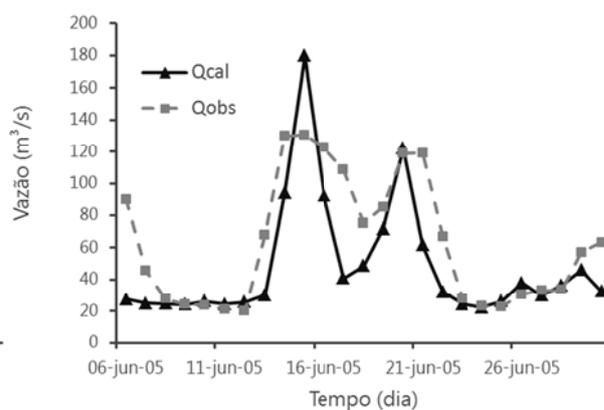
$$R^2 = 0,263$$

JACUÍPE



$$R^2 = 0,762$$

(a)



$$R^2 = 0,427$$

(b)

Figura 54 – Hidrogramas observado e calculado com o modelo HEC-HMS.

(a) Evento de jan-2004; (b) Evento de jun-2005.

3.3.2.2. MODELAGEM HIDRODINÂMICA

O modelo hidrodinâmico utilizado foi o HEC-RAS (BRUNNER, 2010) [6] (do inglês "*River Analysis System Hydraulic*", ou seja, *Sistema de Análise Hidráulica de Rios*) desenvolvido pelo HEC-USACE.

O HEC-RAS (BRUNNER, 2010) [6] possibilita a simulação unidimensional do escoamento em canais abertos em regime permanente, não-permanente (transiente), transporte de sedimentos, condição de leito móvel e modelagem da temperatura da água. Para a simulação em regime transiente, o modelo utiliza as equações completas de Saint-Venant e o esquema de diferenças finitas implícito de quatro pontos de Preissmann, descritos no item 2.3.3.2.

Os trechos do rio Una modelados no HEC-RAS estendem-se da estação fluviométrica de Capivara (39540000) até a foz do rio no oceano Atlântico, incluindo os afluentes: o rio Piranji e seu tributário o rio Panelas (Figura 55).

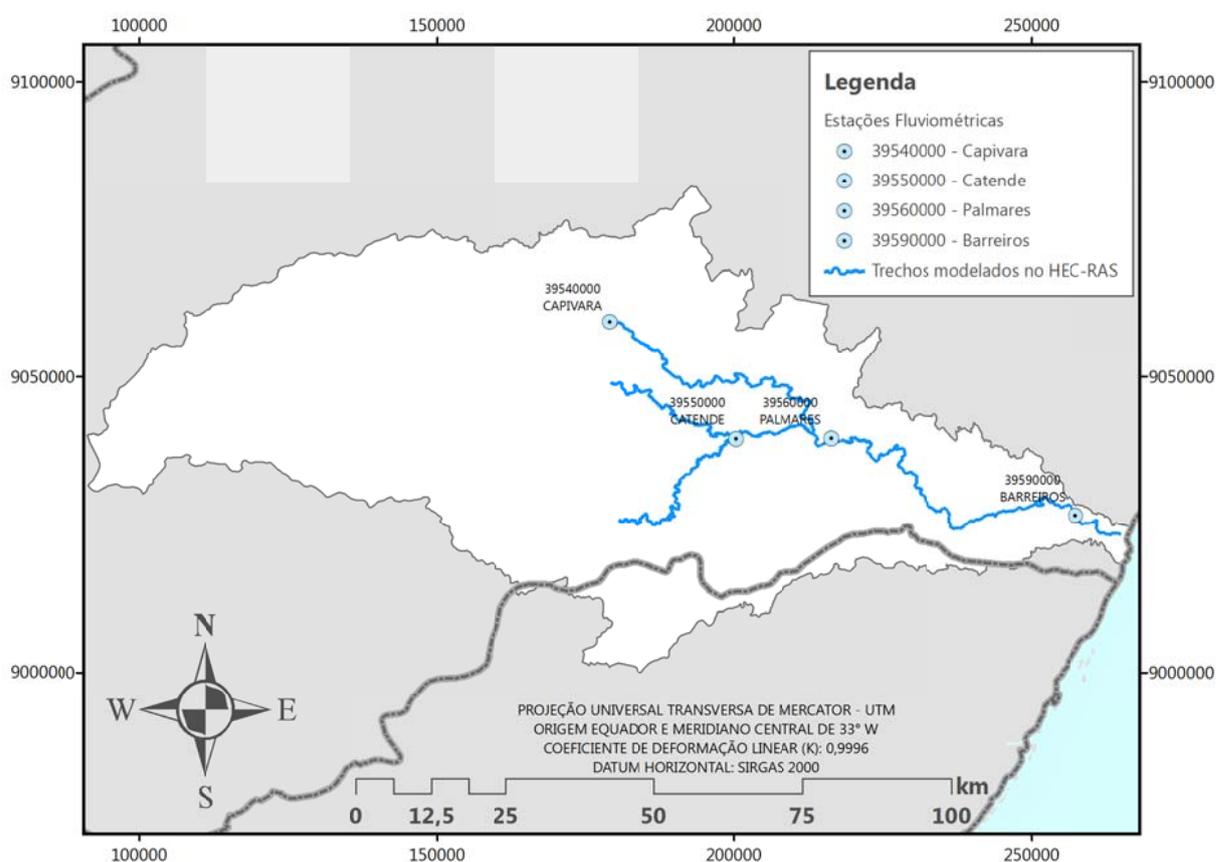


Figura 55 – Esquema dos trechos modelados no HEC-RAS e a estação de calibração.

Uma dificuldade encontrada diz respeito à representação deficiente do leito principal (ou leito menor) em algumas seções do rio. Isso ocorre porque o feixe de laser do levantamento LIDAR não consegue detectar o fundo do rio quando o mesmo está submerso. O resultado é o aparecimento de instabilidades numéricas na resolução das equações de Saint-Venant quando o nível da água está muito baixo. A solução desse problema foi a criação de um canal artificial no leito do rio por meio da ferramenta "Pilot Channel" do HEC-RAS. As dimensões do canal artificial foram largura de 1 metro e profundidade de 3 metros (Figura 56). Com isso, garante-se que sempre haverá uma lâmina d'água no fundo do rio, que permitirá a resolução das equações sem instabilidades numéricas.

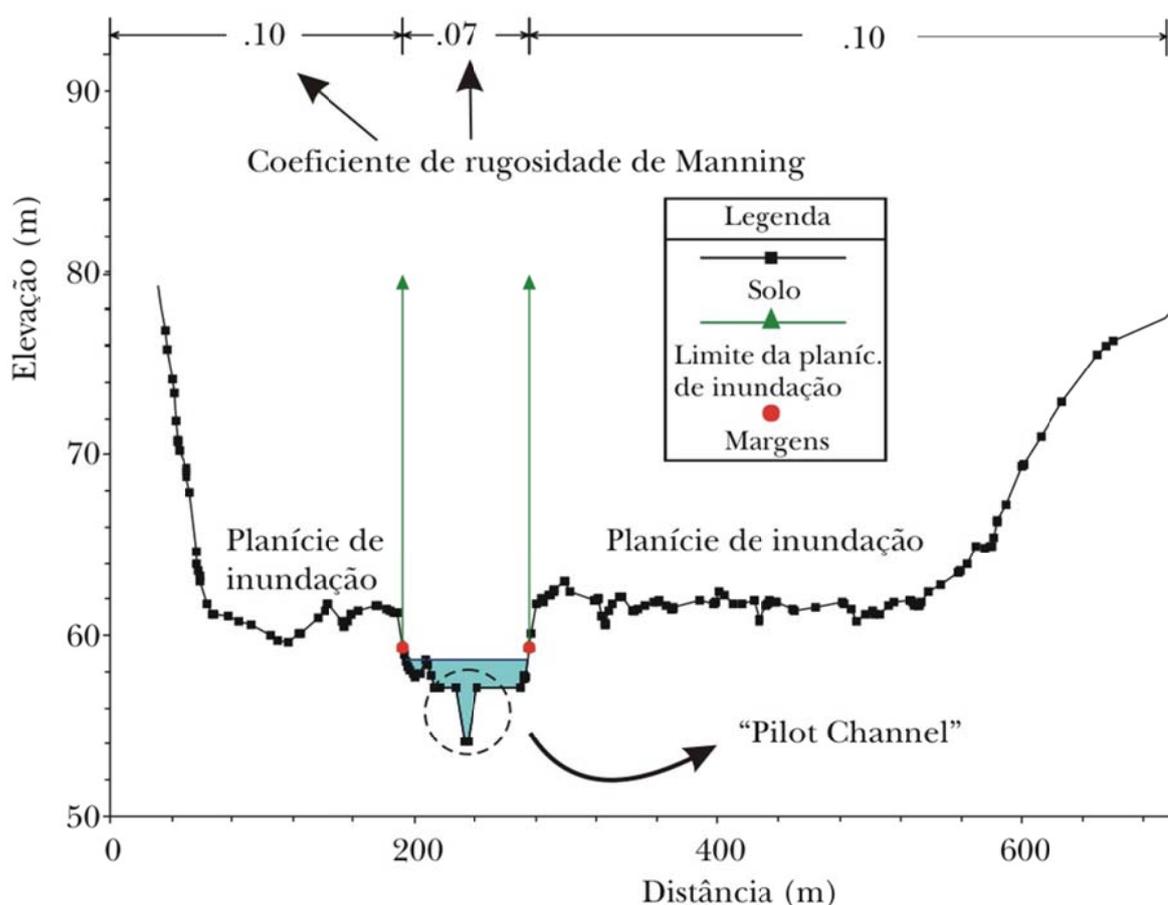
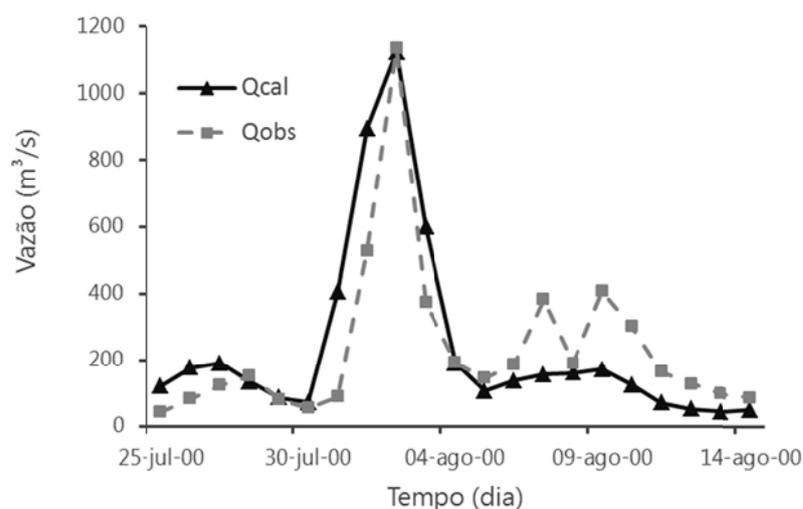


Figura 56 – Detalhe de uma seção transversal no modelo hidrodinâmico.
Fonte: Ribeiro Neto, Cirilo e Dantas (2011) [71].

O modelo HEC-RAS permite que se representem áreas de armazenamento localizadas ao longo das margens do rio. Essa opção de representação foi utilizada em todo o percurso simulado. Nas áreas de armazenamento (áreas ineficientes), admite-se que não há escoamento da água, o que significa, em outras palavras, que se aplica apenas a equação da continuidade. Na área central, que representa o leito do rio, aplicam-se as equações da continuidade e dinâmica. Os valores do coeficiente de *Manning* adotados foram 0,070 para o canal principal e 0,100 para a planície de inundação adjacente ao rio conforme mostrado na Figura 56. Foi necessário o uso de valores para o coeficiente de rugosidade de Manning considerados bastante altos e de forma homogênea na bacia, o que não representa o sistema físico representado, para eliminar as instabilidades do modelo e de forma indireta compensar os trechos de grande declividade, para os quais há dificuldade de utilizar as equações de Saint-Venant.

Conforme Cirilo et al. (2011a) [12] e Ribeiro Neto, Cirilo e Dantas (2011) [71], o modelo hidrodinâmico foi calibrado com dados do evento de agosto de 2000, um dos mais severos já registrados na bacia do rio Una, utilizando os dados pré-processados descritos no item 3.3.1.1 e como condições de contorno: de montante e contribuições laterais ao longo dos trechos modelados, as vazões de saída do modelo hidrológico; e de jusante, a *série sintética de marés simuladas descritas* no item 3.2.2.4. O resultado da vazão em Palmares é mostrado na Figura 57, em que se pode observar um bom ajuste dos hidrogramas, inclusive para a vazão de pico, com o coeficiente de Nash e Sutcliffe obtido de $R^2 = 0,610$ que é considerado aceitável. Outra forma utilizada para avaliar o desempenho da modelagem foi por meio da comparação da área inundada levantada na cidade de Palmares e Barreiros a partir das marcas da cheia, apresentadas no item 3.2.1.1.



$$R^2 = 0,610$$

Figura 57 – Hidrogramas observado e calculado em Palmares para o evento de ago-2000 a partir modelo hidrodinâmico.

3.3.3. INTEGRAÇÃO/ACOPLAMENTO DOS MODELOS

O HEC-DSS (do inglês "*Data Storage System*", ou seja, *Sistema de Armazenamento de Dados*), também desenvolvido pelo HEC-USACE, é um sistema de banco de dados concebido para armazenar e recuperar dados tipicamente sequenciais, como de séries temporais, de forma mais eficiente e fácil para os usuários e programas aplicativos. Tais tipos de dados incluem os dados de séries temporais, dados de pares ordenados de uma relação (curvas), dados espaciais de grades georreferenciadas, dados textuais, entre outros (CEIWR-HEC, 2009) [8].

Assim, a formação do referido Sistema de Simulação Hidrológico-Hidrodinâmico se dá com a integração dos modelos HEC-HMS e HEC-RAS por meio de bancos de dados HEC-DSS, o sistema de armazenamento de dados gerados pelos modelos do HEC. Dessa forma, a vazão gerada pelo HEC-HMS é armazenada em um banco de dados, no formato HEC-DSS, que pode ser lido pelo HEC-RAS para a entrada das mesmas vazões nas condições de contorno do modelo hidrodinâmico.

Capítulo 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. IMPORTÂNCIA DA TECNOLOGIA LIDAR E DA MODELAGEM HIDROLÓGICO-HIDRODINÂMICA COMO INSTRUMENTOS DA GESTÃO TERRITORIAL

4.1.1. SUPORTE AOS PROJETOS DAS BARRAGENS DE CONTENÇÃO DE CHEIAS

Após a ocorrência da grande cheia do ano 2000 na bacia do rio Una alguns estudos foram desenvolvidos para planejamento de ações de contenção. Esses estudos foram baseados na cartografia então existente, na escala 1:100.000. Daí foi proposta a construção de um conjunto de quatro barragens na bacia: Serro Azul, no próprio rio Una, cerca de 20 km a montante da cidade de Palmares; Igarapeba, no município de São Benedito do Sul, para contenção do principal afluente, o Piranji; barragem Painelas II, no afluente do Piranji denominado rio Painelas, município de Cupira e por último a barragem Gatos, no riacho dos Gatos, por sua vez afluente do rio Painelas, localizada no município Riacho dos Gatos. A Figura 58 a seguir mostra de forma esquemática o posicionamento destas barragens. Em julho de 2012 a barragem Igarapeba se encontra em fase de licitação e as demais em obras. Além das intervenções na bacia do rio Una também está em fase de licitação uma 5ª. barragem, esta na bacia vizinha do rio Sirinhaém, no município de Barra de Guabiraba.

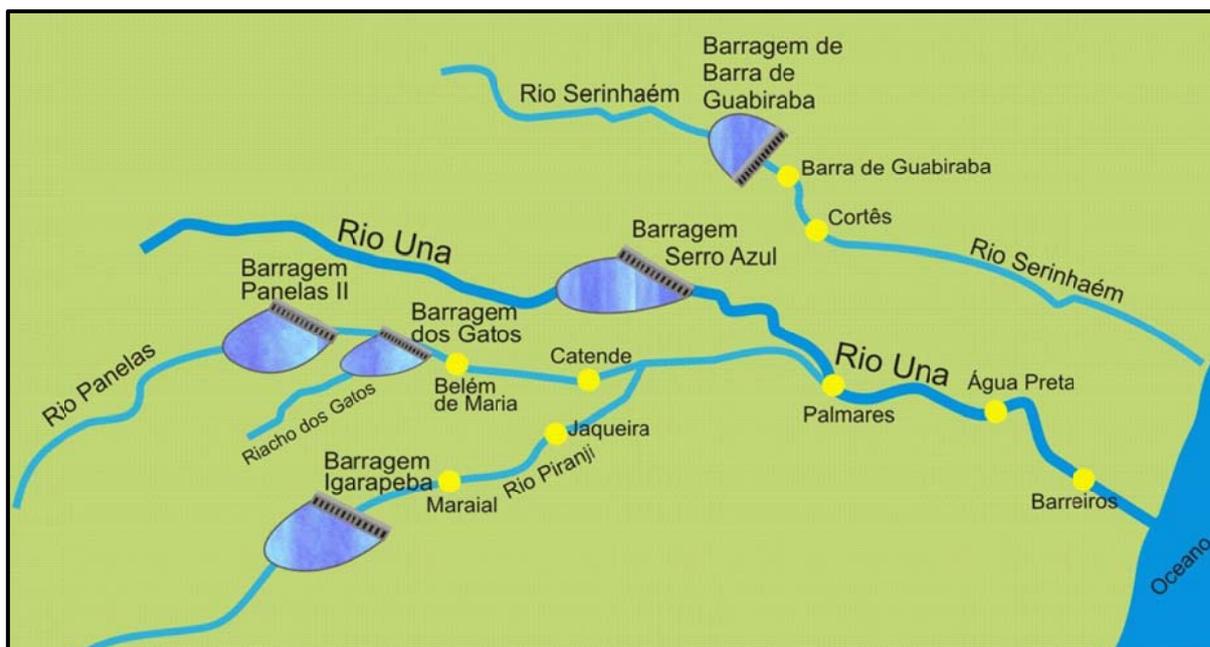


Figura 58 – Localização das barragens do sistema de contenção de inundações.
Fonte: Pernambuco (2011) [63].

Para avaliar a importância da base de dados espaciais utilizada neste trabalho foram levantadas as curvas cota-área-volume das barragens que fazem parte do sistema de contenção de inundações dos rios Una e Sirinhaém utilizando este conjunto de informações espaciais de alta precisão cartográfica. As diferenças são muito grandes, como era de se esperar. Considerando, por exemplo, de acordo com Pernambuco (2002) [60], que o reservatório de Serro Azul, com eixo definido praticamente no mesmo local do atual projeto, acumularia em torno de $41,0 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ para uma cota máxima de 217 m, a nova análise levou ao valor de $303,0 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ para uma cota máxima de aproximadamente 205 m, que é a referência da do atual projeto da barragem Serro Azul, e com aproximadamente $422,0 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ para a mesma cota máxima de 217 m. Essa avaliação foi incorporada às diretrizes do projeto de engenharia que levou à licitação da barragem de Serro Azul, conforme indicado em Pernambuco (2011) [63]. Na Figura 59 estão ilustradas as curvas cota-área-volume para os reservatórios do sistema de contenção de inundações para a bacia do rio Una, ou seja, os reservatórios Serro Azul, Igarapeba, Panelas II e Gatos. A Figura 60 ilustra o espelho d'água projetado sobre o MDT para as barragens Serro Azul e Panelas II.

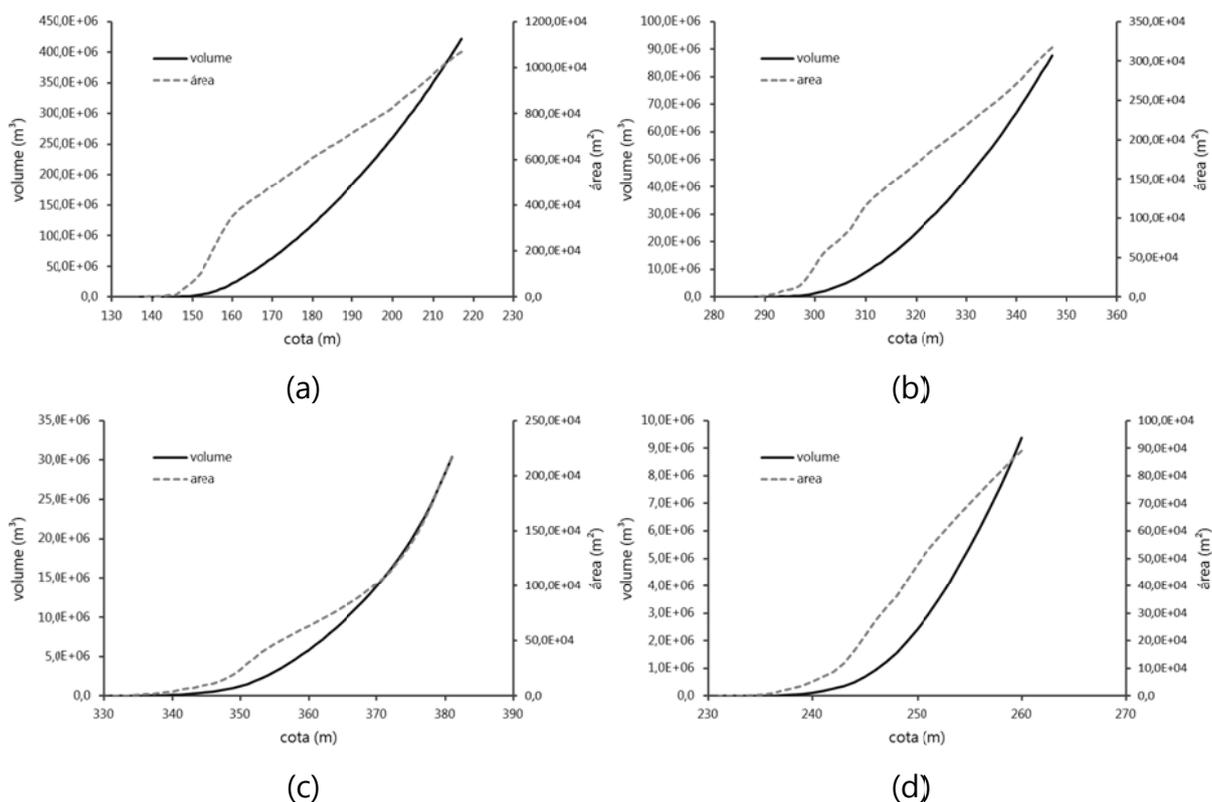


Figura 59 – Curva cota-área-volume a partir do MDT LiDAR.

(a) Barragem Serro Azul. (b) Barragem Igarapeba.

(c) Barragem Painelas II. (d) Barragem Gatos.



(a)

(b)

Figura 60 – Vista 3D da representação da bacia hidráulica de barragens planejadas para controle de inundações na bacia do rio Una com uso do mapeamento do LACTEC (2011) [44].

