

Fellipe Henrique Borba Alves

**SISTEMA DE PREVISÃO DE ENCHENTES: INTEGRAÇÃO DE
MODELOS DE PREVISÃO DE CHUVA, SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA E
HIDRODINÂMICA**

Dissertação 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 Mestre em Engenharia Civil, Área de Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos.

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

Recife

2017

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

A474s Alves, Fellipe Henrique Borba.
Sistema de previsão de enchentes: integração de modelos de previsão de
chuva, simulação hidrológica e hidrodinâmica / Fellipe Henrique Borba
Alves. - 2017.
181f., il., figs., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. José Almir Cirilo, D.Sc.
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Programa de pós-graduação em Engenharia Civil, 2017.
Inclui Referências e Anexos.

1. Engenharia Civil. 2. HEC-HAS. 3. Modelagem Hidrodinâmica
Bidimensional. 4. Bacia do Rio Una. 5. Controle de cheias. 6. Operação de
Reservatórios. I.. Cirilo, José Almir (Orientador). II.Título.

624 CDD (22.ed)

UFPE/BCTG-2017/ 251



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

A comissão examinadora da Defesa de Dissertação de Mestrado

**SISTEMA DE PREVISÃO DE ENCHENTES: INTEGRAÇÃO DE MODELOS DE
PREVISÃO DE CHUVA, SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA E HIDRODINÂMICA**

defendida por

Fellipe Henrique Borba Alves

Considera o candidato APROVADO

Recife, 24 de fevereiro de 2017

Banca Examinadora:

Prof. Dr. José Almir Cirilo – UFPE
(orientador)

Prof. Dr. Artur Paiva Coutinho – UFPE
(examinador externo)

Prof. Dr. Alfredo Ribeiro Neto – UFPE
(examinador interno)

Dedico este trabalho a todas as pessoas que já conheci na vida. Àquelas que me geraram, me amaram, deitaram comigo ou apenas esbarraram uma vez em algum lugar.

Na devida proporção, cada um se prestou a minha observação e inevitável aprendizado. Tudo o que eu penso agora não é fruto apenas da minha essência, mas também combinação de efeitos com o mundo em que vivo.

“Algo pensa em mim”
(*Friedrich Nietzsche*)

AGRADECIMENTOS

A minha mãe, **Izabel Cristina Borba**, pelo exemplo de amor incondicional, por ter dedicado sua vida à estrutura familiar e por demonstrar vitalidade e alegria com as coisas mais simples.

Ao meu pai, **Genival Alves** (*In memorian*), por ter conseguido dar bons exemplos apesar de suas adversidades, pelas demonstrações de talento e por ter amado sua família durante toda vida.

Aos meus irmãos e sobrinhos, pela alegria dos pequenos **Rodrigo e Guilherme**, e pela continuidade da família que se inicia.

Ao **Prof. Almir Cirilo**, por ter me dado a honra de ser seu orientado acadêmico e profissional ao longo de quase cinco anos. Obrigado pelas oportunidades, prestígio e reconhecimento. Até aqui carreguei não só um pouco do conhecimento na área de recursos hídricos, mas um pouco também da sabedoria pessoal e da ética profissional.

Aos companheiros de estudo, **Vladimir Nascimento, Cristiane Ribeiro e Paulo Abadie**, muito obrigado pelo apoio e incentivo nas horas de cansaço. A ajuda de vocês foi fundamental para que tudo tenha dado certo. **Cris e Paulinho**, obrigado por ensinarem a ser uma pessoa mais generosa. **Vladimir**, obrigado por mais uma parceria que se deu do primeiro ao último dia do mestrado.

Aos amigos da época da faculdade, em especial aos que prologaram o convívio na “vida adulta”. **Anderson Farias, Bruno de Melo, Heverton Melo e Miro Almeida**, obrigado pelo convívio dos últimos anos, pelas gargalhadas e por tudo que foi compartilhado.

Aos amigos de Caruaru que estou vendo cada vez menos, mas sempre terão portas abertas para boas conversas, acompanhadas de petiscos e cerveja. Aqui é **melhor nem listar nomes** para não deixar ninguém de fora. Obrigado a todos pela contribuição na minha formação social.

Aos amigos e precursores científicos neste trabalho, **Prof. Alfredo Ribeiro, Edilson Silva, Kadu Dantas e Keyla Almeida**, parabéns pelos feitos e obrigado pelos importantes conhecimentos transmitidos no início da minha formação profissional.