(a) Serro Azul. (b) Painelas II.

4.1.2. SUPORTE AO PLANEJAMENTO URBANO

Também com foco nas intervenções a serem realizadas para minimizar as inundações no perímetro urbano das cidades, resultam do MDT e das simulações hidrológico-hidrodinâmicas as intervenções na calha fluvial em andamento desde fevereiro de 2012. De acordo com Cirilo et al. (2011b) [13], simulações de propagação da onda de cheia no rio Una indicavam a necessidade de ampliação da sua calha fluvial no perímetro urbano das três cidades mais atingidas: Palmares, Água Preta e Barreiros, para permitir o escoamento de vazões da ordem de $500 \text{ m}^3/\text{s}$, que em Palmares está associado a um período de retorno $Tr = 5,67 \text{ anos}$, e em Barreiros a um período de retorno $Tr = 2,99 \text{ anos}$. A Figura 61 mostra a modelagem da propagação onda de cheia em Palmares ilustrando os caminhos preferenciais das águas durante a inundação e a Figura 62 aponta o trecho escolhido objeto de intervenção em Palmares ressaltando as áreas de corte e aterro.

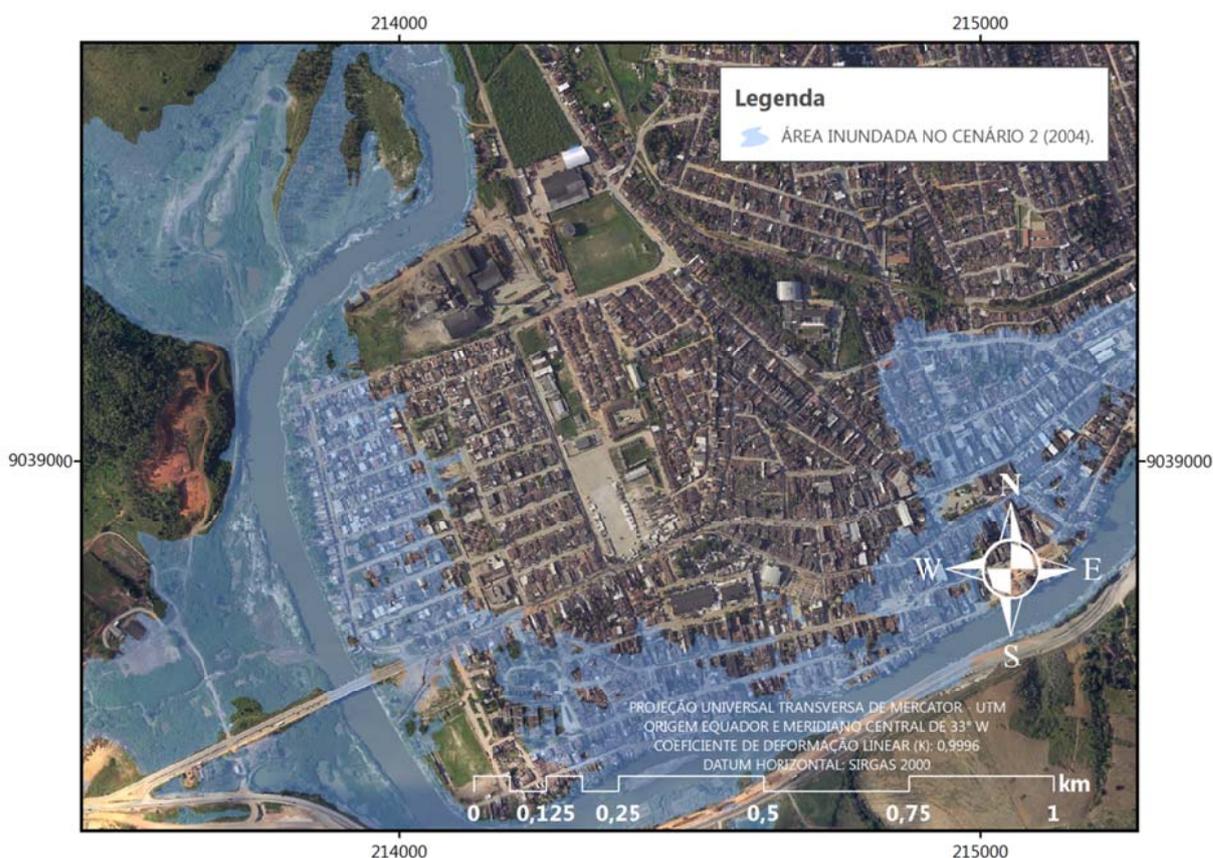


Figura 61 – Modelagem da propagação da onda de cheia em Palmares.

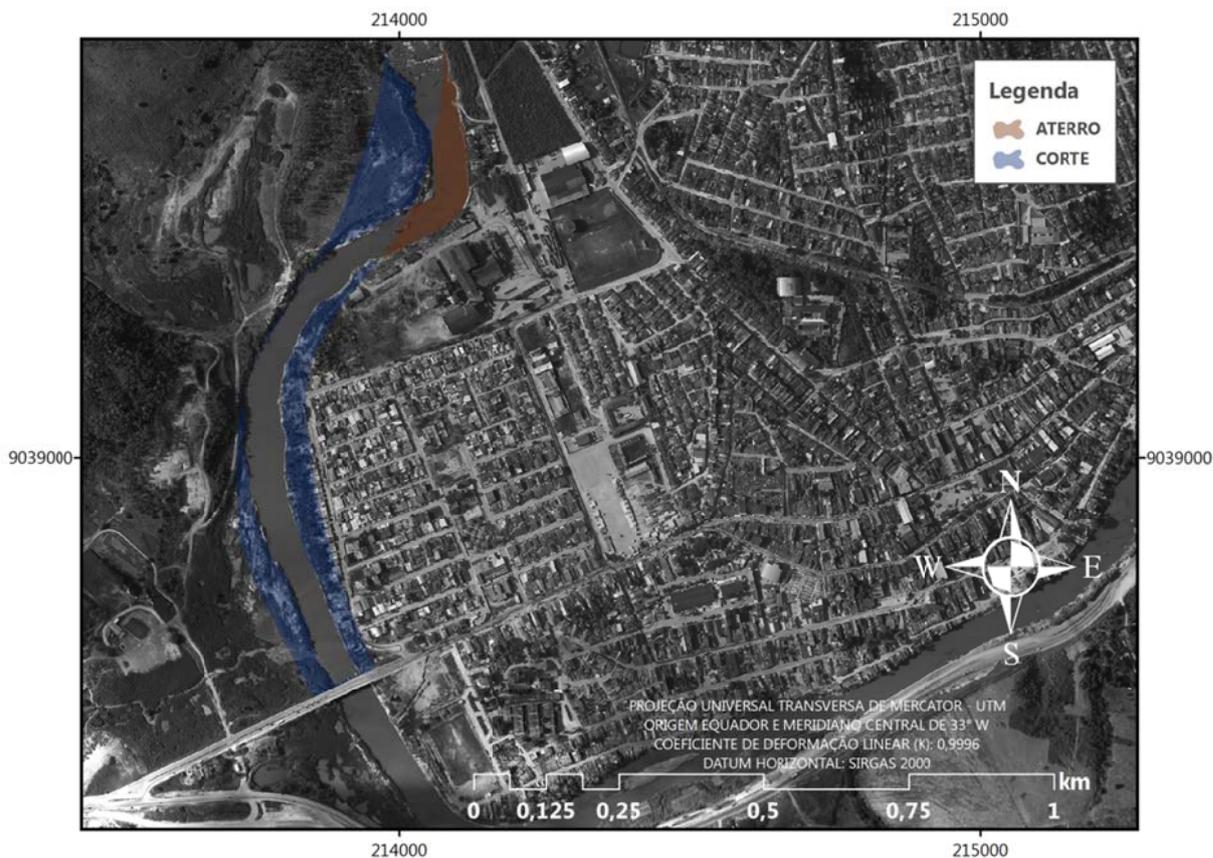


Figura 62 – Trecho objeto de intervenção em Palmares com áreas de corte e aterro ressaltadas.

4.1.3. SUPORTE AO MONITORAMENTO DE INUNDAÇÕES

De acordo com Prado e Borelli (2011) [67] e Prado (2011) [66], a Estação da *Rede Hidrometeorológica Nacional* de responsabilidade da ANA que é operada pela CPRM, em Palmares de código 39560000, passa a ter **Altitude Ortométrica** em sua *referência de nível* (RN), ficando referenciada à Rede Altimétrica Brasileira do IBGE de acordo com a seguinte relação:

$$Cota_{IBGE}(m) = Cota_{régua}(cm) / 100 + 99,058 \quad (4.1)$$

onde $Cota_{régua}$ é a cota de leitura na régua linimétrica com referência de nível local.

De posse desta relação, pôde-se adequar as informações de medições de vazão que tem referência na cota de leitura nas régua linimétricas da estação para uma cota referenciada à Rede Altimétrica Brasileira do IBGE, ou seja, com a mesma

referência das cotas na modelagem hidrológico-hidrodinâmica da bacia do rio Una. Ainda segundo Prado e Borelli (2011) [67], deu-se um passo importante na qualificação dos dados hidrológicos, saindo de uma representação puramente local para um ambiente regional/global que facilitará os hidrólogos nas suas diversas modelagens.

Obter uma curva-chave é um trabalho que envolve uma sucessão de medições em diferentes eventos, principalmente por ocasião dos momentos de maior risco, aproveitando o pico das cheias, o que traz elevado grau de dificuldade operacional. Um modelo hidrodinâmico bem ajustado pode ser instrumento para promover a extrapolação dos dados medidos. Nesse sentido, buscou-se neste trabalho comparar valores medidos de vazão na seção hoje monitorada com PCD no rio Una na cidade de Palmares. A Figura 63 representa as curvas-chave para estação de Palmares a partir de dados da *calibração* do modelo hidrodinâmico, evento em agosto de 2000, de dados dos *cenários de previsão*, e os pontos de medição de descarga líquida pela CPRM e APAC. Os resultados foram bons para a faixa de vazões medidas, conforme se pode observar.

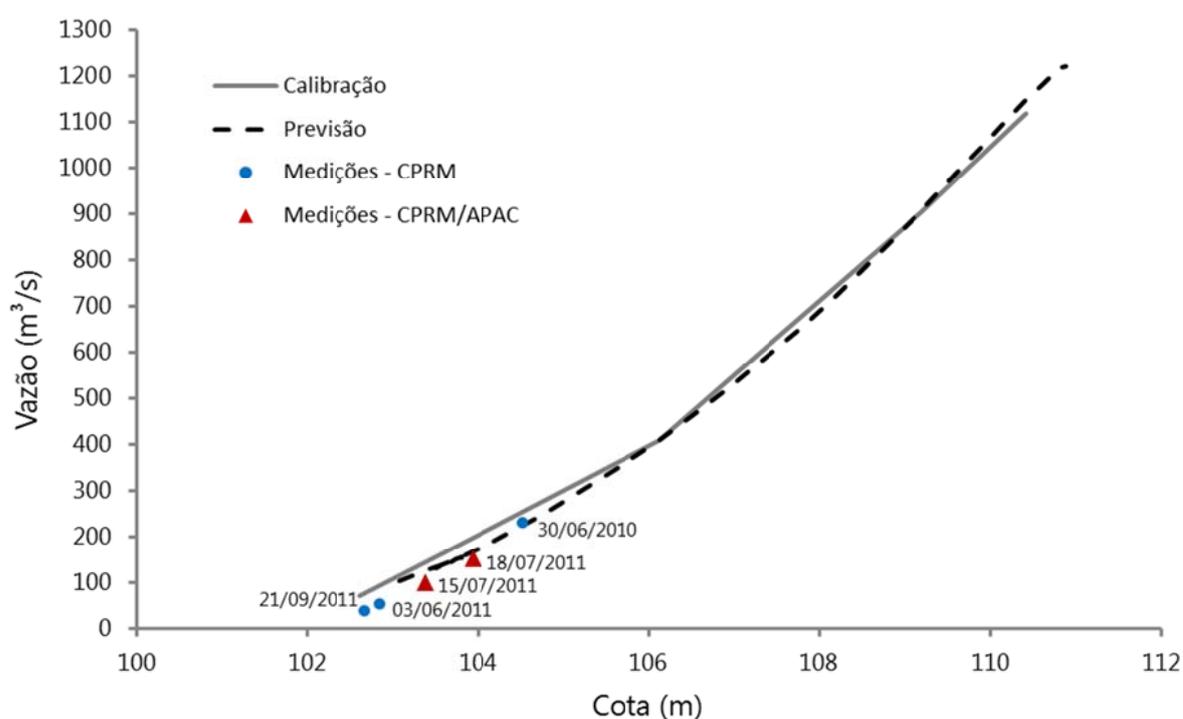


Figura 63 – Curva-chave da modelagem para a estação de Palmares da ANA/CPRM.

4.2. MODELO DE PREVISÃO COMO INSTRUMENTO DA GESTÃO DAS INUNDAÇÕES

4.2.1. ANÁLISE REGIONAL DE FREQUÊNCIAS DE PRECIPITAÇÕES

Para realização deste estudo foram utilizadas as séries de alturas diárias de precipitação organizadas por ano civil de 34 estações apresentadas na Tabela 12. Para esta análise foram utilizadas as precipitações diárias acumuladas máximas anuais de 1 dia, 2 dias, 3 dias, 4 dias e 5 dias de séries mais recentes com no mínimo 30 anos de dados, descartando, portanto, as séries da SUDENE apesar do seu tamanho em algumas estações. A distribuição espacial das estações pluviométricas empregadas no estudo pode ser visualizada na Figura 64.

Tabela 12 – Estações pluviométricas utilizadas no estudo

Código	Nome (Continua)	Sub-bacia	Entidade	Latitude (*)	Longitude (*)	Série (anos)
18	Pesqueira	49	HIDROMET-ITEP	-8° 21' 11,2"	-36° 41' 49,9"	75
19	Garanhuns	39	HIDROMET-ITEP	-8° 52' 59,9"	-36° 29' 16,1"	57
20	Belo Jardim	39	HIDROMET-ITEP	-8° 20' 12,1"	-36° 25' 31,1"	42
21	São Bento do Una (IPA)	39	HIDROMET-ITEP	-8° 31' 37,9"	-36° 27' 33,8"	49
24	Caruaru (IPA)	39	HIDROMET-ITEP	-8° 14' 17,9"	-35° 54' 56,9"	53
25	Palmares	39	HIDROMET-ITEP	-8° 40' 41,9"	-35° 34' 46,9"	79
53	Canhotinho	39	HIDROMET-ITEP	-8° 52' 57,0"	-36° 11' 37,0"	31
58	Gravatá	39	HIDROMET-ITEP	-8° 12' 02,2"	-35° 32' 35,2"	61
102	Rio Formoso (Usina Cucau)	39	HIDROMET-ITEP	-8° 38' 22,9"	-35° 16' 05,9"	40
103	Cortês	39	HIDROMET-ITEP	-8° 30' 10,1"	-35° 30' 51,8"	49
104	Barra de Guabiraba	39	HIDROMET-ITEP	-8° 25' 08,0"	-35° 39' 34,9"	37
106	Barreiros	39	HIDROMET-ITEP	-8° 48' 45,0"	-35° 11' 25,1"	46
109	Ribeirão (Fazenda Capri)	39	HIDROMET-ITEP	-8° 30' 36,0"	-35° 22' 36,8"	35
111	Sirinhaém	39	HIDROMET-ITEP	-8° 37' 09,8"	-35° 07' 09,8"	42
114	Sanharó	39	HIDROMET-ITEP	-8° 21' 50,0"	-36° 33' 59,0"	49
116	Altinho	39	HIDROMET-ITEP	-8° 29' 26,2"	-36° 03' 34,9"	37
119	Ibirajuba	39	HIDROMET-ITEP	-8° 34' 58,1"	-36° 10' 40,1"	39
121	Panelas	39	HIDROMET-ITEP	-8° 39' 47,9"	-36° 00' 28,1"	64
122	São Caetano	39	HIDROMET-ITEP	-8° 19' 41,9"	-36° 08' 15,0"	57
123	São Joaquim do Monte	39	HIDROMET-ITEP	-8° 25' 58,1"	-35° 48' 47,9"	37
125	Cachoeirinha	39	HIDROMET-ITEP	-8° 28' 50,2"	-36° 14' 13,9"	40
126	Jurema	39	HIDROMET-ITEP	-8° 43' 05,2"	-36° 08' 12,8"	42

Código	Nome (Conclusão)	Sub-bacia	Entidade	Latitude ^(*)	Longitude ^(*)	Série (anos)
128	Lajedo	39	HIDROMET-ITEP	-8° 39' 20,2"	-36° 19' 04,1"	42
140	Alagoinha	49	HIDROMET-ITEP	-8° 27' 58,0"	-36° 46' 26,0"	45
153	Saloá	49	HIDROMET-ITEP	-8° 58' 09,8"	-36° 41' 30,1"	44
154	Paranatama	49	HIDROMET-ITEP	-8° 55' 09,1"	-36° 39' 29,9"	41
157	Jucati	39	HIDROMET-ITEP	-8° 42' 24,1"	-36° 29' 34,1"	43
208	Pedra (São Pedro do Cordeiro)	49	HIDROMET-ITEP	-8° 51' 45,0"	-36° 56' 34,1"	43
223	Belo Jardim (Serra do Vento)	39	HIDROMET-ITEP	-8° 13' 34,0"	-36° 21' 43,9"	43
286	Caetés	39	HIDROMET-ITEP	-8° 46' 22,1"	-36° 37' 16,0"	35
393	Gameleira	39	HIDROMET-ITEP	-8° 34' 54,1"	-35° 23' 16,1"	40
511	Xexeu	39	HIDROMET-ITEP	-8° 50' 17,9"	-35° 38' 04,9"	30
00835106	Caruaru	39	ANA-CPRM	-8° 17' 57,1"	-36° 00' 10,1"	32
00836043	Sanharó	39	ANA-CPRM	-8° 21' 56,2"	-36° 33' 37,1"	48

(*) Coordenadas geográficas com Datum horizontal WGS84.

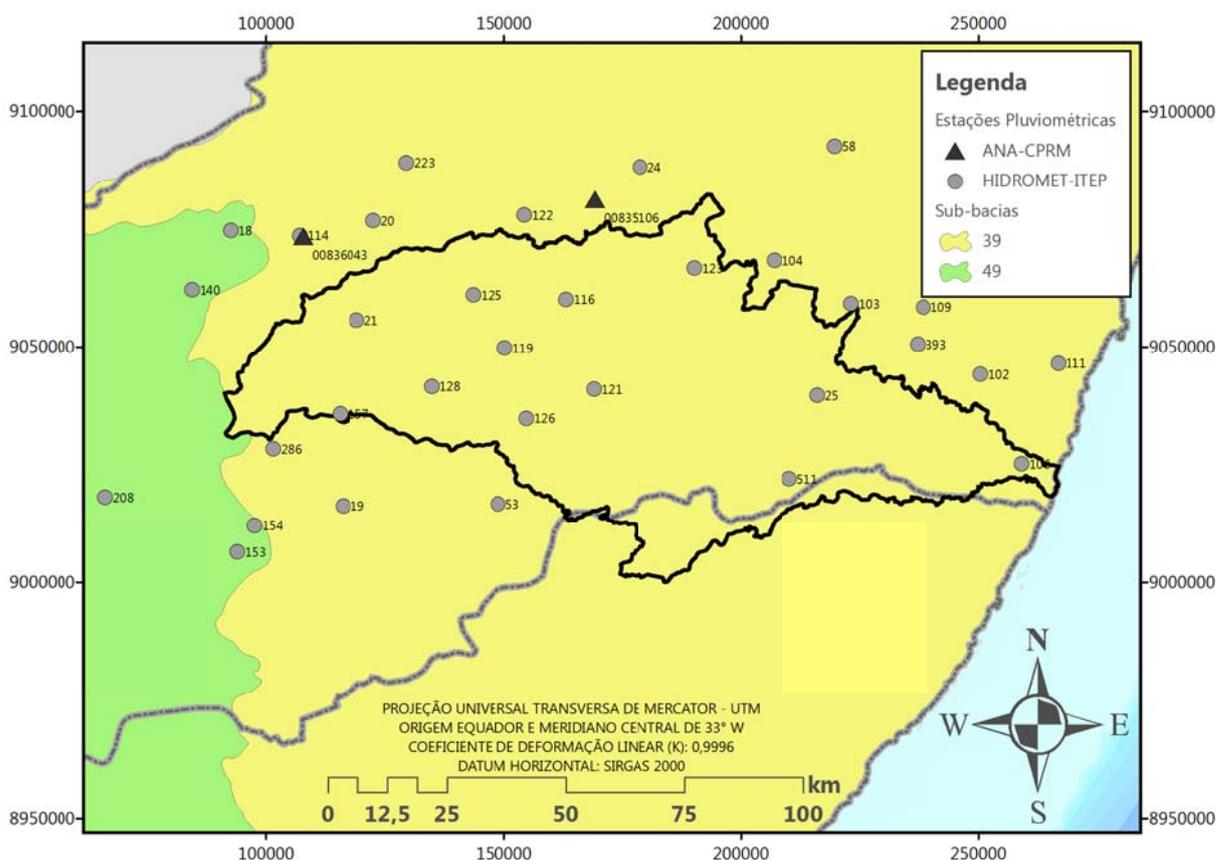


Figura 64 – Localização das estações pluviométricas da análise de precipitações.

Primeiramente foi feita uma análise regional de consistência dos dados que se baseou nas técnicas usuais de análise de consistência e no uso da estatística auxiliar de medida de discordância (D_j). Os resultados mostraram valores de D_j inferiores a 3,0 de acordo com a Tabela 1 (item 2.4.1.2.1.1), indicando que as amostras não apresentam características estatísticas muito discrepantes das grupais. A seguir

buscou-se a delimitação das regiões estatisticamente homogêneas, ou seja, aquelas contendo estações que tenham séries oriundas de populações regidas pela mesma distribuição de probabilidades. Inicialmente as regiões homogêneas foram divididas de forma subjetiva, considerando as características de relevo e os processos formadores das precipitações. A seguir foram grafadas as curvas empíricas adimensionais para verificação das regiões. O fator de adimensionalização utilizado foi a *média* de cada série. A definição final das regiões foi realizada utilizando as sub-rotinas descritas por Hosking (1991) [37], que permitiram o cálculo da *medida de heterogeneidade (H)* das regiões. Os resultados obtidos comprovam que as regiões podem ser consideradas, segundo o critério de Hosking e Wallis (1993) [39], “aceitavelmente homogêneas”, pois a medida de heterogeneidade de todas é inferior a 1 (item 2.4.1.2.2.1). Assim, foi considerada apenas **uma região homogênea**, que foi a mesma para todas as análises de cada duração considerada. A Figura 65 apresenta o mapa com a configuração final da região homogênea considerada.

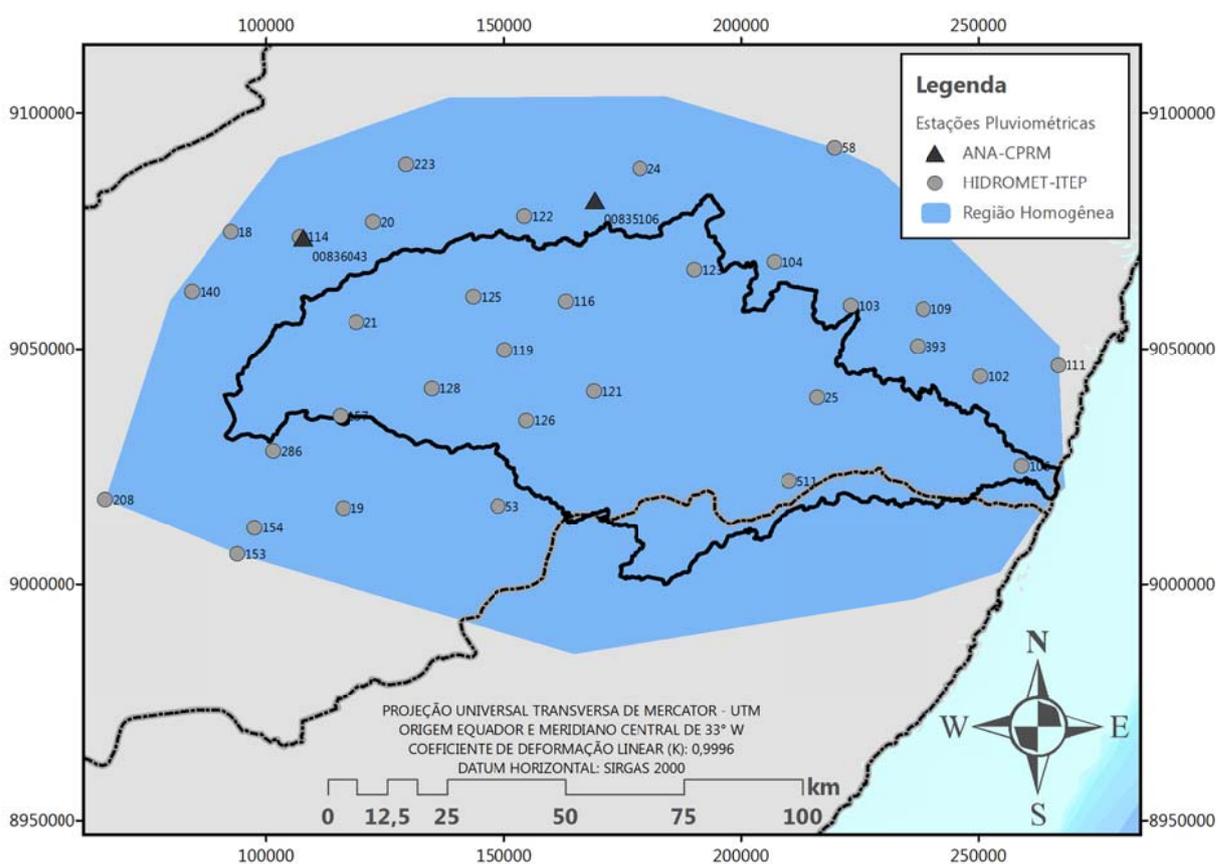


Figura 65 – Região homogênea da análise de precipitações.

Na Tabela 13 podem ser visualizados os valores da *medida de heterogeneidade (H)*, e as *razões-L regionais*.

A seleção da distribuição de frequência regional foi efetuada com as sub-rotinas descritas por Hosking (1991) [37]. Esse programa faz o ajuste das distribuições *Logística Generalizada (LG)*, *Generalizada de Valores Extremos (GEV)*, *Log-Normal (LN-3P)* ou *Generalizada Normal, Pearson tipo III (P-III)* e *Generalizada de Pareto (GP)*, estimando os seus parâmetros a partir dos *momentos-L regionais*, além de aplicar o *teste de aderência* (item 2.4.1.2.3.1) para verificar o ajuste entre a distribuição candidata e os dados regionais.

A definição da distribuição regional foi realizada a partir dos resultados do *teste de aderência* e pelo posicionamento dos valores regionais no diagrama *Curtose-L x Assimetria-L*, ilustrado na Figura 66. A distribuição selecionada foi a GEV para todas as análises de cada duração considerada. Os resultados das *medidas de aderência (Z)*, a distribuição selecionada para cada duração e os seus parâmetros também estão na Tabela 13.

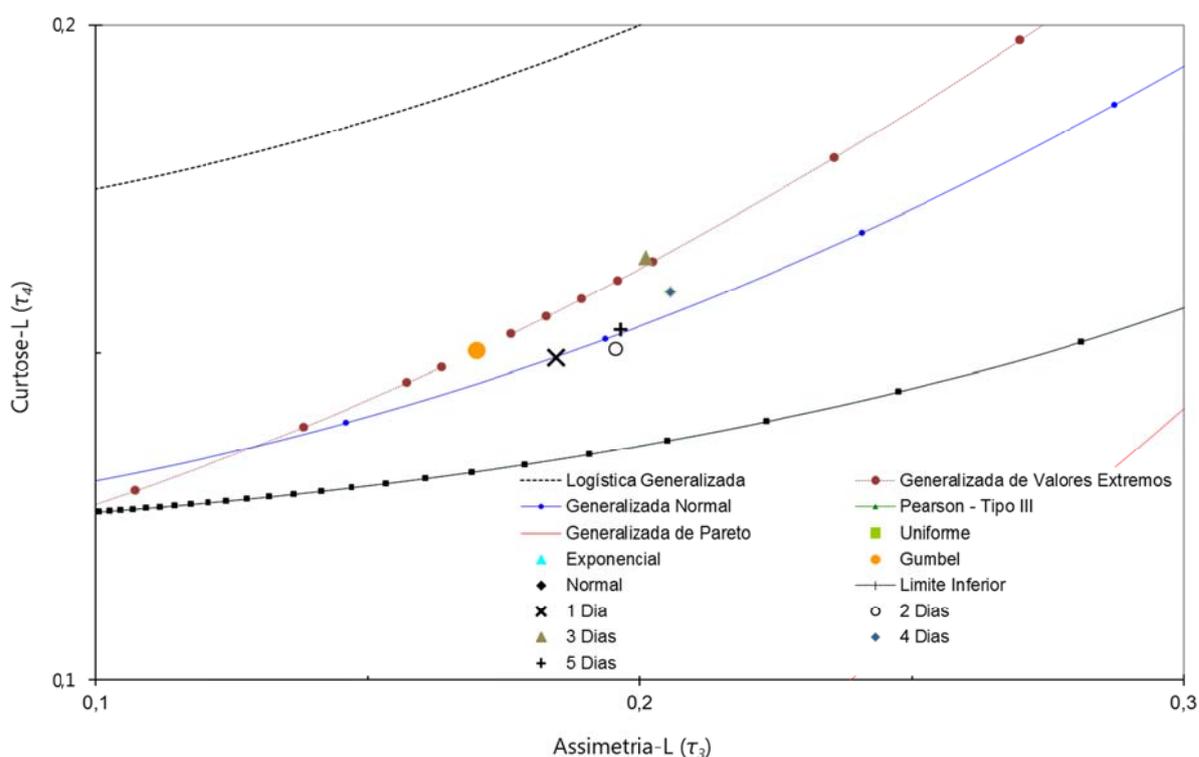


Figura 66 – Diagrama Curtose-L x Assimetria-L.

Tabela 13 – Distribuições selecionadas na análise de precipitações

Duração	Número de estações	CV-L (t_2^R)	Assimetria-L (t_3^R)	Curtose-L (t_4^R)	H	Z	Distribuição	Posição (ξ)	Escala (α)	Forma (κ)
1 dia	33	0,2142	0,1846	0,1493	0,91	0,52	GEV	0,818	0,302	-0,02282
2 dias	28	0,2201	0,1955	0,1506	-0,83	0,77	GEV	0,811	0,306	-0,03961
3 dias	32	0,2237	0,2013	0,1645	-1,27	-0,28	GEV	0,807	0,308	-0,04848
4 dias	30	0,2274	0,2057	0,1593	-1,71	0,38	GEV	0,803	0,311	-0,05519
5 dias	34	0,2254	0,1965	0,1535	0,17	0,56	GEV	0,806	0,313	-0,04114

Sendo a função densidade de probabilidade da distribuição GEV expressa por:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{\alpha} \left(1 - \kappa \left(\frac{x-\xi}{\alpha}\right)\right)^{1/\kappa-1} \exp\left(-\left(1 - \kappa \left(\frac{x-\xi}{\alpha}\right)\right)^{1/\kappa}\right), & \kappa \neq 0 \\ \frac{1}{\alpha} \exp\left(-\frac{x-\xi}{\alpha} - \exp\left(-\frac{x-\xi}{\alpha}\right)\right), & \kappa = 0 \end{cases} \quad (4.2)$$

Portanto, a função de probabilidades acumuladas da distribuição GEV é dada por:

$$F(x) = \begin{cases} \exp\left(-\left(1 - \kappa \left(\frac{x-\xi}{\alpha}\right)\right)^{1/\kappa}\right), & \kappa \neq 0 \\ \exp\left(-\exp\left(-\left(\frac{x-\xi}{\alpha}\right)\right)\right), & \kappa = 0 \end{cases} \quad (4.3)$$

Assim, a função de quantis, a partir da inversa da GEV, é:

$$x(F) = \begin{cases} \xi + \frac{\alpha}{\kappa} (1 - (-\ln(F))^\kappa), & \kappa \neq 0 \\ \xi - \alpha \ln(-\ln(F)), & \kappa = 0 \end{cases} \quad (4.4)$$

onde,

$$F(x) = P(X \leq x) \therefore F(x) = 1 - P(X > x) \therefore F(x) = 1 - \frac{1}{Tr(anos)} \quad (4.5)$$

com Tr , o tempo de retorno, em anos do quantil desejado, e ξ, α, κ são, respectivamente, os parâmetros de posição, escala e forma da distribuição *Generalizada de Eventos Extremos* (NAGUETTINI; PINTO, 2007, p.453) [56].

4.2.1.1. CLASSIFICAÇÃO SPI DOS EVENTOS DE PRECIPITAÇÃO

A região em estudo foi dividida em apenas uma região homogênea para a aplicação do *método index-flood*, utilizando os *momentos-L* e as *estatísticas-L* proposta por Hosking e Wallis (1993 [39] e 1995 [38]) para todas as análises de cada duração considerada.

Na região homogênea foi ajustada a distribuição GEV em cada duração considerada para cálculo dos quantis adimensionais. O cálculo dos quantis absolutos é obtido multiplicando-se o quantil adimensional pelo fator de adimensionalização, ou seja, após a determinação dos parâmetros das distribuições, foram estimados os quantis regionais adimensionais associados aos períodos de retorno apresentados na Tabela 3 (item 2.4.2), a partir das Equações 4.4 e 4.5. Estes valores para cada duração estão apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 – Quantis regionais adimensionalizados na análise de precipitações

Duração	Tempo de Retorno (anos)							
	~1	2	6,3	15	44	50	100	250 ^(*)
1 dia	0,259496	0,929765	1,360293	1,651593	2,009717	2,052712	2,285400	2,597482
2 dias	0,254899	0,923971	1,367015	1,672626	2,054759	2,101111	2,353718	2,697152
3 dias	0,251077	0,920657	1,371220	1,685200	2,081331	2,129641	2,393898	2,755762
4 dias	0,245058	0,917758	1,375941	1,697700	2,106401	2,156448	2,430973	2,808947
5 dias	0,238419	0,921779	1,375544	1,689101	2,081777	2,129452	2,389437	2,743341

^(*) Estimativa de quantil máxima recomendada ($\sim 3n$) para o tamanho da maior série utilizada (n).

Assim, a partir dos quantis regionais adimensionalizados é possível calcular os quantis associados a vários períodos de retorno em cada estação através da Equação 2.51.

A Tabela 15 apresenta os valores das precipitações do limiar inferior da classe de chuva extrema da Tabela 3 (item 2.4.2) para a duração de 5 dias. Os valores foram obtidos através da Equação 2.51 utilizando o quantil adimensional associado ao tempo de retorno de 44 anos e o fator de adimensionalização (média) de cada série. Dessa forma, é possível estimar os limiares das classes de precipitação de qualquer posto pluviométrico inserido na região homogênea desde que se estime o fator de adimensionalização. Neste estudo adotou-se o critério de se calcular o fator de adimensionalização (*index-flood*) para postos pluviométricos com no mínimo 15 anos de dados na região homogênea. Assim, foi possível estimar os limiares das classes de precipitação para 108 estações indicadas na Figura 67.

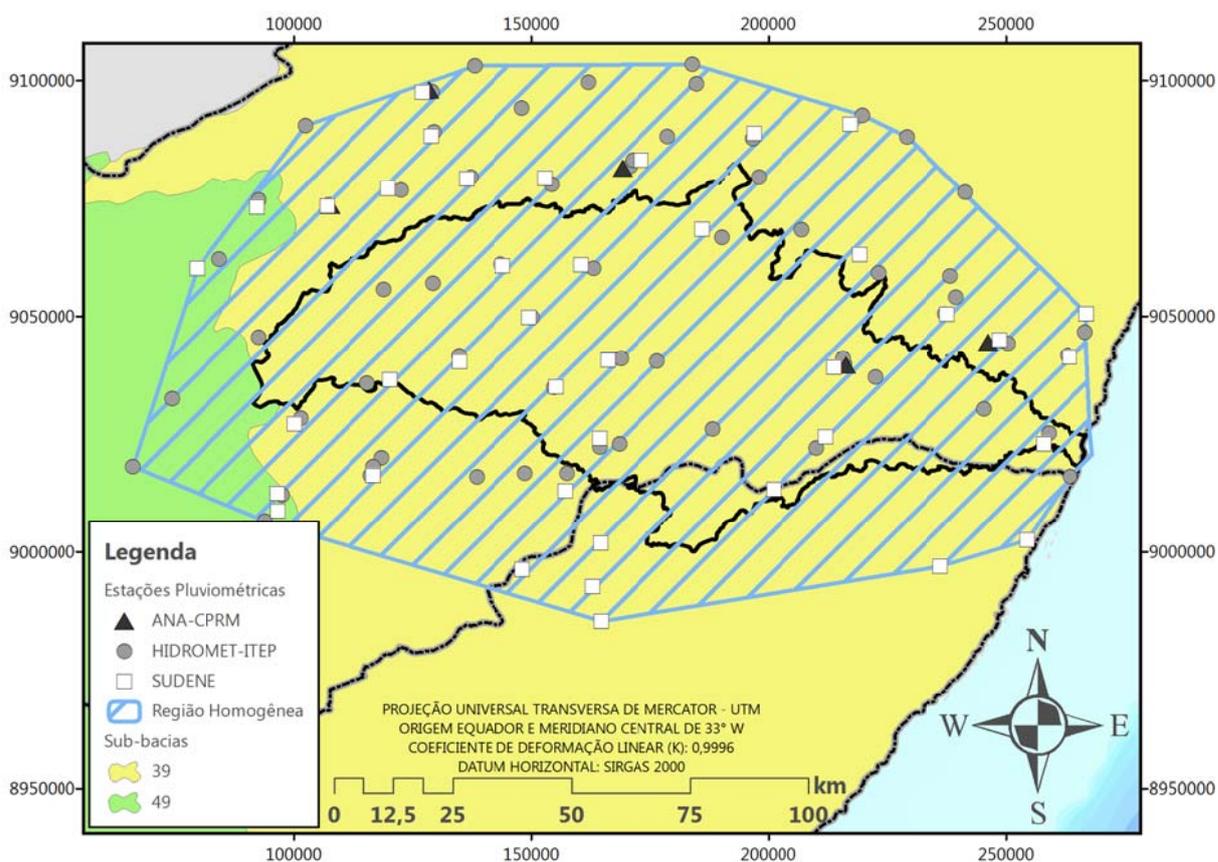


Figura 67 – Estações pluviométricas utilizadas no cálculo do fator *index-flood*.

Tabela 15 – Limite inferior da classe de *Chuva Extrema* para duração de 5 dias

Código	Nome (Continua)	SB	Entidade	Série (anos)	index-flood (mm)	Limite inferior (mm)
18	Pesqueira	49	HIDROMET-ITEP	75	116,64	242,82
19	Garanhuns	39	HIDROMET-ITEP	57	100,51	209,23
20	Belo Jardim	39	HIDROMET-ITEP	42	113,56	236,42
21	São Bento do Una (IPA)	39	HIDROMET-ITEP	49	110,43	229,88
24	Caruaru (IPA)	39	HIDROMET-ITEP	53	91,60	190,70
25	Palmares	39	HIDROMET-ITEP	79	159,83	332,73
52	Angelim	39	HIDROMET-ITEP	19	90,36	188,12
53	Canhotinho	39	HIDROMET-ITEP	31	101,61	211,53
55	Rio Formoso	39	HIDROMET-ITEP	54	225,33	469,08
56	Riacho das Almas	39	HIDROMET-ITEP	18	85,13	177,22
58	Gravatá	39	HIDROMET-ITEP	61	94,45	196,63
67	Bezerros	39	HIDROMET-ITEP	36	92,46	192,48
68	Brejo da Madre de Deus	39	HIDROMET-ITEP	80	115,90	241,27
80	Água Preta	39	HIDROMET-ITEP	19	145,08	302,02
85	Caruaru	39	HIDROMET-ITEP	21	97,11	202,16
102	Rio Formoso (Usina Cucau)	39	HIDROMET-ITEP	40	211,50	440,30
103	Cortês	39	HIDROMET-ITEP	49	183,89	382,81
104	Barra de Guabiraba	39	HIDROMET-ITEP	37	141,39	294,35
106	Barreiros	39	HIDROMET-ITEP	46	221,11	460,30
108	Primavera	39	HIDROMET-ITEP	18	201,02	418,47
109	Ribeirão (Fazenda Capri)	39	HIDROMET-ITEP	35	171,13	356,26
110	São José da Coroa Grande	39	HIDROMET-ITEP	18	203,63	423,91
111	Sirinhaém	39	HIDROMET-ITEP	42	235,33	489,91
113	Brejo da Madre de Deus (Fazenda Nova)	39	HIDROMET-ITEP	28	98,19	204,40
114	Sanharó	39	HIDROMET-ITEP	49	122,46	254,94
116	Altinho	39	HIDROMET-ITEP	37	94,35	196,41
117	Chã Grande	39	HIDROMET-ITEP	15	129,51	269,62
119	Ibirajuba	39	HIDROMET-ITEP	39	98,04	204,10
121	Panelas	39	HIDROMET-ITEP	64	81,23	169,11
122	São Caetano	39	HIDROMET-ITEP	57	87,49	182,14
123	São Joaquim do Monte	39	HIDROMET-ITEP	37	105,08	218,74
125	Cachoeirinha	39	HIDROMET-ITEP	40	96,68	201,27
126	Jurema	39	HIDROMET-ITEP	42	103,12	214,67
128	Lajedo	39	HIDROMET-ITEP	42	95,89	199,61
140	Alagoinha	49	HIDROMET-ITEP	45	111,14	231,36
153	Saloá	49	HIDROMET-ITEP	44	107,14	223,05
154	Paranatama	49	HIDROMET-ITEP	41	108,46	225,79
157	Jucati	39	HIDROMET-ITEP	43	108,79	226,48
188	São Benedito do Sul	39	HIDROMET-ITEP	18	142,59	296,84
200	Quipapá	39	HIDROMET-ITEP	30	104,19	216,89
208	Pedra (São Pedro do Cordeiro)	49	HIDROMET-ITEP	43	90,45	188,30
214	Canhotinho (Paquevira)	39	HIDROMET-ITEP	28	104,54	217,63
221	Pesqueira (Lagoa do Felix)	39	HIDROMET-ITEP	27	104,78	218,12
223	Belo Jardim (Serra do Vento)	39	HIDROMET-ITEP	43	115,81	241,08
237	Tacaimbó	39	HIDROMET-ITEP	35	101,58	211,46

Código	Nome (Continua)	SB	Entidade	Série (anos)	index-flood (mm)	Limite inferior (mm)
282	Camocim de São Felix	39	HIDROMET-ITEP	15	109,24	227,41
284	Catende (Usina Catende)	39	HIDROMET-ITEP	26	159,08	331,17
286	Caetés	39	HIDROMET-ITEP	35	99,44	207,01
316	Maraial	39	HIDROMET-ITEP	29	135,69	282,47
326	Garanhuns	39	HIDROMET-ITEP	36	106,13	220,93
366	Riacho das Almas (Barriguda)	39	HIDROMET-ITEP	28	99,18	206,46
371	Brejo Madre de Deus (Mandacaia)	39	HIDROMET-ITEP	30	100,94	210,13
386	São Bento do Una	39	HIDROMET-ITEP	67	97,96	203,92
389	Caruaru (Carapotos)	39	HIDROMET-ITEP	29	96,67	201,24
393	Gameleira	39	HIDROMET-ITEP	40	203,63	423,91
403	Quipapa	39	HIDROMET-ITEP	26	92,95	193,49
412	Caruaru	39	HIDROMET-ITEP	48	91,74	190,99
423	Pedra (Tará)	49	HIDROMET-ITEP	54	94,88	197,53
435	Pesqueira (Salobro)	39	HIDROMET-ITEP	32	105,22	219,04
444	Gameleira	39	HIDROMET-ITEP	20	172,79	359,71
461	Garanhuns	39	HIDROMET-ITEP	28	118,96	247,65
510	Tamandaré	39	HIDROMET-ITEP	23	181,98	378,84
511	Xexeu	39	HIDROMET-ITEP	30	141,81	295,22
00835106	Caruaru	39	ANA-CPRM	32	84,68	176,27
00835140	Engenho Mato Grosso	39	ANA-CPRM	23	201,02	418,48
00835141	Palmares	39	ANA-CPRM	21	153,29	319,11
00836043	Sanhoro	39	ANA-CPRM	48	111,21	231,52
00836092	Brejo da Madre de Deus	39	ANA-CPRM	26	115,68	240,81
3866762	Pesqueira	49	SUDENE	58	110,04	229,07
3866788	Sanhoro	39	SUDENE	30	125,36	260,96
3866939	Alagoinha	49	SUDENE	30	118,15	245,97
3867324	Brejo da Madre de Deus	39	SUDENE	74	119,69	249,18
3867429	Serra do Vento	39	SUDENE	28	113,06	235,37
3867613	Belo Jardim	39	SUDENE	25	117,92	245,48
3867642	Tacaimbo	39	SUDENE	29	103,84	216,17
3867672	S. Caitano	39	SUDENE	43	88,15	183,51
3867956	Cachoeirinha	39	SUDENE	28	93,93	195,54
3867986	Altinho	39	SUDENE	25	100,56	209,34
3868453	Bezerros	39	SUDENE	28	100,85	209,95
3868488	Gravata	39	SUDENE	47	92,28	192,10
3868509	Caruaru	39	SUDENE	47	92,10	191,73
3868832	S. Joaquim do Monte	39	SUDENE	25	111,26	231,63
3868992	Cortes	39	SUDENE	31	185,24	385,63
3876576	Caetes	39	SUDENE	27	97,19	202,32
3876868	Paranatama	49	SUDENE	27	114,57	238,51
3876967	Saloa	49	SUDENE	30	111,86	232,86
3877166	Ibirajuba	39	SUDENE	27	104,23	216,98
3877338	Lajedo	39	SUDENE	30	103,94	216,37
3877395	Panelas	39	SUDENE	51	84,13	175,13
3877411	Jucati	39	SUDENE	30	113,94	237,19
3877475	Jurema	39	SUDENE	30	107,96	224,74

Código	Nome (Conclusão)	SB	Entidade	Série (anos)	index-flood (mm)	Limite inferior (mm)
3877692	Quipapa	39	SUDENE	26	107,05	222,85
3877706	Garanhuns	39	SUDENE	38	105,99	220,64
3877878	Paquevira	39	SUDENE	27	104,02	216,54
3878383	Palmares	39	SUDENE	62	156,43	325,65
3878678	Xexeu	39	SUDENE	22	137,54	286,33
3878858	Colonia Leopoldina	39	SUDENE	22	153,82	320,22
3879126	Gameleira	39	SUDENE	27	208,21	433,46
3879179	Sirinhaem	39	SUDENE	23	244,68	509,37
3879246	Cucau	39	SUDENE	21	204,10	424,89
3879372	Rio Formoso	39	SUDENE	42	228,42	475,52
3879663	Barreiros	39	SUDENE	27	199,80	415,95
3887092	S. Jose Da Lage	39	SUDENE	23	127,21	264,83
3887162	Munguba	39	SUDENE	25	229,44	477,65
3887287	Rocha Cavalcanti	39	SUDENE	20	172,99	360,12
3887392	Uniao dos Palmares	39	SUDENE	71	130,29	271,24
3889055	Maragogi	39	SUDENE	30	169,81	353,50
3889122	Porto Calvo	39	SUDENE	53	172,52	359,14

Assim, como descrito no item 2.4.2, também foram calculados, para cada estação pluviométrica, os limites das classes para classificação das precipitações diárias acumuladas máximas anuais para todas as durações consideradas em *Chuva Fraca* (CF), *Chuva Leve* (CL), *Chuva Moderada* (CM), *Chuva Severa* (CS) e *Chuva Extrema* (CE). A Figura 68 ilustra um exemplo com a classificação SPI da serie de precipitações diárias acumuladas máximas anuais de 1 dia de duração da estação Palmares, código 25, da HIDROMET-ITEP, com seus limites dispostos na Tabela 16. E a Figura 69 um exemplo da espacialização da classificação SPI das precipitações diárias acumuladas máximas anuais de 5 dias de duração que geraram o evento de 2010.

Tabela 16 – Limites das classes para duração de 1 dia da estação Palmares (25)

	Chuva Fraca (CF)		Chuva Leve (CL)		Chuva Moderada (CM)		Chuva Severa (CS)		Chuva Extrema (CE)	
	Inf.	Sup.	Inf.	Sup.	Inf.	Sup.	Inf.	Sup.	Inf.	Sup.
SPI		0,0	0,0	1,0	1,0	1,5	1,5	2,0	2,0	
$P(X \leq x)$		0,5000	0,5000	0,8413	0,8413	0,9332	0,9332	0,9772	0,9772	
Tr (anos)		2,0	2,0	6,3	6,3	15,0	15,0	44,0	44,0	
Precipitação (mm)		75,59	75,59	110,59	110,59	134,27	134,27	163,38	163,38	

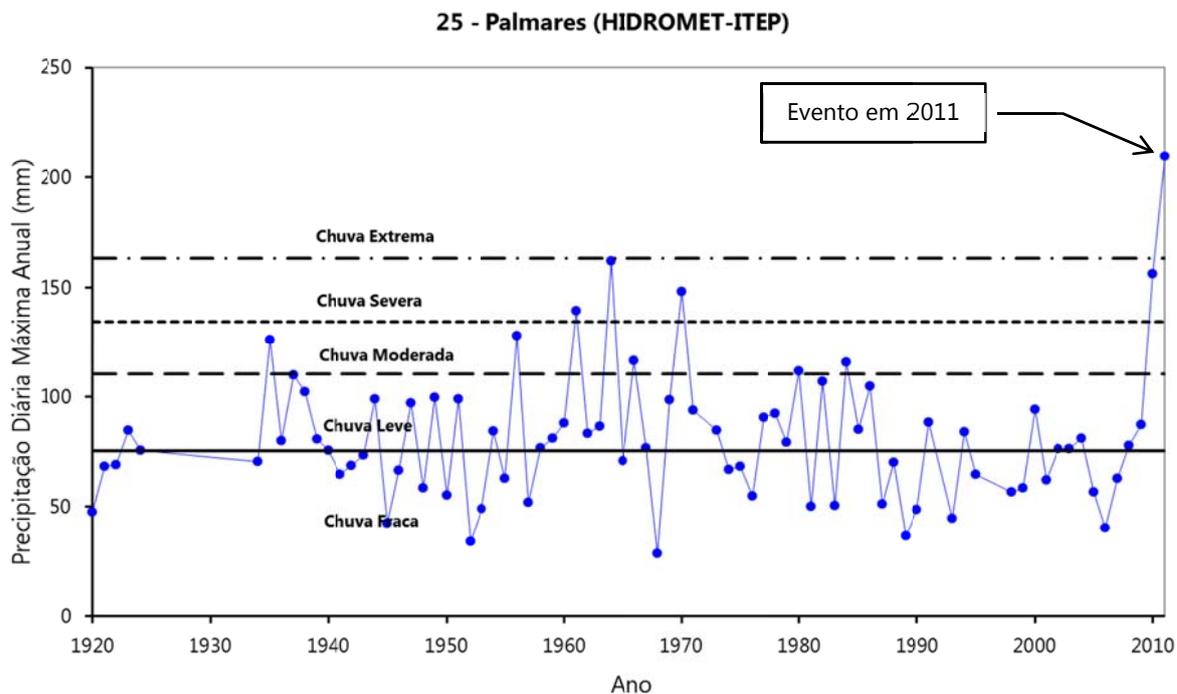


Figura 68 – Classificação SPI para duração de 1 dia da série da estação Palmares (25).

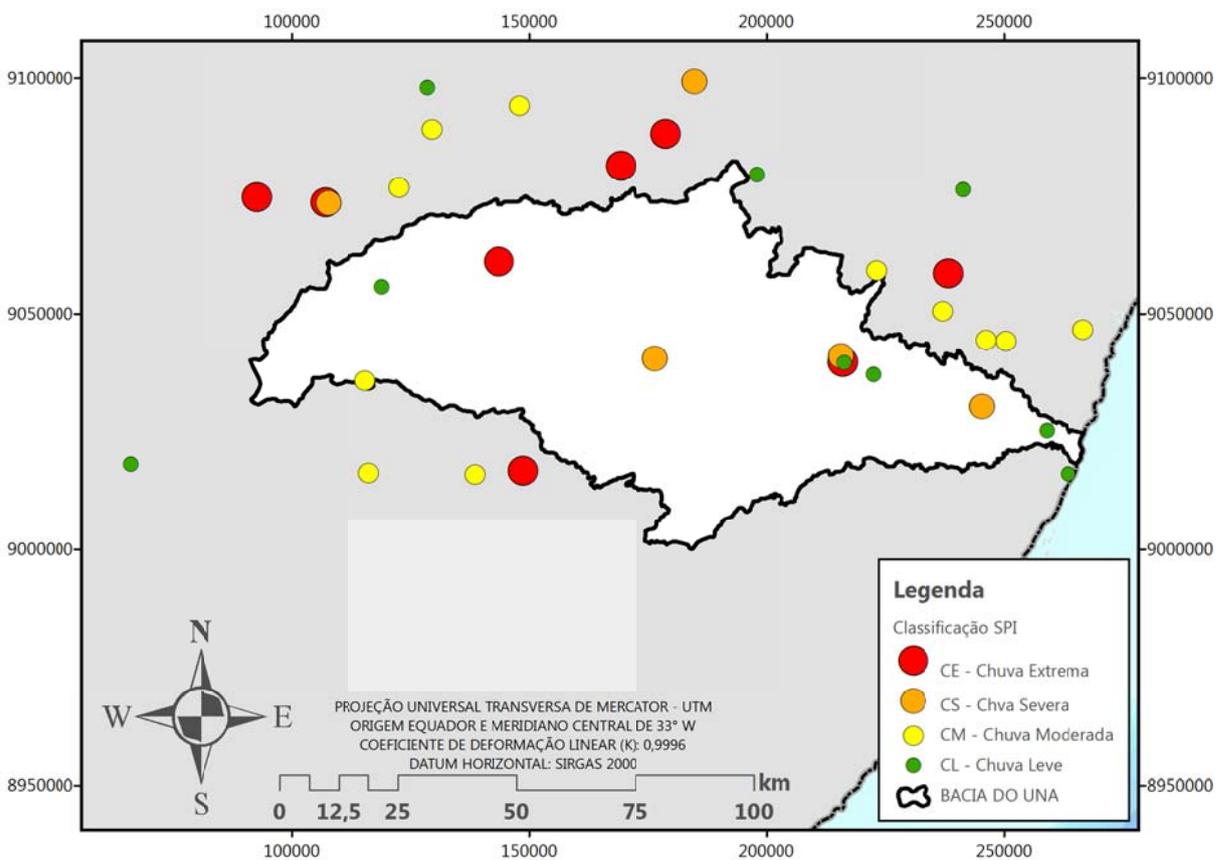


Figura 69 – Classificação SPI para chuva de duração de 5 dias do evento de 2010.

O uso da análise de frequência regional para a definição dos limiares das classes permite a utilização de séries com tamanhos menores do que as preconizadas para a aplicação do SPI, pois a análise regional de frequência representa uma alternativa que procura compensar a insuficiente caracterização temporal do comportamento de eventos extremos por uma coerente caracterização espacial da variável hidrológica em questão.

A adaptação do SPI (MCKEE et al., 1993) [52], utilizando os resultados da análise de frequência regional, como proposto por Santos et al. (2011) [75], para a determinação dos limiares de chuva para diferentes classes para a classificação das precipitações diárias se apresenta como uma boa ferramenta de informação sobre as alturas de chuva ocorridas, uma vez que possibilita uma classificação qualitativa e probabilística simultaneamente. Assim, a informação qualitativa pode atender as necessidades de divulgação da informação para diferentes públicos e, ao mesmo tempo está associada às probabilidades de ocorrência, que atende aos profissionais de Hidrologia e Meteorologia.

4.2.2. ANÁLISE REGIONAL DE FREQUÊNCIAS DE VAZÕES

Neste estudo foram utilizadas as séries de vazões médias diárias organizadas por ano civil de 6 estações da bacia do rio Una listadas na Tabela 17 e na Tabela 9 (item 3.2.2.3). Para esta análise foram utilizadas as vazões médias diárias máximas anuais.

Tabela 17 – Estações fluviométricas utilizadas no estudo

Código	Nome	Sub-bacia	Mesorregiões	Série (anos)	<i>index-flood</i> (m³/s)
39530000	Cachoeirinha	39	Agreste Pernambucano	9	102,46
39540000	Capivara	39	Agreste Pernambucano	34	119,83
39550000	Catende	39	Mata Pernambucana	10	115,04
39560000	Palmares	39	Mata Pernambucana	42	340,18
39580000	Jacuípe	39	Mata Pernambucana	12	173,27
39590000	Barreiros	39	Mata Pernambucana	9	477,42

Da mesma forma que na análise de precipitações, na primeira etapa desta metodologia é feita uma análise de consistência de dados a partir de técnicas usuais e no uso da estatística auxiliar de medida de discordância (D_j). Os resultados da medida de discordância mostram que as amostras não apresentam características estatísticas muito discrepantes das grupais, uma vez que os valores de D_j são inferiores a 1,648.

Na segunda etapa é realizada a identificação prévia das regiões homogêneas considerando as características físicas. Então são calculadas as estatísticas locais, utilizando as sub-rotinas descritas por Hosking (1991) [37] que permitem o cálculo da *medida de heterogeneidade (H)* para verificar a hipótese de homogeneidade das regiões anteriormente definidas. De acordo com este teste de significância, a região da "Mata" apresentou o valor igual a 1,69, ou seja, um valor entre 1 e 2, indicando que é considerada "possivelmente heterogênea" segundo o critério de Hosking e Wallis (1993) [39], enquanto a região do "Agreste" apresentou o valor igual a -0,91, ou seja, um valor inferior a 1, indicando ser "aceitavelmente homogênea" segundo o mesmo critério do item 2.4.1.2.2.1. Assim para complementar esta análise, torna-se

necessária a visualização do comportamento em papel de probabilidades das curvas de frequência empíricas das séries adimensionalizadas através da média de cada série e o posicionamento dos valores regionais no diagrama $CV-L$ x $Assimetria-L$ (Figura 70). Portanto, apesar da medida de heterogeneidade, foram consideradas **duas regiões homogêneas** como resultado.

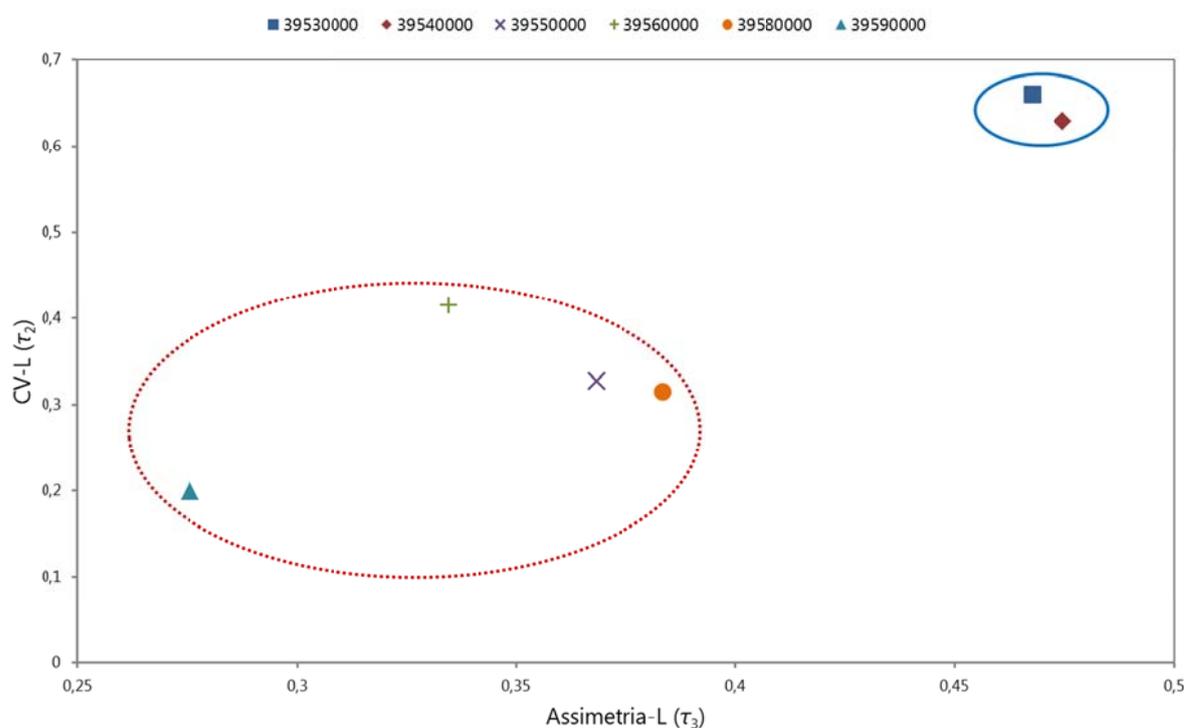


Figura 70 – Diagrama CV-L x Assimetria-L
(detalhe para a definição de uma região formada pelas estações no círculo pontilhado vermelho e uma região formada pelas estações no círculo contínuo azul).

Na terceira etapa é feita a seleção da função regional de distribuição de probabilidades. Da mesma forma, a seleção da distribuição de frequência regional foi efetuada com as sub-rotinas descritas por Hosking (1991) [37], que faz o ajuste das distribuições *Logística Generalizada* (LG), *Generalizada de Valores Extremos* (GEV), *Log-Normal* (LN-3P) ou *Generalizada Normal, Pearson tipo III* (P-III) e *Generalizada de Pareto* (GP), estimando os seus parâmetros a partir dos *momentos-L regionais*, além de aplicar o *teste de aderência* (Z) para verificar o ajuste entre a distribuição candidata e os dados regionais. Deve-se avaliar também o posicionamento dos valores

regionais no diagrama *Curtose-L x Assimetria-L*, ilustrado na Figura 72. A distribuição selecionada foi a LN-3P para as duas regiões consideradas.

A distribuição espacial das estações fluviométricas empregadas no estudo e a configuração final das regiões homogêneas consideradas podem ser visualizadas na Figura 71.

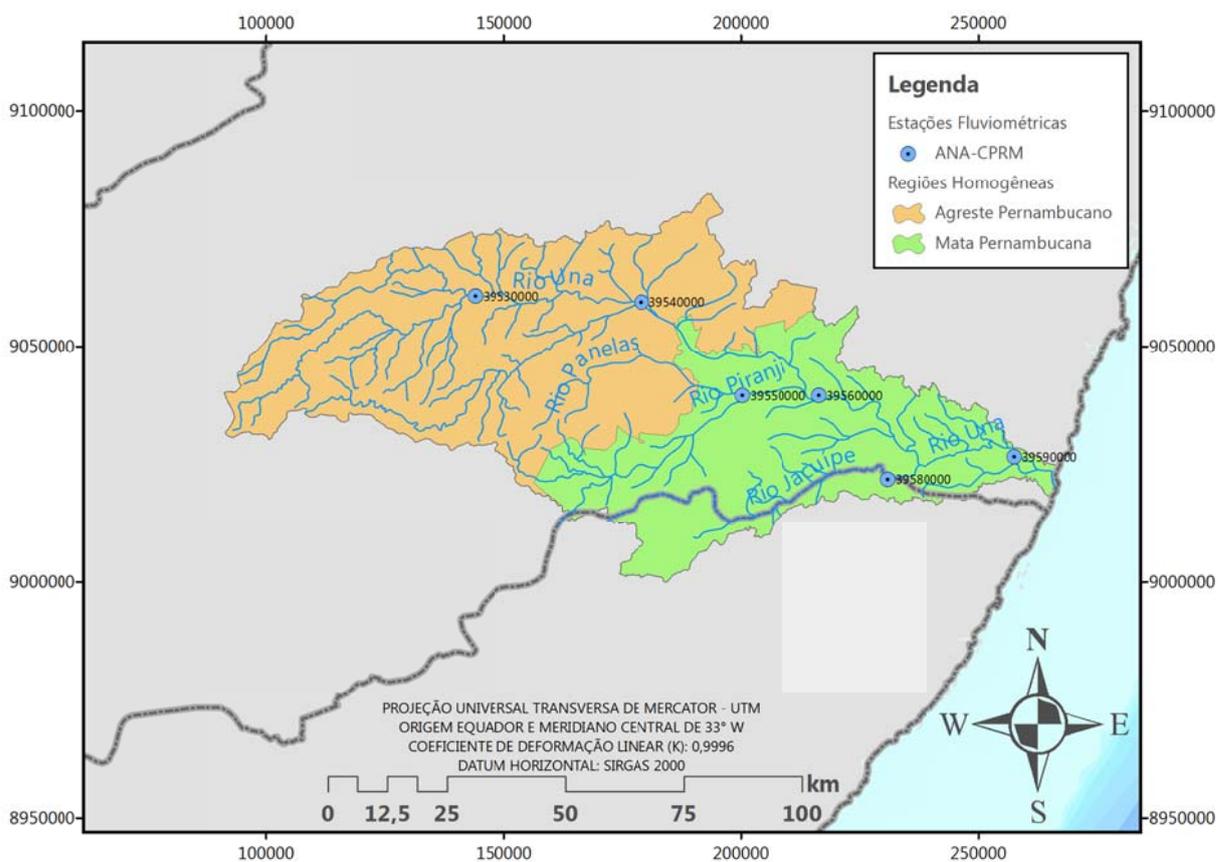


Figura 71 – Regiões homogêneas da análise de vazões.

Na quarta etapa é realizada a estimação de parâmetros e quantis das funções regionais de distribuição de probabilidades. Na

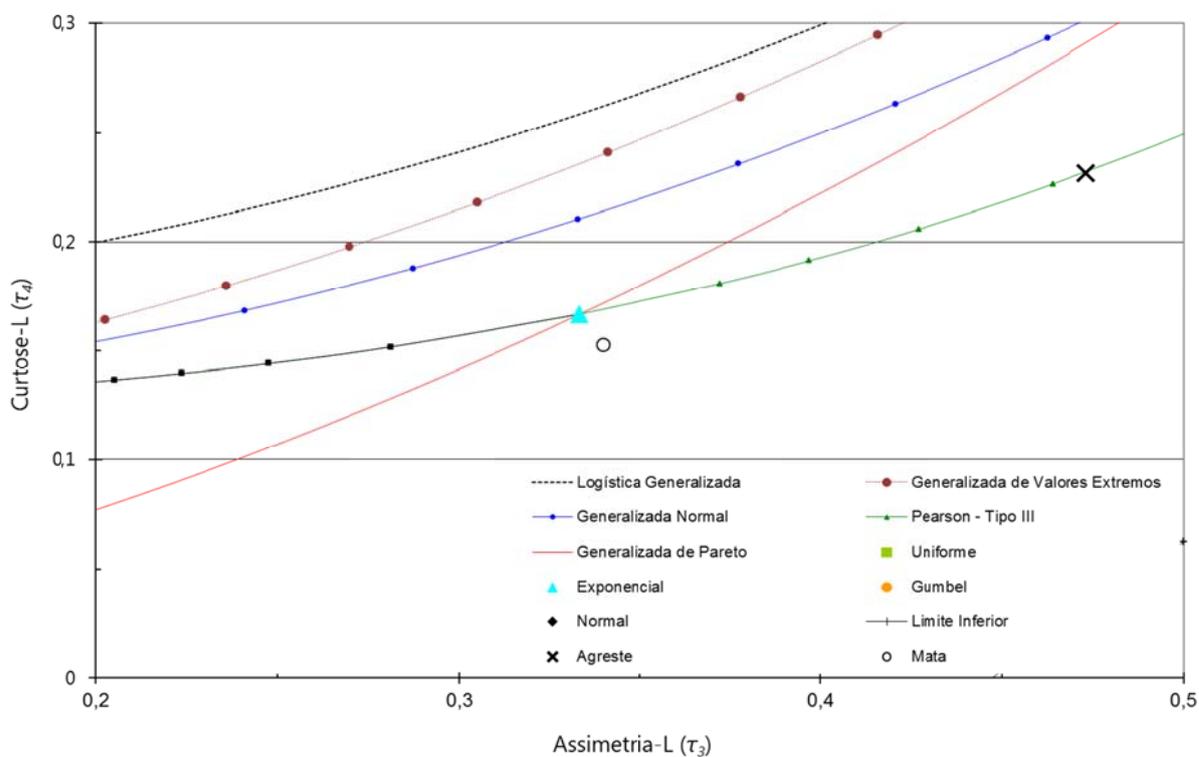


Figura 72 – Diagrama Curtose-L x Assimetria-L.

Tabela 18 estão listados os valores da *medida de heterogeneidade (H)* e da *medida de aderência (Z)*, as *razões-L regionais*, as distribuição selecionadas para cada região homogênea e os seus parâmetros.

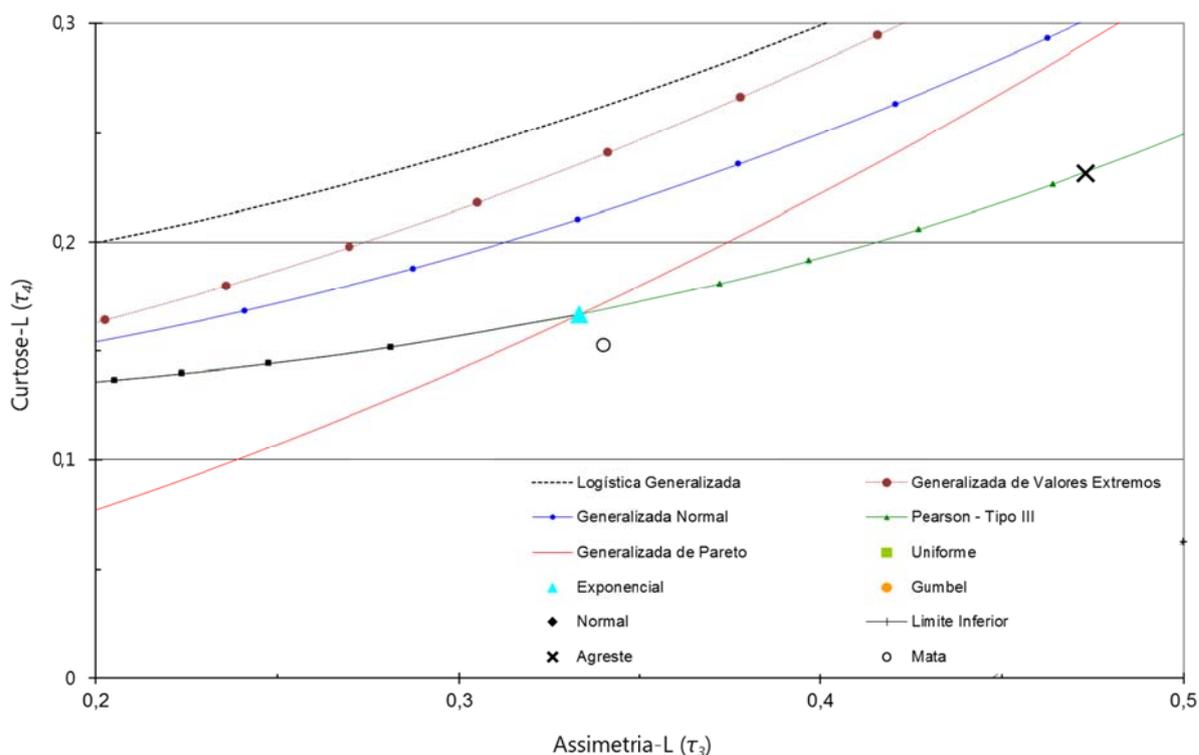


Figura 72 – Diagrama Curtose-L x Assimetria-L.

Tabela 18 – Distribuições selecionadas na análise de vazões

Região homog.	Número de estações	CV-L (t_2^R)	Assimetria-L (t_3^R)	Curtose-L (t_4^R)	H	Z	Distribuição	Posição (ξ)	Escala (α)	Forma (κ)
Agreste	2	0,6354	0,4733	0,2313	-0,91	0,62	LN-3P	0,511	0,724	-1,026
Mata	4	0,3596	0,3398	0,1526	1,69	1,01	LN-3P	0,790	0,515	-0,715

A função densidade de probabilidade da distribuição LN-3P é expressa por:

$$f(x) = \frac{\exp\left(\frac{\kappa y - y^2}{2}\right)}{\alpha\sqrt{2\pi}} \quad (4.6)$$

com,

$$y = \begin{cases} -\frac{1}{\kappa} \ln\left(1 - \kappa \frac{x+\xi}{\alpha}\right), & \kappa \neq 0 \\ \frac{x-\xi}{\alpha}, & \kappa = 0 \end{cases} \quad (4.7)$$

E a função de probabilidades acumuladas da distribuição LN-3P é dada por:

$$F(x) = \Phi(y) \quad (4.8)$$

na qual, Φ denota a *distribuição acumulada Normal padrão*.

A função inversa da LN-3P, ou seja, a *função de quantis* $x(F)$, não apresenta forma analítica explícita, porém, X é função da *variável normal central reduzida* Z , de acordo com a expressão:

$$X(Z) = \begin{cases} \xi + \alpha \frac{1 - \exp(-\kappa Z)}{\kappa}, & \kappa \neq 0 \\ \xi + \alpha Z, & \kappa = 0 \end{cases} \quad (4.9)$$

onde Z é dado por $z(\Phi)$ que é a função inversa de $\Phi(z)$, obtido a partir de tabelas ou aproximado pela seguinte expressão apresentada por Kite (1977 apud NAGUETTINI; PINTO, 2007, p.320) [56]:

$$Z \approx \begin{cases} -\left(W - \frac{C_0 + C_1 W + C_2 W^2}{1 + d_1 W + d_2 W^2 + d_3 W^3}\right), \text{ com } W = \sqrt{\ln\left(\frac{1}{\Phi(z)^2}\right)}, & \text{para } 0 \leq \Phi(z) \leq 0,5 \\ \left(W - \frac{C_0 + C_1 W + C_2 W^2}{1 + d_1 W + d_2 W^2 + d_3 W^3}\right), \text{ com } W = \sqrt{\ln\left(\frac{1}{(1 - \Phi(z))^2}\right)}, & \text{para } \Phi(z) > 0,5 \end{cases} \quad (4.10)$$

sendo $\Phi(z) = F(x) = P(X \leq x)$ a partir da Equação 4.5, as constantes $C_0 = 2,515517$, $C_1 = 0,802853$, $C_2 = 0,010328$, $d_1 = 1,432788$, $d_2 = 0,189269$, $d_3 = 0,001308$, e ξ, α, κ são, respectivamente, os parâmetros de posição, escala e forma da distribuição *Generalizada Normal* (NAGUETTINI; PINTO, 2007, p.452) [56].

Após a determinação dos parâmetros das distribuições, foram estimados os quantis regionais adimensionais associados a períodos de retorno a partir das Equações 4.5, 4.9 e 4.10 (Tabela 19). Assim, a partir dos quantis regionais adimensionalizados é possível calcular os quantis associados a vários períodos de retorno em cada estação através da Equação 2.51, ou seja, o cálculo dos quantis absolutos é obtido multiplicando-se o quantil adimensional pelo fator de adimensionalização, como apresentados na Tabela 20. A Tabela 21 apresenta as etapas de cálculo para os tempos de retorno das vazões médias diárias máximas anuais da estação Palmares com o uso das Equações 4.5, 4.9 e 4.10.

Tabela 19 – Quantis regionais adimensionalizados na análise de vazões

Região homog.	Tempo de Retorno (anos)							
	1,25	2	5	10	20	50	100	150 ^(*)
Agreste	0,103	0,511	1,479	2,433	3,621	5,609	7,482	8,745
Mata	0,464	0,790	1,384	1,870	2,405	3,197	3,871	4,296

(*) Estimativa de quantil máxima recomendada ($\sim 3n$) para o tamanho da maior série utilizada (n).

Tabela 20 – Quantis absolutos associados a tempos de retorno (m^3/s)

Região homog.	Código	Nome	<i>index-flood</i> (m^3/s)	Tempo de Retorno (anos)				
				5	10	50	100	150
Agreste	39530000	Cachoeirinha	102,46	151,51	249,33	574,71	766,62	895,97
Agreste	39540000	Capivara	119,83	177,20	291,59	672,15	896,58	1047,86
Mata	39550000	Catende	115,04	159,27	215,18	367,84	445,27	494,21
Mata	39560000	Palmares	340,18	470,97	636,29	1087,72	1316,69	1461,41
Mata	39580000	Jacuípe	173,27	239,89	324,09	554,03	670,65	744,37
Mata	39590000	Barreiros	477,42	660,97	892,99	1526,54	1847,88	2051,00

Tabela 21 – Série de vazões médias diárias máximas anuais da estação Palmares

Código	Nome	Data	<i>index-flood</i> (m^3/s)	Q (m^3/s)	Q	Z	$P(X \leq x)$	Tr (anos)
					<i>index - flood</i>	Eq. 4.9	Eq. 4.10	Eq. 4.5
39560000	Palmares	02/07/1967	340,18	219,00	0,644	-0,317	0,375	1,60
39560000	Palmares	20/07/1968	340,18	152,00	0,447	-0,905	0,183	1,22
39560000	Palmares	20/07/1969	340,18	605,00	1,778	1,208	0,887	8,81
39560000	Palmares	20/07/1970	340,18	832,00	2,446	1,669	0,952	21,04
39560000	Palmares	30/07/1971	340,18	87,40	0,257	-1,885	0,030	1,03
39560000	Palmares	03/06/1972	340,18	101,00	0,297	-1,614	0,053	1,06
39560000	Palmares	28/04/1973	340,18	135,00	0,397	-1,104	0,135	1,16
39560000	Palmares	08/07/1974	340,18	265,00	0,779	-0,022	0,491	1,97
39560000	Palmares	17/07/1975	340,18	1184,00	3,481	2,175	0,985	67,48
39560000	Palmares	06/10/1976	340,18	69,50	0,204	-2,346	0,009	1,01
39560000	Palmares	03/05/1977	340,18	706,00	2,075	1,432	0,924	13,15
39560000	Palmares	17/05/1978	340,18	217,00	0,638	-0,332	0,370	1,59
39560000	Palmares	04/07/1979	340,18	154,00	0,453	-0,883	0,189	1,23
39560000	Palmares	10/06/1980	340,18	368,00	1,082	0,476	0,683	3,15
39560000	Palmares	25/03/1981	340,18	545,00	1,602	1,056	0,854	6,87
39560000	Palmares	06/06/1982	340,18	355,00	1,044	0,422	0,663	2,97
39560000	Palmares	02/08/1983	340,18	105,00	0,309	-1,543	0,061	1,07
39560000	Palmares	20/07/1984	340,18	361,00	1,061	0,447	0,673	3,05
39560000	Palmares	15/04/1985	340,18	306,00	0,900	0,198	0,578	2,37
39560000	Palmares	17/07/1986	340,18	499,00	1,467	0,927	0,823	5,65
39560000	Palmares	05/07/1987	340,18	121,00	0,356	-1,292	0,098	1,11
39560000	Palmares	16/07/1988	340,18	592,00	1,740	1,177	0,880	8,36
39560000	Palmares	13/07/1989	340,18	661,00	1,943	1,337	0,909	11,03
39560000	Palmares	23/07/1990	340,18	246,00	0,723	-0,136	0,446	1,80
39560000	Palmares	18/08/1991	340,18	366,00	1,076	0,468	0,680	3,12
39560000	Palmares	01/04/1992	340,18	189,00	0,556	-0,551	0,291	1,41
39560000	Palmares	14/07/1993	340,18	81,50	0,240	-2,021	0,022	1,02
39560000	Palmares	09/07/1994	340,18	319,00	0,938	0,261	0,603	2,52
39560000	Palmares	03/07/1995	340,18	210,00	0,617	-0,383	0,351	1,54
39560000	Palmares	23/07/1996	340,18	176,33	0,518	-0,662	0,254	1,34
39560000	Palmares	25/05/1997	340,18	273,84	0,805	0,029	0,511	2,05
39560000	Palmares	25/04/1998	340,18	87,87	0,258	-1,874	0,030	1,03
39560000	Palmares	07/05/1999	340,18	67,68	0,199	-2,403	0,008	1,01
39560000	Palmares	02/08/2000	340,18	1134,09	3,334	2,113	0,983	57,86
39560000	Palmares	14/06/2001	340,18	304,07	0,894	0,188	0,575	2,35
39560000	Palmares	10/06/2002	340,18	261,12	0,768	-0,044	0,482	1,93
39560000	Palmares	06/09/2003	340,18	97,36	0,286	-1,681	0,046	1,05
39560000	Palmares	06/02/2004	340,18	570,82	1,678	1,123	0,869	7,66
39560000	Palmares	03/06/2005	340,18	630,00	1,852	1,267	0,897	9,75
39560000	Palmares	13/07/2006	340,18	208,56	0,613	-0,394	0,347	1,53
39560000	Palmares	28/06/2007	340,18	231,65	0,681	-0,230	0,409	1,69
39560000	Palmares	06/07/2008	340,18	192,78	0,567	-0,519	0,302	1,43

4.2.3. CENÁRIOS DE PRECIPITAÇÃO PARA ALERTA

A partir do estudo de classificação SPI das séries de precipitação com a determinação dos limiares das classes de precipitações máximas diárias acumuladas nas durações de análise, foram gerados bancos de dados em formato HEC-DSS (CEIWR-HEC, 2009) [8] com alturas de precipitações horárias através dos limites de classe SPI de acordo com a classificação: Chuva Fraca (CF)/Chuva Leve (CL) com período de retorno de 2 anos associado ao SPI de 0; Chuva Moderada (CM) com período de retorno de 9,5 anos associado ao SPI de 1,25 que é a média entre seus limites de 1 e 1,5; Chuva Extrema (CE)/Chuva Severa (CS) com período de retorno de 44 anos associado ao SPI de 2; finalmente, Chuva Mínima (CZ), nova adaptação do SPI (MCKEE et al., 1993) [52], para atender as situações em que a estação está fora do núcleo de precipitações a ser considerado como fonte principal de geração do escoamento no modelo hidrológico, com período de retorno de ~1 ano associado ao SPI de -3, que na Tabela 2 (item 2.4.2) é denominado Seca Extrema (SE). Como estas classes SPI estavam associadas a totais de alturas de precipitações máximas diárias nas durações de 1 dia, 2 dias, 3 dias, 4 dias e 5 dias, fez-se necessário a distribuição temporal destes valores acumulados em valores horários através de uma simplificação do processo feito por Hershfield (1962 apud TUCCI, 2001) [82] em que é determinado um padrão de distribuição temporal da precipitação a partir de séries de eventos registrados de regime de precipitação a partir de dados horários registrados em PCDs, indicadas na Tabela 7 (item 3.2.2.2). Para um maior detalhamento da evolução da inundação com o tempo de propagação da onda de cheia, como mostra a Figura 73, foi feita uma separação das estações pluviométricas de acordo com sua proximidade às PCDs classificando-as nas regiões fisiográficas *alto*, *médio* e *baixo* Una, para identificar as estações que terão o padrão de distribuição temporal definido por cada PCD.

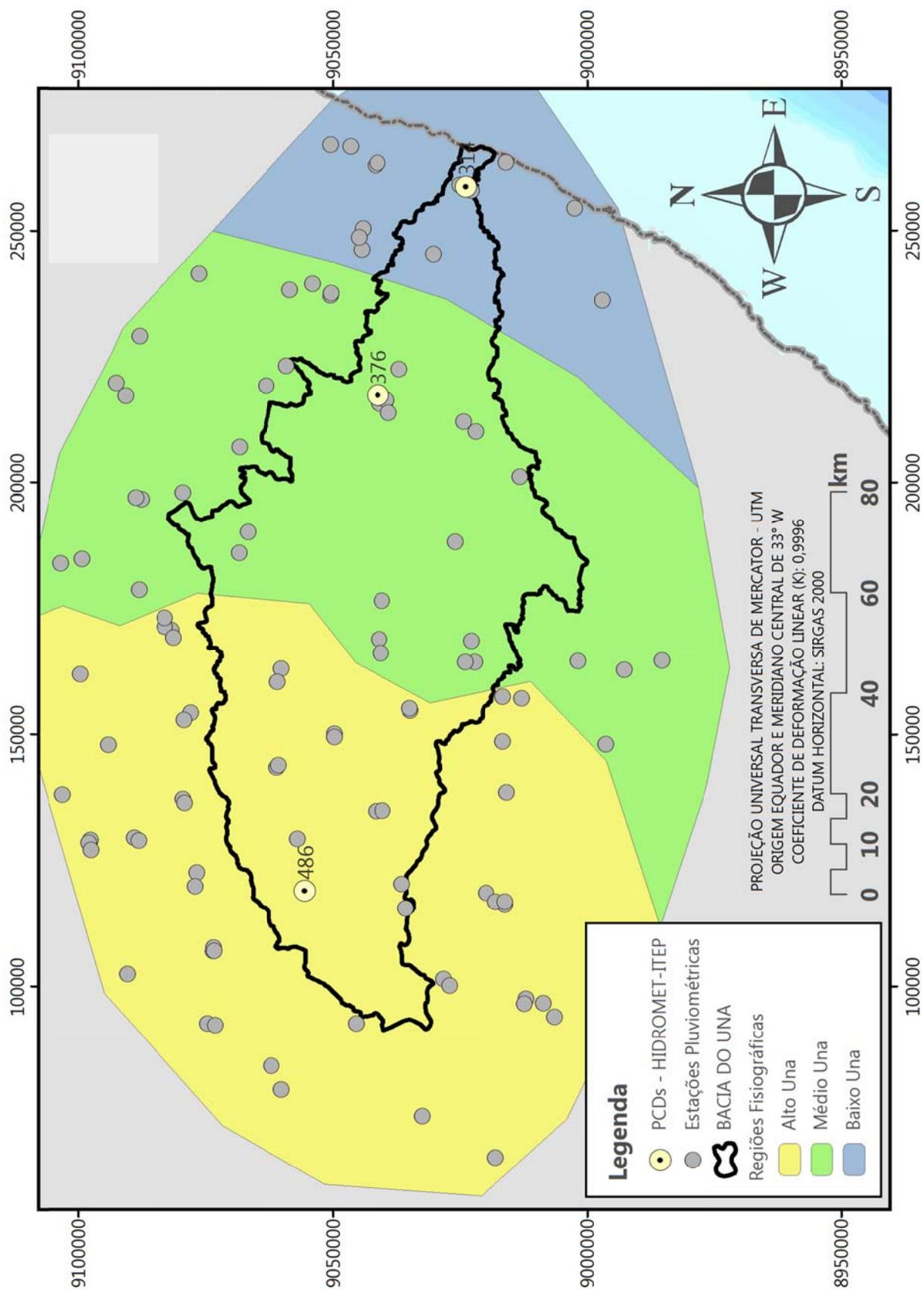


Figura 73 – Classificação da bacia em regiões fisiográficas pelas PCDs existentes.

De posse dos bancos de dados HEC-DSS (CEIWR-HEC, 2009) [8], foi codificada, em linguagem VBA (do inglês "*Visual Basic for Applications*") pela equipe de cooperação técnico-científica, uma ferramenta computacional (Figura 74) com a finalidade de facilitar a associação das **108 estações** implementadas no sistema de simulação hidrológico-hidrodinâmica com configuração do regime de precipitações que se deseja modelar.

Feita a identificação do núcleo a partir de uma referência de previsão meteorológica ou até dados observados em tempo real a partir de uma rede telemétrica de PCDs, podem-se obter cenários de regime de precipitações na bacia a ser modelados no sistema de simulação hidrológico-hidrodinâmica montado para a previsão e o controle de inundações.

Região	Tipo de Chuva
Alto:	Chuva Fraca/Leve
Médio:	Chuva Extrema/Severa
Baixo:	Chuva Moderada

Pasta do Arquivo .Gage:

Pasta dos Arquivos .dss:

Estações a Minimizar

Processar

Sair

Figura 74 – Ferramenta VBA para a geração do arquivo de entrada para simulação de cenários.

A metodologia descrita foi verificada a partir dos dados observados de precipitações acumuladas das durações consideradas na análise, ou seja, 1 dia, 2 dias, 3 dias, 4 dias e 5 dias, para os eventos importantes que ocorreram na bacia do Una: em agosto de 2000 configurando o *cenário 1*, fevereiro de 2004 configurando o *cenário 2* e junho de 2010 configurando o *cenário 3*.

No cenário 1 da Figura 75, o núcleo foi obtido com a geração de uma grade irregular triangular com interpolação TIN a partir da informação acumulada em 5 dias de maiores precipitações em agosto de 2000 nas 108 estações, ou seja, dos volumes pluviométricos acumulados de 31 de julho a 4 de agosto de 2000. Daí, procedeu-se o delineamento da área de maior volume precipitado, sendo determinado, dentro do núcleo, a partir da ferramenta VBA, o regime de precipitação de classificação SPI de CF/CL para o alto Una, de CM para o médio e de CE/CS para o baixo, ficando CZ definida para as demais estações localizadas fora do núcleo obtido.

Da mesma forma o cenário 2 da Figura 76, obtido a partir da informação acumulada em 5 dias de maiores precipitações em fevereiro de 2004 nas 108 estações, ou seja, dos volumes pluviométricos acumulados de 4 a 8 de fevereiro de 2004, definindo CF/CL para o alto Una, CM para o médio e CM para o baixo. E o cenário 3 da Figura 77, obtido a partir da informação acumulada em 5 dias de maiores precipitações em junho de 2010 nas 108 estações, ou seja, dos volumes pluviométricos acumulados de 17 a 21 de junho de 2010, definindo CF/CL para o alto Una, CE/CS para o médio e CM para o baixo.

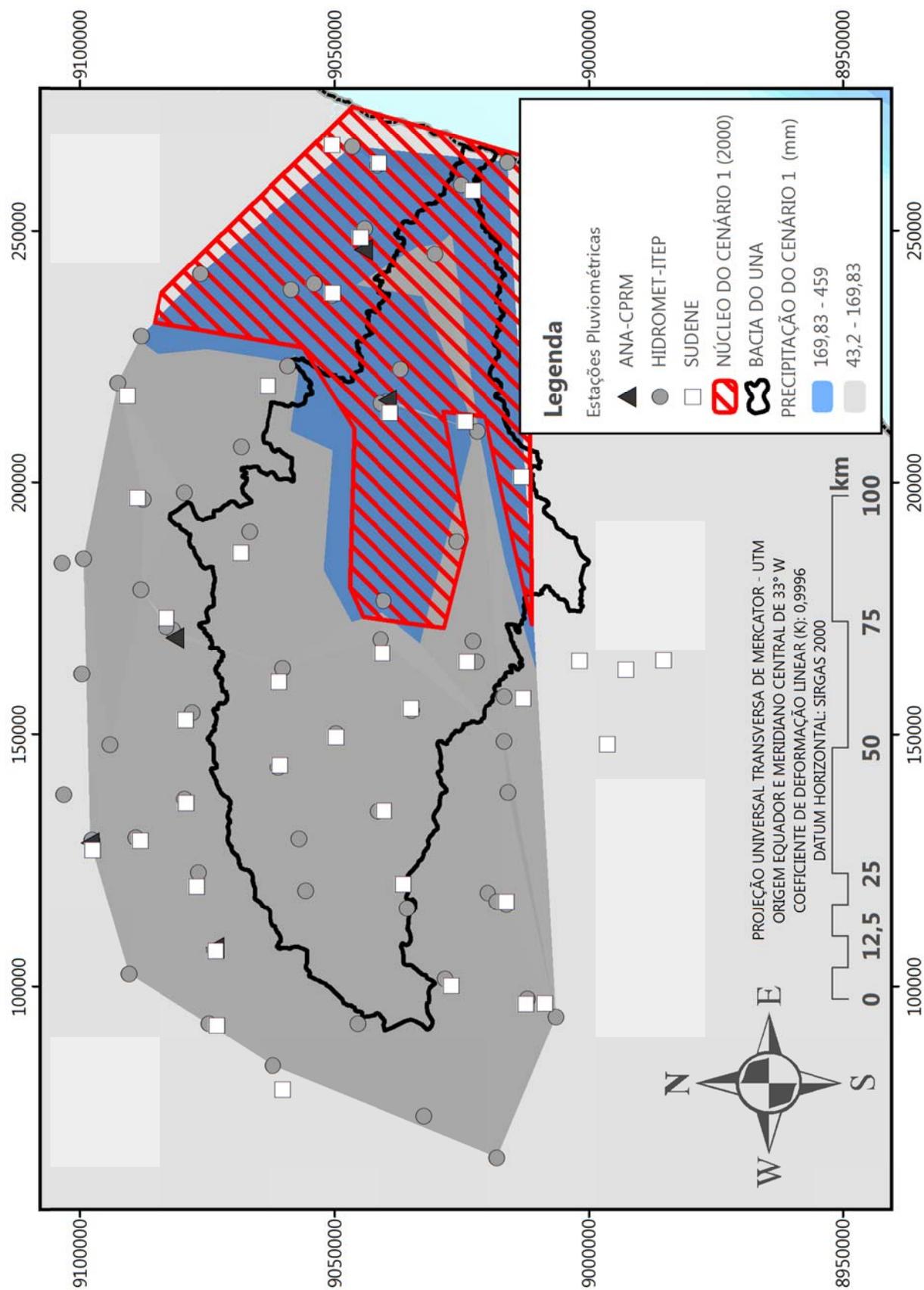


Figura 75 – Identificação do núcleo de precipitações para o evento com dados observados em agosto de 2000 configurando o cenário 1 modelado.

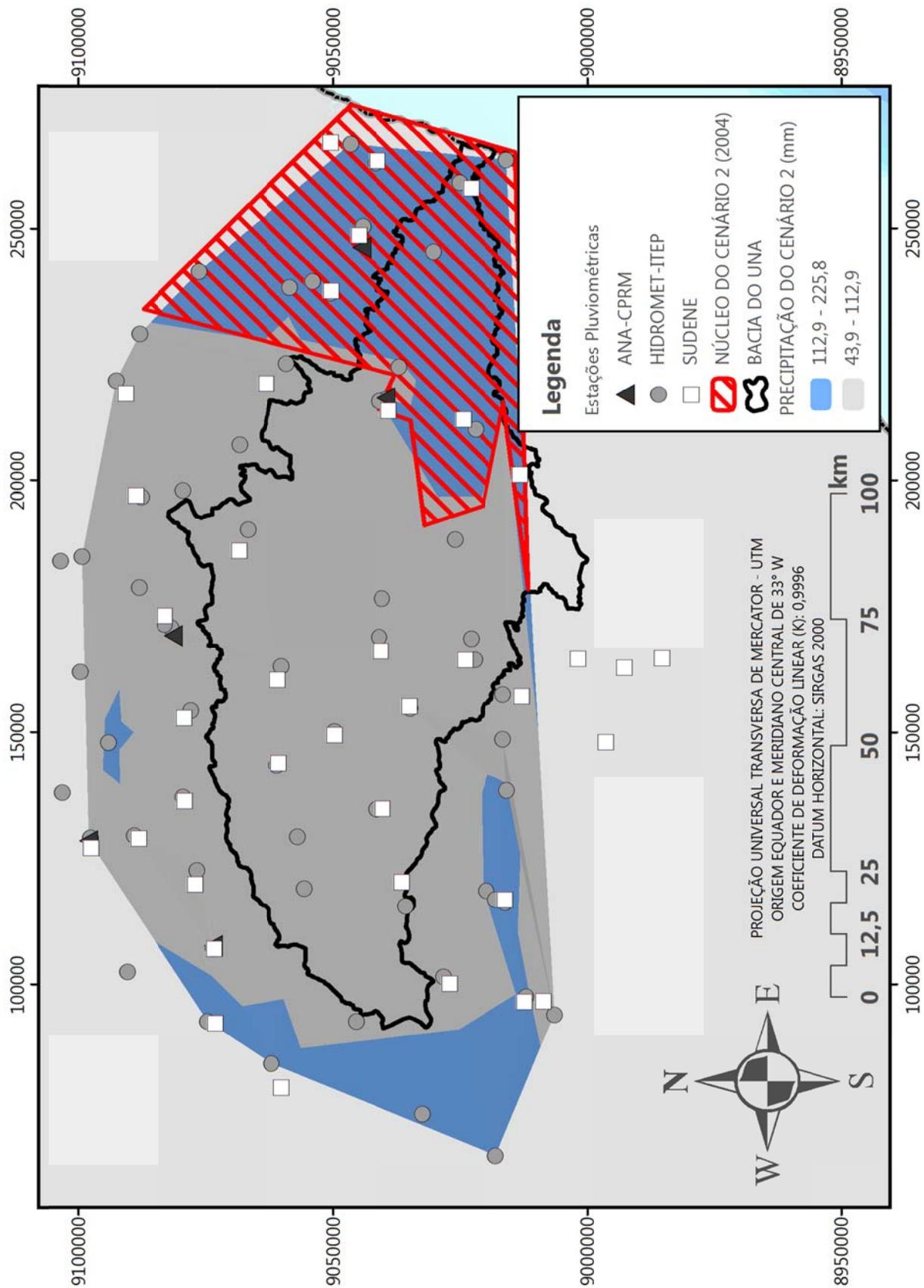


Figura 76 – Identificação do núcleo de precipitações para o evento com dados observados em fevereiro de 2004 configurando o cenário 2 modelado.

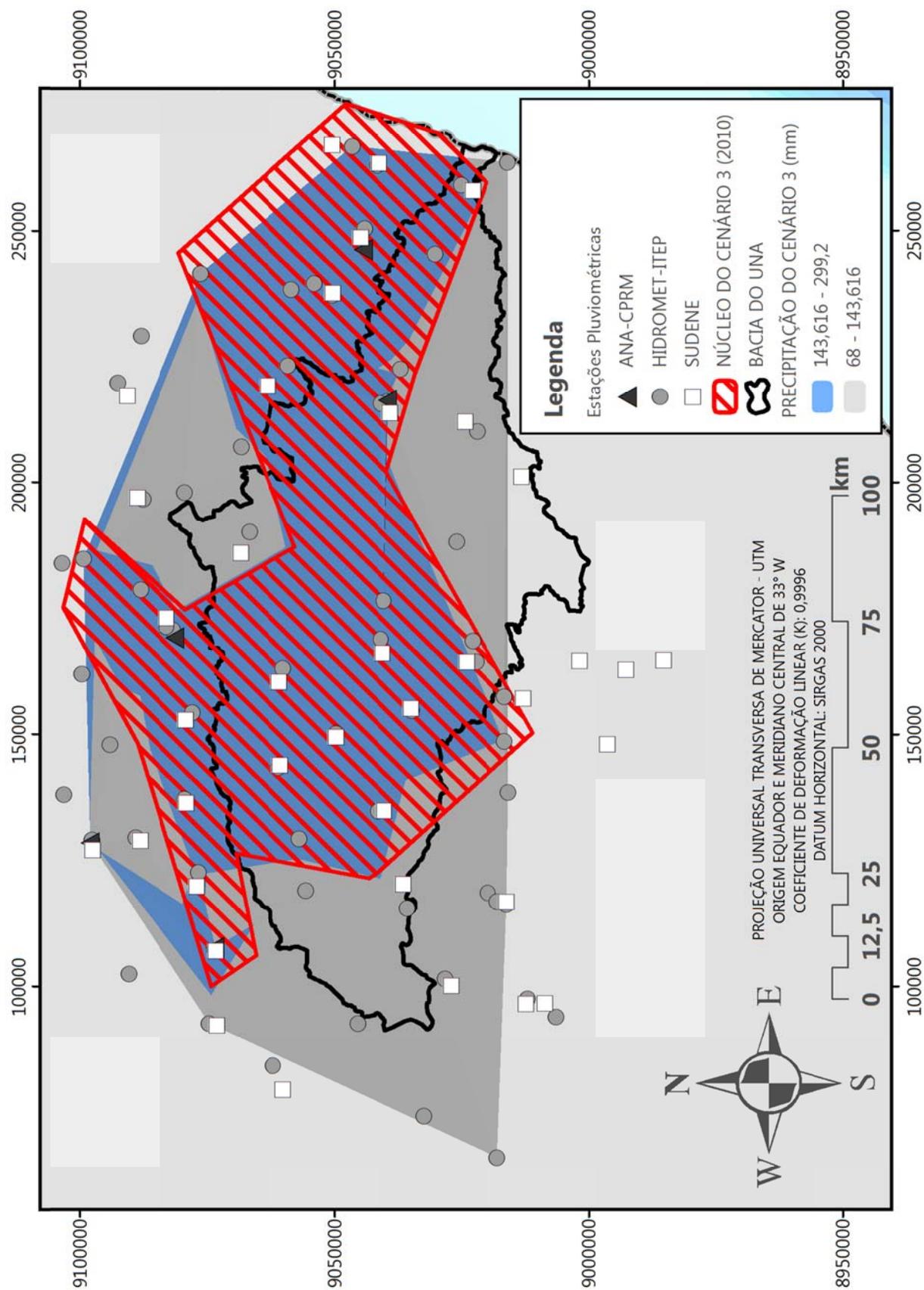


Figura 77 – Identificação do núcleo de precipitações para o evento com dados observados em junho de 2010 configurando o cenário 3 modelado.

A partir dos padrões de precipitação citados, foram geradas as vazões nas sub-bacias que compõem o sistema de simulação hidrológico-hidrodinâmica do rio Una e em sequência a propagação das vazões na calha fluvial. Considerando as simulações a partir da precipitação acumulada registrada nos diversos postos da bacia nas fases de calibração e verificação do sistema, bem como as linhas máximas de inundação registradas em campo, constata-se que os cenários definidos reproduzem bem os três eventos de inundação ocorridos nas cidades observadas na bacia. Os cenários ajustados praticamente levaram à mesma superfície de inundação gerada com as chuvas efetivamente registradas, o que mostra a adequação do processo de regionalização das áreas que efetivamente contribuíram para a ocorrência das cheias.

Assim, o resultado da modelagem dos cenários pelo sistema de simulação hidrológico-hidrodinâmica foi avaliado através da identificação da vazão de pico alcançada na cidade de Palmares pela previsão e por dados observados para a mesma seção, como também através da verificação do alcance das manchas de inundação recuperadas a partir das marcas de cheias obtidas em levantamentos de campo.

No cenário 1, a seção de controle do modelo hidrodinâmico, equivalente a estação fluviométrica Palmares (39560000) da ANA-CPRM, calculou-se a vazão de pico de $1.222 \text{ m}^3/\text{s}$, associada a um tempo de retorno $Tr = 75,66 \text{ anos}$ (conforme análise do item 4.2.2). A análise desenvolvida em Pernambuco (2002) [60] estima uma vazão de pico de $1.200 \text{ m}^3/\text{s}$ ($Tr = 70,84 \text{ anos}$) nesta seção. A seguir compara-se o alcance da mancha de inundação gerada com a modelagem do cenário com o levantamento da FIDEM (item 3.2.1.1) representado na Figura 78 para a cidade de Palmares e na Figura 79 para a cidade de Barreiros, constata-se o ajuste entre a observação e a simulação. É necessário registrar que o levantamento da mancha de inundação à época se fez somente em parte das cidades e no caso de Palmares apenas na margem esquerda.

No cenário 2, para a mesma seção de Palmares foi calculada a vazão de pico de $557 \text{ m}^3/\text{s}$ ($Tr = 7,21 \text{ anos}$) que se aproxima da vazão de $570,82 \text{ m}^3/\text{s}$ ($Tr = 7,66 \text{ anos}$) obtida da curva-chave da estação da Palmares (39560000) com dados observados de régua nesta estação. A mancha de inundação para este cenário pode ser vista na Figura 80 para Palmares e na Figura 81 para Barreiros.

Finalmente, para o cenário 3, a vazão de pico calculada em Palmares em $2.121 \text{ m}^3/\text{s}$ ($Tr = 748,06 \text{ anos}^7$). Para este evento onde pode-se comparar o alcance da mancha de inundação gerada pelo modelo com os limites extrapolados do levantamento do Corpo de Bombeiros em Palmares (item 3.2.1.2), comparação essa indicada na Figura 82. A Figura 83 mostra o alcance da mancha de inundação deste cenário na cidade de Barreiros.

⁷ Extrapolação feita como referência, apesar da consideração encontrada em Naguettini e Pinto (2007) [56] que de uma série de máximos anuais de n valores pode-se estimar, com alguma confiabilidade, quantis com tempos de retorno de até $2n$.

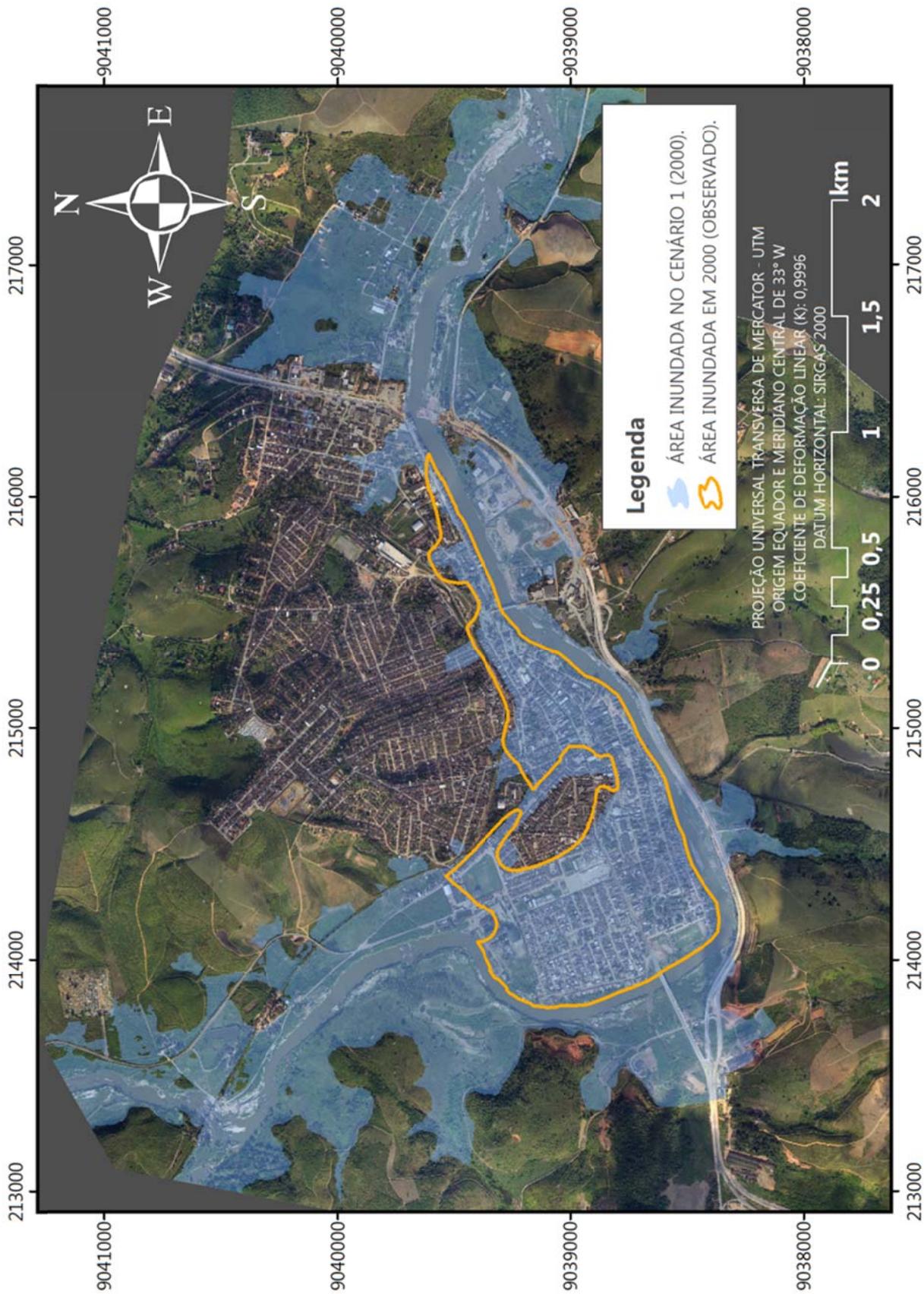


Figura 78 – Previsão da mancha de inundação a partir do cenário 1 em Palmares (detalhe para a comparação da previsão com o levantamento na margem esquerda).



Figura 79 – Previsão da mancha de inundação a partir do cenário 1 em Barreiros (detalhe para a comparação da previsão com o levantamento).

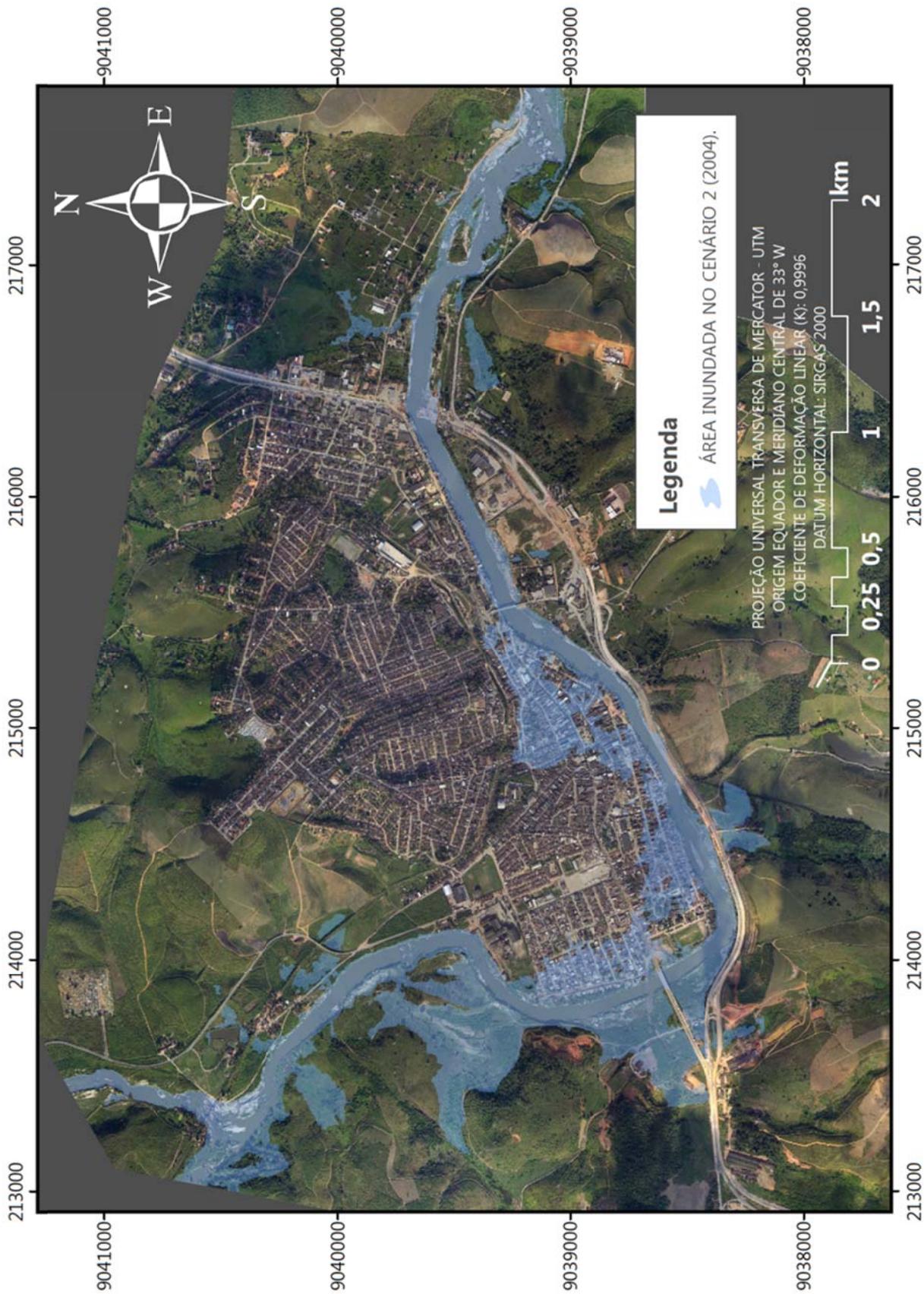


Figura 80 – Previsão da mancha de inundação a partir do cenário 2 em Palmares.

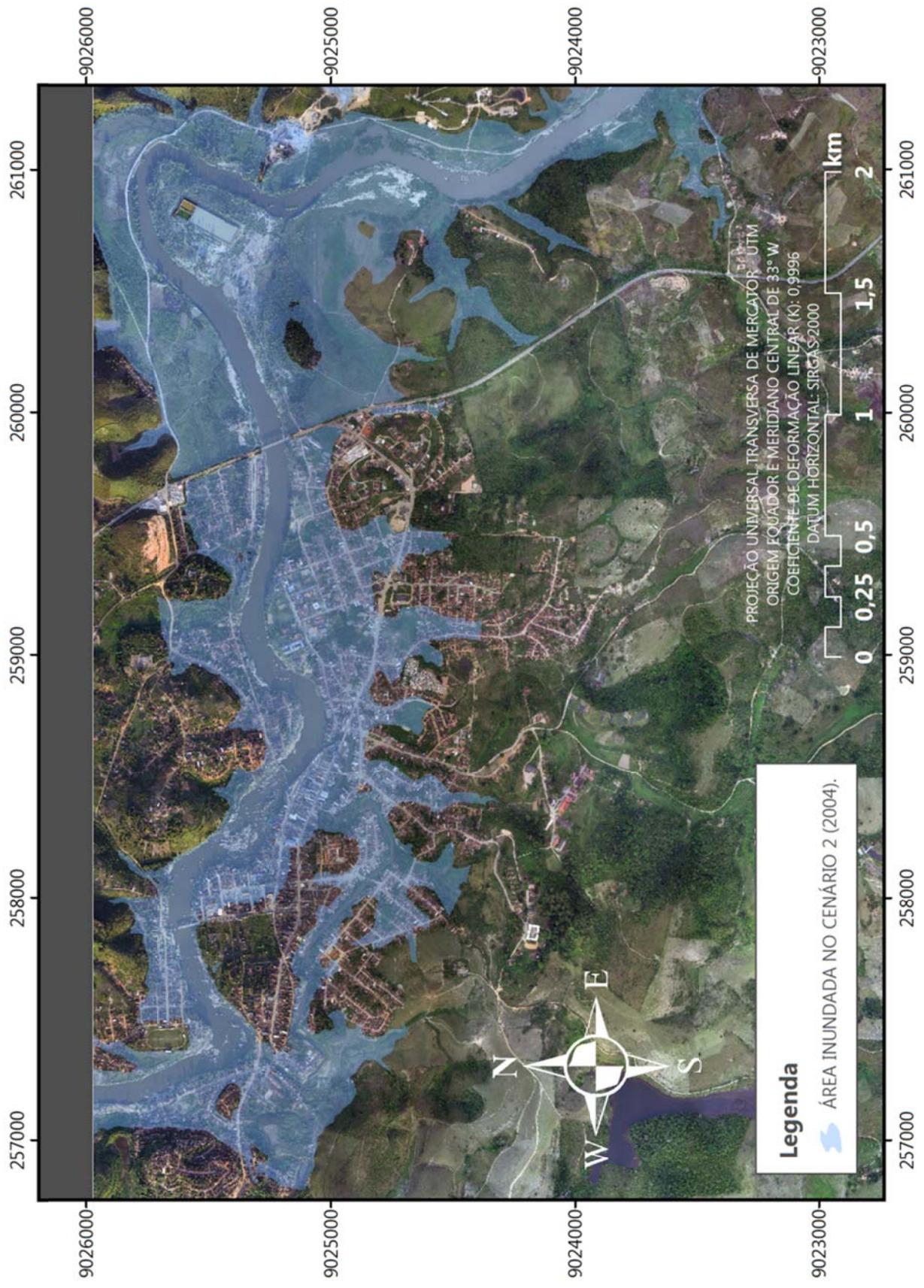


Figura 81 – Previsão da mancha de inundação a partir do cenário 2 em Barreiros.

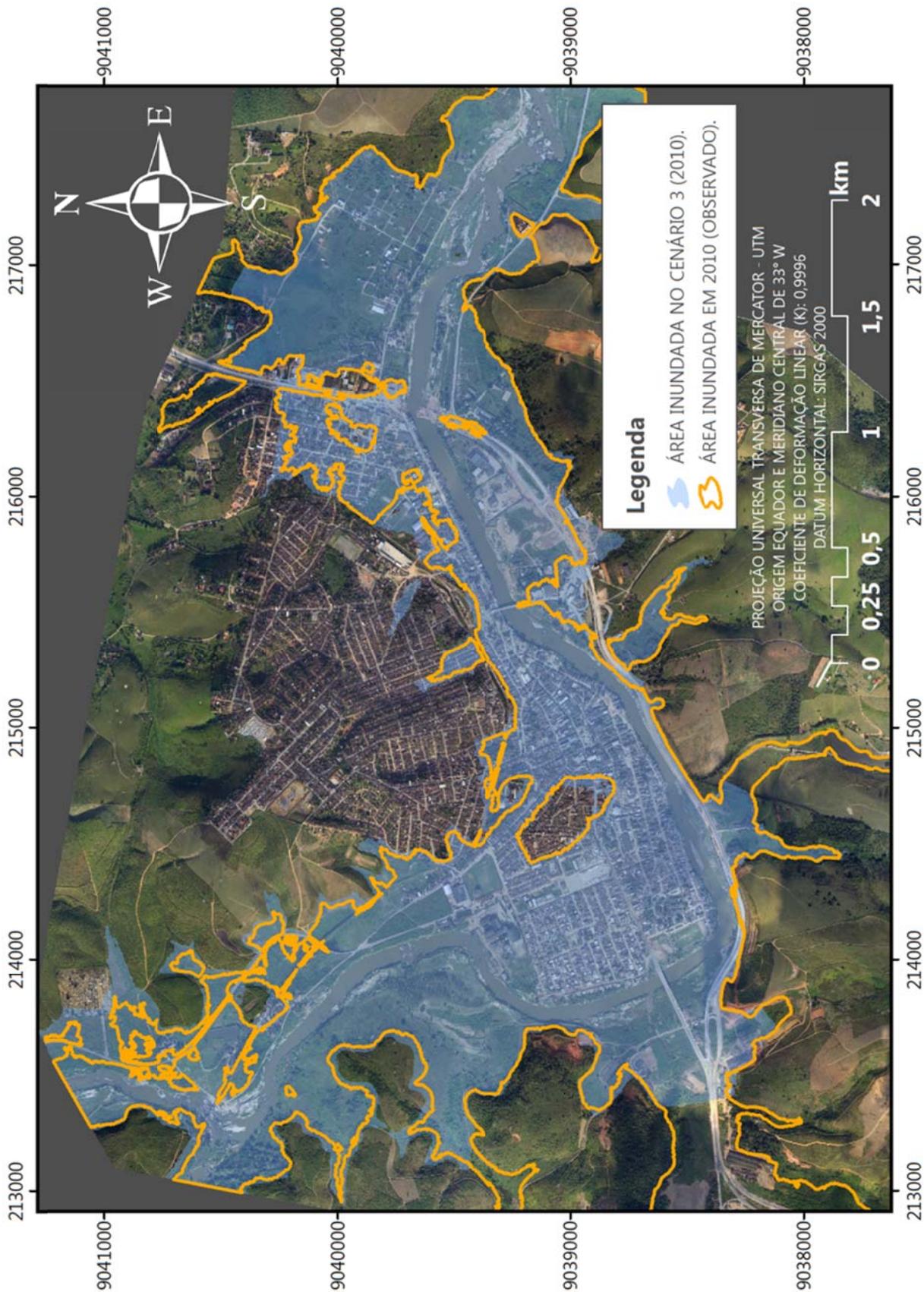


Figura 82 – Previsão da mancha de inundação a partir do cenário 3 em Palmares (comparação com a estimativa decorrente do levantamento dos Bommeiros).



Figura 83 – Previsão da mancha de inundação a partir do cenário 3 em Barreiros.

As figuras a seguir representam a visualização das inundações em 3D, cenário 3, para as cidades de Palmares (Figura 84) e Barreiros (Figura 85).



Figura 84 – Vista 3D do alcance da inundação no cenário 3 na cidade de Palmares.



Figura 85 – Vista 3D do alcance da inundação no cenário 3 na cidade de Barreiros.

Capítulo 5

CONCLUSÕES

A pesquisa descrita neste trabalho procurou integrar ferramentas de simulação hidrológica e hidrodinâmica com informações de alta definição, no propósito de representar com maior precisão as inundações por ocasião de eventos extremos de cheias, bem como formas de estabelecer estratégias para previsão dessas inundações.

Os resultados apresentados mostram o ganho de qualidade que um modelo de alta resolução espacial proporciona, seja como insumo para desenvolvimento de estudos e projetos, seja para aprimorar a qualidade dos resultados de sistemas de suporte a decisão, como é o caso de previsão de inundações. Além disso, também as ações de monitoramento podem ser beneficiadas, como mostrado neste trabalho.

Ainda no contexto de informações espaciais de alta definição, é importante ressaltar sua importância para integração de dados de campo. É o caso da detecção das manchas de inundação, primeiramente levantadas em pontos específicos de campo e depois espacializadas sobre o modelo numérico do terreno. Somente com o refinamento proporcionado por base de dados dessa natureza se tornou possível ter precisão satisfatória.

Naturalmente qualquer modelo calibrado depende de quantidade e qualidade dos dados nos pontos de controle. No caso, os dados de vazão e cotas observadas nas seções transversais dos rios são restritas a algumas raras estações e poucos eventos de cheias. Isso gera dificuldade na setorização dos valores dos parâmetros de atrito do modelo por trechos de rio.

No que tange ao modelo de previsão, a análise estatística possibilitou identificar adequadamente o processo de formação das chuvas intensas e determinar padrões

de comportamento das precipitações que geram cheias de diferentes magnitudes. Daí, quantificando as precipitações por faixas de magnitudes, tornou-se possível estabelecer critérios e cenários para previsão de inundações que reproduziram adequadamente os eventos adotados como referência.

Alguns pontos relativos aos resultados devem ser ressaltados:

- A implementação de um sistema de alerta de cheias eficaz depende da capacidade de identificação das cotas de inundação com antecedência suficiente para garantir a desocupação das áreas inundáveis. Para tal, modelos hidrológicos e hidrodinâmicos, associados a sistemas de monitoramento meteorológico, aparecem como importantes ferramentas em previsões de enchentes, como apresentado neste trabalho. Isso pode ser obtido a partir do padrão de precipitação detectado pelos modelos meteorológicos e daí simulados os seus possíveis impactos a partir das ferramentas apresentadas; e
- Diversos resultados parciais deste trabalho foram incorporados para ações de controle de cheias na bacia do rio Una, como os projetos de barragens, ampliação da calha fluvial e desocupação das margens. Novamente é importante ressaltar que a estruturação das bases físicas dos modelos de inundação foram resultados de trabalho de equipe, o que gerou tanto os insumos para as intervenções como para o desenvolvimento de toda a pesquisa.

Como recomendações visando à continuidade da pesquisa e para outros trabalhos futuros pode-se citar:

- Aprimorar a representação da calha principal dos rios por meio de levantamentos de seções topobatimétricas ao longo dos trechos modelados, visto que, como o perfilamento a laser não se adequa para identificar a superfície sob a água, foram utilizadas seções trapezoidais estimadas a partir das ortofotos digitais. Essa caracterização é pouco relevante para os estudos de inundação, como tratado neste trabalho, dado que o leito de inundação prevalece na conservação da massa, porém se torna relevante para ações de intervenção direta na calha dos rios ou projetos de navegabilidade, por exemplo, como já mencionado no item 3.3.1.1;
- Aprofundar a identificação dos parâmetros do modelo tendo como suporte novas estações de medição e monitoramento contínuo por telemetria em pontos de controle, principalmente os parâmetros de atrito que foram calibrados para ajustar os resultados somente nos pontos de interesse que são as cidades. Na calibração do modelo hidrodinâmico foi necessário o uso de valores para o coeficiente de rugosidade de Manning considerados bastante altos e de forma homogênea na bacia, o que não representa o sistema físico representado. Isso se tornou necessário para eliminar as instabilidades do modelo e de forma indireta compensar os trechos de grande declividade, para os quais há dificuldade de utilizar as equações de Saint-Venant, também visto no item 3.3.2.2;
- Realizar, além da verificação do alcance das inundações e da verificação dos hidrogramas e cotogramas em pontos monitorados por estação fluviométrica, uma análise estatística de erros dos valores de profundidades calculadas em relação às marcas de cheia medidas em campo, que é fundamental para uma representação espacial precisa do alcance da inundação;

- Incluir no sistema modelado mais um importante afluente do rio Una, o rio Jacuípe, para melhor representação do meio físico;
- Incluir o sistema de contenção de cheias, ou seja, as barragens em construção e as intervenções na calha fluvial na modelagem, possibilitando a avaliação dos seus impactos na redução das inundações;
- Integrar *Modelos de Previsão de Tempo* com os modelos apresentados e aos padrões desenvolvidos: essa integração de modelos e dados permitirá de forma efetiva e prática a utilização dos modelos como ferramenta de previsão de inundações, com o ganho inclusive, na antecedência das previsões;
- Sistematizar a operação do modelo de previsão proposto, com o objetivo de facilitar a utilização desta ferramenta pelos órgãos gestores governamentais responsáveis, incluindo a alimentação on-line do sistema a partir de dados de PCDs e a divulgação das previsões através das mais diversas fontes de comunicação, inclusive com uso das redes sociais, o que poderá trazer maior interatividade no alerta e aumentando, conseqüentemente, a antecedência das ações de defesa civil para a proteção das populações; e
- Implantar programas de capacitação e treinamento, visando à preparação dos órgãos municipais e estadual de defesa civil, para a prática de evacuação de áreas de risco quando da ocorrência de alertas destinados para este fim.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ABDULLAH, A. F.; RAHMAN, A. A.; VOJINOVIC, Z. Lidar Filtering Algorithms for Urban Flood Application: Review on Current Algorithms and Filters Test. In: ISPRS WORKSHOP LASER SCANNING, 6., 2009, Paris, France. **Proceedings...** Beijing: ISPRS, 2009. v. XXXVIII-3/W8. Disponível em: <<http://www.isprs.org/proceedings/XXXVIII/3-W8/papers/p35.pdf>>. Acesso em: 20 maio 2012.
- [2] ADDAA, P.; MIOCB, D.; ANTONC, F.; MCGILLIVRAYD, E.; MORTOND, A.; FRASERA, D. 3D Flood-Risk Models of Government Infrastructure. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON PERVASIVE WEB MAPPING, GEOPROCESSING AND SERVICES, 1., 2010, Como, Italy. **Proceedings...** Beijing: ISPRS, 2010. v. XXXVIII-4/W13. Disponível em: <http://www.isprs.org/proceedings/XXXVIII/4-W13/ID_39.pdf>. Acesso em: 20 maio 2012.
- [3] BALES, Jerad D.; WAGNER, Chad R.; TIGHE, Kirsten C.; TERZIOTTI, Silvia. **LiDAR-Derived Flood-Inundation Maps for Real-Time Flood-Mapping Applications, Tar River Basin, North Carolina**. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey, 2007. vi, 42 p. (Scientific Investigations Report, 2007-5032). ISBN-10 123450426X. ISBN-13 978-1234504267. Disponível em: <<http://pubs.usgs.gov/sir/2007/5032/pdf/SIR2007-5032.pdf>>. Acesso em: 25 maio 2012.
- [4] BAPTISTA, Márcio Benedito; COELHO, Márcia Maria Lara Pinto; CIRILO, José Almir (Org.) et al. **Hidráulica Aplicada**. 2. ed. Porto Alegre: ABRH, 2003. 621 p. (Coleção ABRH de Recursos Hídricos, v. 8). ISBN 85-88686-02-3.
- [5] BRASIL. **Decreto n. 89.817, de 20 de junho de 1984**. Dispõe sobre as instruções reguladoras das normas técnicas da cartografia nacional. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, 22 de junho de 1984.
- [6] BRUNNER, Gary W. (USACE). **HEC-RAS – River Analysis System Hydraulic: Reference Manual**. Davis, California, USA: U.S. Army Corps of Engineers, 2010. Disponível em: <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documents/HEC-RAS_4.1_Reference_Manual.pdf>. Acesso em: 27 maio 2012. Meio digital.

- [7] BURMESTER, Cristiane Lourencetti. **Uso do Perfilador a Laser na Estimativa da Rugosidade em Planícies de Inundação**. 2005. 86 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005. Disponível em: <http://www.ppgerha.ufpr.br/dissertacoes/files/092-Cristiane_Lourencetti_Burmester.pdf>. Acesso em: 16 maio 2012. Meio digital.
- [8] CEIWR-HEC (USACE). **HEC-DSSVue – HEC Data Storage System Visual Utility Engine: User's Manual**. Davis, California, USA: U.S. Army Corps of Engineers, 2009. Disponível em: <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-dss/documents/HEC-DSSVue_20_Users_Manual.pdf>. Acesso em: 2 maio 2012. Meio digital.
- [9] CHOW, Ven Te. **Open-Channel Hydraulics**: International Student Edition. Tokyo: McGraw-Will Kogakusha, Ltd., 1959. 680 p.
- [10] CIRILO, José Almir. **Algoritmo de Gradientes Conjugados Aplicado à Identificação de Parâmetros nas Equações de Propagação de Onda de Cheia**. 1979. 101 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1979. Disponível em: <http://www.coc.ufrj.br/index.php?option=com_docman&task=doc_download&gid=2192>. Acesso em: 1 maio 2012. Meio digital.
- [11] _____. **Análise dos Processos Hidrológico-Hidrodinâmicos na Bacia do Rio São Francisco**. 1991. 185 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1991. Disponível em: <http://www.coc.ufrj.br/index.php?option=com_docman&task=doc_download&gid=3038>. Acesso em: 5 maio 2012. Meio digital.
- [12] CIRILO, José Almir; DANTAS, Carlos Eduardo de Oliveira; RIBEIRO NETO, Alfredo; SILVA, Edilson Raimundo; MONTENEGRO, Susana Maria Gico Lima. Controle e Previsão de Cheias no Estado de Pernambuco, Brasil: Estrutura Geral do Sistema de Suporte à Decisão. In: IWRA WORLD WATER CONGRESS, 14., 2011a, Porto de Galinhas, Pernambuco, Brasil. **Anais...** Ipojuca: IWRA, 2011. 1 CD-ROM.

- [13] CIRILO, José Almir; MONTENEGRO, Suzana Maria Gico Lima; ASFORA, Marcelo Cauás; TORRES FILHO, Clênio de Oliveira. Controle e Previsão de Cheias no Estado de Pernambuco, Brasil: Aspectos Hidrológicos e Ações de Reconstrução. In: IWRA WORLD WATER CONGRESS, 14., 2011b, Porto de Galinhas, Pernambuco, Brasil. **Anais...** Ipojuca: IWRA, 2011. 1 CD-ROM.
- [14] COBBY, David M.; MASON, David C.; HORRITT, Matthew S.; BATES, Paul D. Two-dimensional hydraulic flood modelling using a finite-element mesh decomposed according to vegetation and topographic features derived from airborne scanning laser altimetry. **Hydrological Processes**, Inglaterra, v. 17, p. 1979-2000, 2003. ISSN 08856087. DOI 10.1002/hyp.1270. Disponível em: <http://champs.cecs.ucf.edu/Library/Conference_Papers/pdfs/Two-dimensional%20hydraulic%20flood%20modeling%20using%20a%20finite-element%20mesh%20decomposed%20according%20to%20vegetation.pdf>. Acesso em: 17 maio 2012.
- [15] COSTA, Maria Das Graças Alves; FERNANDES FILHO, Elpidio Inácio; FARIA, André Luiz Lopes. Avaliação de Áreas de Risco à Inundação no Perímetro Urbano de Caratinga-MG através do uso de dados Altimétricos Provenientes do Sensor Aerotransportado LiDAR. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 13., 2009, Viçosa. **Anais eletrônicos...** Viçosa: UFV, 2009. Disponível em: <http://www.geo.ufv.br/simposio/simposio/trabalhos/trabalhos_completos/eixo1/061.pdf>. Acesso em: 19 maio 2012.
- [16] CPRM. **Disponibilidade Hídrica do Brasil: Estudos de Regionalização de Vazões nas Bacias Hidrográficas Brasileiras:** Regionalização da Q95% na Sub-bacia 39. Recife: CPRM, 2011a. Escalas variam. 1 CD-ROM.
- [17] CPRM. **Atlas Pluviométrico do Brasil:** Levantamento da Geodiversidade. Belo Horizonte: CPRM, 2011b. 1 atlas. Escala 1:5.000.000. 1. CD-ROM. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/publique/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?infol=1351&sid=9>>. Acesso em: 26 set. 2012.
- [18] CPRM. **Mapa Geodiversidade dos Estados de Pernambuco e Alagoas.** Recife: CPRM, 2012. 1 atlas. Escala 1:500.000. No prelo.

- [19] DAVIS, Elizabeth Guelman; NAGHETTINI, Mauro da Cunha. **Estudo de Chuvas Intensas**. Belo Horizonte: CPRM, 2001. 140 p. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/publique/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?infoid=611&sid=26>>. Acesso em: 18 maio 2012. Meio digital.
- [20] DELL, Vivienne K.; ARTHUR, Scott; PENDER, Garry. The use of a LiDAR DEM in modelling sewerage derived urban flood wave routing. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON URBAN DRAINAGE, 11., 2008, Edinburgh, Scotland, UK. **Proceedings...** Sheffield: University of Sheffield, 2008. CD-ROM. ISBN 978-1899796-212. Disponível em: <http://web.sbe.hw.ac.uk/staffprofiles/bdgsa/11th_International_Conference_on_Urban_Drainage_CD/ICUD08/pdfs/468.pdf>. Acesso em: 20 maio 2012.
- [21] DHI. **MIKE 11: A Modelling System for Rivers and Channels**: Reference Manual. Denmark: DHI Water & Environment, 2007. Disponível em: <http://www.hydroasia.org/jahia/webdav/site/hydroasia/shared/Document_public/Project/Manuals/WRS/MIKE11_ReferenceManual.pdf>. Acesso em: 7 maio 2012. Meio digital.
- [22] DIÁRIOS ASSOCIADOS. Diário de Pernambuco. **SOS Pernambuco**. Recife, 2010. Disponível em: <<http://www.old.diariodepernambuco.com.br/hotsite/2010/chuvas/>>. Acesso em: 30 maio 2012. Website.
- [23] EBC (EMPRESA BRASIL DE COMUNICAÇÃO). Agência Brasil. **Enchente em Pernambuco**. Brasília, 2010. Disponível em: <<http://agenciabrasil.ebc.com.br/galeria/2010-06-23/enchente-em-pernambuco>>. Acesso em: 5 maio 2012. Website.
- [24] ESRI. **ArcGIS**: Mapping & Analysis for Understanding Our World. Redlands, California, USA, 2012. Disponível em: <<http://www.esri.com/software/arcgis/index.html>>. Acesso em: 21 maio 2012. Website.
- [25] FELDMAN, Arlen D. (USACE). **HEC-HMS – Hydrologic Modeling System**: Technical Reference Manual. Davis, California, USA: U.S. Army Corps of Engineers, 2000. Disponível em: <[http://www.hec.usace.army.mil/software/hechms/documentation/HEC-HMS_Technical%20Reference%20Manual_\(CPD-74B\).pdf](http://www.hec.usace.army.mil/software/hechms/documentation/HEC-HMS_Technical%20Reference%20Manual_(CPD-74B).pdf)>. Acesso em: 29 maio 2012. Meio digital.

- [26] FORMATO 8 PRODUÇÕES EDITORIAIS. **Site Pernambuco de A-Z: Enchentes**. Olinda, 2012. Disponível em: <http://www.pe-az.com.br/index.php?option=com_content&view=article&id=337:enchentes&catid=45:fenomenos-naturais&Itemid=105>. Acesso em: 20 maio 2012. Website.
- [27] FRANCO, Alberto dos Santos. **Tides: Fundamentals, Analysis and Prediction**. 2 ed. São Paulo: Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica (FCTH), 1988. 249 p.
- [28] _____. **Marés: Fundamentos, Análise e Previsão**. Niterói: Diretoria de Hidrografia e Navegação, 1997. viii, 268 p., il.
- [29] _____. **Marés – Programas para Previsão e Análises: Manual do Usuário**. Cotia: [s.n.], 2000. 36 p.
- [30] GIBSON, Stanford; NYGAARD, Chris; SCLAFANI, Paul. Mobile Bed Modeling of the Cowlitz River using HEC-RAS: Assessing Flooding Risk and Impact Due to System Sediment. In: JOINT FEDERAL INTERAGENCY CONFERENCE, 2., 2010, Las Vegas, Nevada, USA. **Proceedings...** Las Vegas: JFIC2010, 2010. CD-ROM. ISBN 978-0-9779007-3-2. Disponível em: <http://acwi.gov/sos/pubs/2ndJFIC/Contents/6C_Gibson_Nygaard_Modeling_of_Cowlitz_paper.pdf>. Acesso em: 19 maio 2012.
- [31] GIONGO, Marcos; KOEHLER, Henrique Soares; MACHADO, Sebastião do Amaral; KIRCHNER, Flavio Felipe; MARCHETTI, Marco. LiDAR: princípios e aplicações florestais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 30, n. 63, p. 231-244, ago./out. 2010. DOI 10.4336/2010.pfb.30.63.231. Disponível em: <<http://www.cnpf.embrapa.br/pfb/index.php/pfb/article/download/148/133>>. Acesso em: 6 maio 2012. Meio digital.
- [32] GOERL, Roberto Fabris; KOBAYAMA, Masato. Considerações sobre as inundações no Brasil. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 16., 2005, João Pessoa. **Anais...** Porto Alegre: ABRH, 2005. v. 1. p. 1-10. 1 CD-ROM.

- [33] GREENWOOD, J. A.; LANDWEHR, J. M.; MATALAS, N. C. e WALLIS, J. R. Probability weighted moments: definition and relation to parameters of several distributions expressable in inverse form. **Water Resources Research**, Washington, D.C.: American Geophysical Union, v. 15, n. 5, p. 1049-1054, 1979. DOI 10.1029/WR015i005p01049.
- [34] HAILE, Alemseged Tamiru; RIENTJES, T.H.M. Effects of Lidar DEM Resolution in Flood Modelling: a Model Sentitivity Study for the City of Tegucigalpa, Honduras. In: ISPRS WORKSHOP LASER SCANNING, 4., 2005, Enschede, Netherlands. **Proceedings...** Ayazaga: ISPRS, 2005. v. XXXVI-3/W19. Disponível em: <<http://www.isprs.org/proceedings/XXXVI/3-W19/papers/168.pdf>>. Acesso em: 17 maio 2012.
- [35] HIDROGRÁFICO. **Instituto Hidrográfico (IH) da Marinha Portuguesa – Glossário Científico**: Marés. Lisboa, Portugal, 2012. Disponível em: <<http://www.hidrografico.pt/glossario-cientifico-mares.php>>. Acesso em: 25 maio 2012. Website.
- [36] HOSKING, J. R. M. The theory of probability weighted moments. **IBM Research Report**, Yorktown Heights, New York, RC 12210, 1986. 160 p.
- [37] _____. Fortran routines for use with the method of L-moments. Version 2. **IBM Research Report**, Yorktown Heights, New York, RC 17097, 1991. 117 p.
- [38] HOSKING, J. R. M.; WALLIS, J. R. Regional flood frequency analysis using L-moments. **IBM Research Report**, Yorktown Heights, New York, RC 15658, 1990. 12 p.
- [39] _____. Some statistics useful in regional frequency analysis. **Water Resources Research**, Washington, D.C.: American Geophysical Union, v. 29, n. 2, p. 271-281, 1993. DOI 10.1029/92WR01980.
- [40] _____. Correction to "Some statistics useful in regional frequency analysis". **Water Resources Research**, Washington, D.C.: American Geophysical Union, v. 31, n. 1, p. 251, 1995. DOI 10.1029/94WR02510.

- [41] _____. **Regional Frequency Analysis: an approach based on L-Moments**. Cambridge: Cambridge University Press, 1997. 224 p. ISBN 0-521-43045-3 (hardback). ISBN 0-521-01940-0 (paperback). ISBN 9780511881640 (e-book).
- [42] INPE. **TOPODATA**: Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil. São José dos Campos, 2008. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/topodata/index.php>>. Acesso em: 22 maio 2012. Website.
- [43] LACTEC. **Lactec realizará mapeamento de áreas afetadas por enchentes em Pernambuco**. Curitiba, 2010. Disponível em: <<http://www.lactec.org.br/pt/?page=noticias&ano=2010&id=769&title=lactec-realizara-mapeamento-de-areas-afetadas-por-enchentes-em-pernambuco>>. Acesso em: 18 maio 2012. Website.
- [44] _____. **Mapeamento Digital a Laser e Ortofotos Digitais em Área de 1.235 km² no Estado de Pernambuco**. Curitiba: Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, 2011. 47 p. Relatório Técnico Final: P142. Meio digital.
- [45] LOMBARD, Pamela J. **Flood-Inundation maps for the St. John and Fish Rivers in Fort Kent, Maine**. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey, 2011. iv, 8 p. 29 map sheets. Scale 1:17.500. (Scientific Investigations Map, 3157). Pamphlet. Disponível em: <<http://pubs.usgs.gov/sim/3157/downloads/pdf/SIM3157.pdf>>. Acesso em: 25 maio 2012.
- [46] LOPES, João Eduardo Gonçalves. **SMAP – Soil Moisture Accounting Procedure**: Manual de utilização. 1999. 19 p. Disponível em: <http://200.144.189.97/phd/LeArq.aspx?id_arq=3596>. Acesso em: 15 maio 2012. Meio digital.
- [47] MACEDO, Rene Lebarbenchon. **Estudo Hidrológico da Bacia do Rio Negrinho-SC Utilizando o HEC-HMS**. 2010. 50 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010. Disponível em: <http://www.labhidro.ufsc.br/Artigos/TCC_Rene_L_Macedo.pdf>. Acesso em: 22 maio 2012. Meio digital.

- [48] MACKINNON, Edward. **Three Dimensional Flood Modeling with High Resolution LiDAR**. 2004. 200 f. Graduate Thesis (Applied Geomatics Research Post Graduate) – Applied Geomatics Research Group (AGRG), Centre of Geographic Sciences (COGS), Middleton, Nova Scotia, 2004. Disponível em: <http://tmackinnon.com/2005/PDF/MacKinnon_2004_Final_Report.pdf>. Acesso em: 25 maio 2012. Meio digital.
- [49] _____. Three Dimensional Flood Modeling with High Resolution LiDAR. In: ANNUAL CANADIAN INSTITUTE OF GEOMATICS (CGI) CONFERENCE, 98., 2005, Ottawa, Ontario, Canada. **Proceedings...** Ottawa: Canadian Institute of Geomatics, 2005, 8 p. Disponível em: <http://tmackinnon.com/2005/PDF/MacKinnon_CIG2005_YA.pdf>. Acesso em: 25 maio 2012.
- [50] MARCELINO, Emerson Vieira. **Desastres Naturais e Geotecnologias: Conceitos Básicos**. Santa Maria: INPE, 2007. 20p. Versão Preliminar. Disponível em: <<http://www.inpe.br/crs/geodesastres/conteudo/publicacoes/conceitosbasicos.pdf>>. Acesso em: 4 maio 2012. Meio digital.
- [51] MARKS, Kate; BATES, Paul. Integration of high-resolution topographic data with floodplain flow models. **Hydrological Processes**, Inglaterra, v. 14, p. 2109-2122, 2000. ISSN 08856087. DOI 10.1002/1099-1085(20000815/30)14:11/12 <2109::AID-HYP58>3.0.CO;2-1. Disponível em: <http://champs.cecs.ucf.edu/Library/Conference_Papers/pdfs/Integration%20of%20high-resolution%20topographic%20data%20with%20floodplain%20flow%20models_Bates.pdf>. Acesso em: 17 maio 2012.
- [52] MCKEE, Thomas B.; DOESKEN, Nolan J.; KLEIST, John. The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales. In: CONFERENCE ON APPLIED CLIMATOLOGY, 8., 1993, Anaheim, California, USA. **Proceedings...** Boston: American Meteorological Society, 1993. Disponível em: <<http://ccc.atmos.colostate.edu/relationshipofdroughtfrequency.pdf>>. Acesso em: 12 maio 2012.
- [53] MÉTRICA. **TopoEVN**. Piracicaba, 2008. Disponível em: <http://www.metrica.com.br/padrao.aspx?metrica_topoevn_6_edicao_full_content_ct_3328_.aspx>. Acesso em: 19 maio 2012. Website.

- [54] Millennium Ecosystem Assessment. **Ecosystems and Human Well-being: Synthesis**. Washington, DC: Island Press, 2005. 137 p. (The Millennium Ecosystem Assessment series). ISBN 1-59726-040-1. Disponível em: <<http://www.millenniumassessment.org/documents/document.356.aspx.pdf>>. Acesso em: 15 maio 2012. Meio digital.
- [55] MISHRA, Ashok K.; SINGH, Vijay P. A review of drought concepts. **Journal of Hydrology**, [S.l.]: ELSEVIER, v. 391, n. 1-2, p. 202-216, Set. 2010. ISSN 00221694.DOI 10.1016/j.jhydrol.2010.07.012.
- [56] NAGHETTINI, Mauro da Cunha; PINTO, Eber José de Andrade. **Hidrologia Estatística**. Belo Horizonte: CPRM, 2007. 561 p. ISBN 978-85-7499-023-1. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publique/media/livro_hidro_estatistica.zip>. Acesso em: 18 maio 2012. Meio digital.
- [57] OFDA/CRED. **EM-DAT: The OFDA/CRED International Disasters Database**. Université Catholique de Louvain, Brussels, Belgium, 2012. Disponível em: <<http://www.emdat.be>>. Acesso em: 10 maio 2012. Website.
- [58] PERNAMBUCO (Estado). Secretaria de Ciência, Tecnologia e Meio Ambiente (SECTMA). **Plano Estadual de Recursos Hídricos de Pernambuco**. Recife: 1998. 8 v.
- [59] _____. Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Social (SEPLANDES). Fundação de Desenvolvimento Municipal (FIDEM). **Agenda de Reconstrução**. Recife: ÊNFASE-Projetos e Informática, 2000. 1 atlas. Escala 1: 2.500.
- [60] _____. Secretaria de Recursos Hídricos (SRH). **Relatório Técnico Preliminar (Anteprojeto) de 03 (três) Barramentos para o Controle de Cheias na bacia do rio Una – PE**. Recife: Techne – Engenheiros Consultores, 2002. 8 v.

- [61] _____. Secretaria de Planejamento (SEPLAN). Agência Estadual de Planejamento e Pesquisas de Pernambuco (CONDEPE/FIDEM). **Bacia Hidrográfica do rio Una, Quarto e Quinto Grupos de Bacias Hidrográficas de Pequenos rios Litorâneos – GI 4 E GI 5**. Recife: n. 3, 2006. 85 p. (Série Bacias Hidrográficas de Pernambuco). Disponível em: <<http://200.238.107.83/web/condepe-fidem/biblioteca-virtual-download2>>. Acesso em: 26 maio 2012. Meio digital.
- [62] _____. Secretaria de Recursos Hídricos e Energéticos (SRHE). Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC). **Chuvas e Enchentes Ocorridas em Junho de 2010**. Recife: 2010. 7 p. Nota Técnica.
- [63] _____. Secretaria de Recursos Hídricos e Energéticos (SRHE). **Controle de cheias**. Recife, 2011. Disponível em: <http://www.srhe.pe.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=327:barragens-de-contencao-de-cheias>. Acesso em: 22 maio 2012. Website.
- [64] _____. Secretaria de Recursos Hídricos e Energéticos (SRHE). **Bacia do rio Una**. Recife, 2012. Disponível em: <http://www.sirh.srh.pe.gov.br/site/bacia_rio_una.php>. Acesso em: 24 maio 2012. Website.
- [65] PORTO, Rodrigo de Melo. **Hidráulica Básica**. 1. ed. São Carlos: EESC/USP, 1998. 540 p.
- [66] PRADO, Alexandre do. **Nota Técnica: Alteração da Altitude Ortométrica das Estações Automáticas do Sistema de Alerta dos Estados de Pernambuco e Alagoas**. Brasília: ANA, 2011. 5 p. Nota Técnica nº 185/2011/SGH. Documento nº 00000.017834/2011.
- [67] PRADO, Alexandre do; BORELLI, Aldir José. **Relatório Técnico de Viagem: Campanha para a Determinação da Altitude Ortométrica das Referências de Nível das Estações Automáticas no Estado de Pernambuco e Alagoas**. Brasília: ANA, 2011. 50 p. Relatório Técnico de Viagem nº 025/2011/SGH-ANA. Documento nº 00000.017295/2011.

- [68] RABER, George. The Effect of LiDAR Posting Density on DEM Accuracy and Flood Extent Delineation: A Gis-Simulation Approach. In: UCGIS SUMMER ASSEMBLY, 2003, Pacific Grove, California, USA. **Proceedings...** Alexandria: University Consortium for Geographic Information Science, 2003. Disponível em: <<http://www.ucgis.org/summer03/studentpapers/georgeraber.pdf>>. Acesso em: 20 maio 2012.
- [69] RAMOS, Alexandre Moreira; LEANDRO, Diuliana; HUINCA, Suelen Cristina Movio; KRUEGER, Cláudia Pereira. Análise da acurácia horizontal do posicionamento GPS diferencial empregado em levantamentos hidrográficos a partir de sistemas DGPS. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOMÁTICA, 2; COLÓQUIO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS, 5., 2007, Presidente Prudente. **Anais...** Presidente Prudente: UNESP, 2007. v. 1. 9 p. Disponível em: <https://www.mar.mil.br/dhn/chm/levhidrograficos/Leitura_Analise_de_Acuracia.pdf>. Acesso em 8 maio 2012. Meio digital.
- [70] RAMOS, Fábio; OCCHIPINTI, Antônio Garcia; VILLA NOVA, Nilson Augusto; REICHARDT, Klaus; MAGALHÃES, Paulo Canedo de; CLEARY, Robert W. **Engenharia Hidrológica**. 1. ed. Rio de Janeiro: UFRJ/ABRH, 1989. v. 2. 404 p.
- [71] RIBEIRO NETO, Alfredo; CIRILO, José Almir; DANTAS, Carlos Eduardo de Oliveira. Integração de Modelos Chuva-Vazão e Hidrodinâmico para Simulação de Cheias. In: IWRA WORLD WATER CONGRESS, 14., 2011, Porto de Galinhas, Pernambuco, Brasil. **Anais...** Ipojuca: IWRA, 2011. 1 CD-ROM.
- [72] RIGHETTO, Antônio Marozzi. **Hidrologia e Recursos Hídricos**. 1. ed. São Carlos: EESC/USP, 1998. 840 p. ISBN 85-85205-24-5.
- [73] SALLES, Francisco J. Penido; BENTES, Frederico C. Montenegro; SANTOS, José Antonio dos (Org.). **Catálogo de Estações Maregráficas Brasileiras**. 1. ed. Rio de Janeiro: Fundação de Estudos do Mar (FEMAR), 2000. 280 p., tabelas. ISBN 85-85966-16-5. Disponível em: <http://www.fundacaofemar.org.br/biblioteca/emb/cat_emb.html>. Acesso em: 23 maio 2012. Consulta online.

- [74] SANTOS, Keyla Almeida dos; CIRILO, José Almir; RIBEIRO NETO, Alfredo. HEC-HMS: Avaliação na Bacia de Drenagem de Santana do Mundaú. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 11., 2012, João Pessoa, Paraíba. **Anais...** João Pessoa: ABRH, 2012.
- [75] SANTOS, M. S.; PINTO, E. J. A.; MARTINS, L. K. L. A.; PINTO, J. A. O. Definição de limiares de secas e cálculo do índice de precipitação padronizada por meio de análise regional de frequências na bacia do alto São Francisco. **RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, 2011. No Prelo.
- [76] SANTOS, Marcus Suassuna. **Caracterização Espaço-Temporal de Secas utilizando Ondaletas e o Standardized Precipitation Index**: Uma aplicação para a parcela Mineira da bacia do rio São Francisco. 2011. 148 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011. Disponível em: <<http://www.smarh.eng.ufmg.br/defesas/1007M.PDF>>. Acesso em: 10 maio 2012. Meio digital.
- [77] SAUSEN, Tania Maria; MARCELINO, Emerson Vieira; MARCELINO, Isabela Pena Viana de Oliveira; LACRUZ, María Silvia Pardi; SOUSA JUNIOR, Manoel de Araújo. Núcleo de Aplicação e Pesquisa de Geotecnologias em Desastres Naturais e Eventos Extremos no Centro Regional Sul do INPE. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., 2007, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: INPE, 2007. p. 4401-4403. Disponível em: <<http://www.inpe.br/crs/geodesastres/conteudo/publicacoes/geodesastressul.pdf>>. Acesso em: 20 maio 2012. Meio digital.
- [78] SILVA, Rui Carlos Vieira da; MASCARENHAS, Flavio Cesar Borba; MIGUEZ, Marcelo Gomes. **Hidráulica Fluvial**. 2. ed. rev. e atual. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2007. 306 p. ISBN 978-85-285-0108-7.
- [79] SOLE, A.; GIOSSA, L.; NOLÈ, L.; MEDINA, V.; BATEMAN, A. Flood risk modelling with LiDAR technology. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FLOOD RECOVERY, INNOVATION AND RESPONSE, 1., 2008, London, UK. **Proceedings...** London: FRIAR2008, 2008. p. 27-36. DOI 10.2495/FRIAR080031. Disponível em: <<http://www.gits.ws/06articulos/paper/01friar08.pdf>>. Acesso em: 20 maio 2012.

- [80] SOUSA, Matheus Martins de. **Comparação Entre Ferramentas de Modelagem Unidimensional e Quasi-Bidimensional, Permanente e Não-Permanente, em Planejamento e Projetos de Engenharia Hidráulica**. 2010. 160 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <http://fenix3.ufrj.br/60/teses/coppe_m/MatheusMartinsDeSousa.pdf>. Acesso em: 3 maio 2012. Meio digital.
- [81] TECHGEO. **GTR-G²**: Produtos. Juiz de Fora, 2011. Disponível em: <<http://www.techgeo.com.br/site/produtos/gtr-g2>>. Acesso em: 17 maio 2012. Website.
- [82] TUCCI, Carlos Eduardo Morelli (Org.). **Hidrologia**: ciência e aplicação. 2. ed. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 2001. 943 p. (Coleção ABRH de Recursos Hídricos, v. 4). ISBN 85-7025-298-6.
- [83] TUCCI, Carlos Eduardo Morelli. **Modelos Hidrológicos**. 2. ed. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 2005. 678 p. ISBN 85-7025-823-2.
- [84] TUCCI, Carlos Eduardo Morelli; PORTO, Rubem La Laina; BARROS, Mário T. de (Org.). **Drenagem Urbana**. Porto Alegre: ABRH/UFRGS, 1995. 428 p. (Coleção ABRH de Recursos Hídricos, v. 5). ISBN 85-7025-364-8.
- [85] U.S. GEOLOGICAL SURVEY. **Flood Inundation Mapping Science**. Reston, Virginia, 2012. Disponível em: <http://water.usgs.gov/osw/flood_inundation/>. Acesso em: 28 maio 2012. Website.
- [86] USACE. **Hydrologic Engineering Center (HEC)**. Davis, California, USA, 2012. Disponível em: <<http://www.hec.usace.army.mil/>>. Acesso em: 22 maio 2012. Website.
- [87] USGS. **Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)**. Reston, Virginia, USA, 2003. Disponível em: <<http://egsc.usgs.gov/isb/pubs/factsheets/fs07103.html>>. Acesso em: 22 maio 2012. Website.

- [88] _____. **O Ciclo da Água**. Tradução Jayme Nery. Reston, Virginia, USA, 2012. Tradução de: The Water Cycle. Disponível em: <<http://ga.water.usgs.gov/edu/watercycleportuguese.html>>. Acesso em: 13 maio 2012. Website.
- [89] VALERIANO, Márcio de Morisson. **Modelo Digital de Elevação com Dados SRTM disponíveis para a América do Sul**. São José dos Campos: INPE, 2004. 72 p. Relatório Técnico: INPE-10550-RPQ/756. Disponível em: <<http://mtc-m12.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/sergio/2004/06.30.10.57/doc/publicacao.pdf>>. Acesso em: 9 maio 2012.
- [90] _____. **TOPODATA: Guia para Utilização de Dados Geomorfológicos Locais**. São José dos Campos: INPE, 2008. 72 p. Relatório Técnico: INPE-15318-RPQ/818. Disponível em: <<http://mtc-m18.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2008/07.11.19.24/doc/publicacao.pdf>>. Acesso em: 11 maio 2012.
- [91] WEBSTER, Tim L. Flood Risk Mapping Using LiDAR for Annapolis Royal, Nova Scotia, Canada. **Remote Sensing**, Basel, Switzerland, v. 2, p. 2060-2082, 2010. ISSN 2072-4292. DOI 10.3390/rs2092060. Disponível em: <http://agrg.cogs.nsc.ca/gallery2/main.php?g2_view=core.DownloadItem&g2_itemId=1307&g2_GALLERYSID=2e8239a674b3f2876dc0b76173d14992>. Acesso em: 21 maio 2012.
- [92] WEBSTER, Tim L.; FORBES, Donald L.; DICKIE, Steve; SHREENAN, Roger. Using topographic LiDAR to map flood risk from storm-surge events for Charlottetown, Prince Edward Island, Canada. **Canadian Journal of Remote Sensing**, Canadian: Canadian Aeronautics and Space Institute, v. 30, n. 1, p. 64-76, 2004. ISSN 1712-7971. DOI 10.5589/m03-053. Disponível em: <http://agrg.cogs.nsc.ca/gallery2/main.php?g2_view=core.DownloadItem&g2_itemId=458>. Acesso em: 25 maio 2012.
- [93] WEBSTER, Tim L.; FORBES, Donald L.; MACKINNON, Edward; ROBERTS, Daniel. Flood-risk mapping for storm-surge events and sea-level rise using lidar for southeast New Brunswick. **Canadian Journal of Remote Sensing**, Canadian: Canadian Aeronautics and Space Institute, v. 32, n. 2, p. 194-211, 2006. ISSN 1712-7971. DOI 10.5589/m06-016. Disponível em: <http://agrg.cogs.nsc.ca/gallery2/main.php?g2_view=core.DownloadItem&g2_itemId=809>. Acesso em: 22 maio 2012.

- [94] WEBSTER, Tim L.; MOSHER, Roger; PEARSON, Mike. Water Modeler: A component of a Coastal Zone Decision Support System to generate Flood-Risk Maps from Storm Surge Events and Sea-Level Rise. **Geomatica**. v. 62, v. 4, p. 393-406, 2008. Disponível em: <http://agrg.cogs.nsc.ca/gallery2/main.php?g2_view=core.DownloadItem&g2_itemId=966>. Acesso em: 25 maio 2012.
- [95] WESCHENFELDER, Adriana Burin; PICKBRENNER, Karine; PINTO, Eber José de Andrade. Análise da frequência de ocorrência e a classificação das precipitações diárias máximas anuais na região da Laguna dos Patos (sub-bacia 87). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 19., 2011, Maceió. **Anais...** Maceió: ABRH, 2011. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publique/media/Evento_Analise_Weschenfelder.pdf>. Acesso em: 14 maio 2012.
- [96] YAHOO! INC. Flickr. Galeria de governadoreduardocampos. **19.06.10 - Governador Eduardo Campos e ministros em Palmares**. EUA, 2010. Disponível em: <<http://www.flickr.com/photos/governadoreduardocampos/sets/72157624323673648/>>. Acesso em: 28 maio 2012. Website.