Aos amigos e colegas de trabalhos da área de recursos hídricos, em especial à **Lorenzza Leite, Assis Ferreira, Simone Freitas, Raimundo Patriota e Marinalda Rocha**, por proporcionarem dias de trabalho repletos de alegria e pelo exemplo de comprometimento e ética no serviço público, que motiva e renova a esperança por tempos melhores.

Ao **Governo do Estado de Pernambuco**, que possibilitou a realização deste trabalho sem me afastar das atividades profissionais e proporcionou a utilização de base cartográfica de alta resolução. Agradeço às oportunidades de aprendizado e a experiência adquirida nos últimos anos. Sou grato por poder contribuir com a realização de bons serviços públicos à população. Ainda que não seja unânime, sou grato.

À **Agência Pernambucana de Águas e Clima**, que colaborou significativamente com a utilização dos dados meteorológicos. Obrigado aos meteorologistas **Thiago Luiz Silva** e **Patrice Oliveira** por toda contribuição solidária ao desenvolvimento do trabalho.

Aos engenheiros do Centro de Engenharia Hidrológica dos Estados Unidos – HEC, **Tom Evans, Matt Fleming, Mark Jensen e Cameron Ackerman**, por terem transmitido conhecimentos importantes para realização deste trabalho durante curso promovido em Brasília através Agência Nacional de Águas – ANA.

Por fim, agradeço à vida e todas as coisas boas que aconteceram até aqui.

Debaixo d'Água¹

“Debaixo d'água tudo era mais bonito
mais azul mais colorido
só faltava respirar
Mas tinha que respirar.

Debaixo d'água se formando como um feto
sereno confortável amado completo
sem chão sem teto sem contato com o ar.

Mas tinha que respirar
Todo dia
Todo dia, todo dia
Todo dia
Todo dia, todo dia
Todo dia

Debaixo d'água por enquanto sem sorriso e sem pranto
sem lamento e sem saber o quanto
esse momento poderia durar.
Mas tinha que respirar

Debaixo d'água ficaria para sempre ficaria contente
longe de toda gente para sempre
no fundo do mar

Mas tinha que respirar
Todo dia
Todo dia, todo dia
Todo dia
Todo dia, todo dia
Todo dia

Debaixo d'água protegido salvo fora de perigo
aliviado sem perdão e sem pecado
sem fome sem frio sem medo sem vontade de voltar
Mas tinha que respirar

Debaixo d'água tudo era mais bonito
mais azul mais colorido
só faltava respirar

Mas tinha que respirar
Todo dia
Todo dia, todo dia
Todo dia
Todo dia, todo dia
Todo dia”

“É no seio deste mundo, permanecendo nesta terra e nesta vida, que é preciso aprender a distinguir o que vale ser vivido e o que merece perecer”. (Friedrich Nietzsche)

¹ Antunes, Arnaldo. Debaixo d'Água. In: Arnaldo Antunes. **Paradeiro**. Salvador: BMG, p 2001. 1 CD (ca, 47 min). Faixa 6 (3 min 24 s).

RESUMO

Resumo da Dissertação apresentada ao PPGEC/UFPE como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.).

SISTEMA DE PREVISÃO DE ENCHENTES: INTEGRAÇÃO DE MODELOS DE PREVISÃO DE CHUVA, SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA E HIDRODINÂMICA

FELLIPE HENRIQUE BORBA ALVES

Fevereiro/2017

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

ALVES, Fellipe Henrique Borba. 2017. **Sistema de previsão de enchentes: integração de modelos de previsão de chuva, simulação hidrológica e hidrodinâmica**. 183f. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017.

A Região Nordeste do Brasil é comumente associada às secas prolongadas. No entanto, áreas específicas estão susceptíveis à ocorrência de chuvas intensas, onde podem ser geradas enchentes catastróficas. Nesse contexto, para a bacia do rio Una, em Pernambuco, foi desenvolvido um modelo de previsão de enchentes, capaz de integrar informações de previsão de chuva, modelagem hidrológica e modelagem hidrodinâmica. Neste trabalho buscou-se analisar dados dos modelos de previsão de chuva ETA 40 Km e APAC 9 Km, avaliar a distribuição da vazão gerada através de modelo hidrológico HEC-HMS e testar novos coeficientes de calibração, simular no modelo hidrodinâmico HEC-RAS o efeito da construção de barragens nas cidades de Palmares, Água Preta e Barreiros para o maior evento de chuva já registrado, ocorrido em 2010. Os resultados encontrados indicaram relevante diferença quantitativa e posicional nos dados dos modelos de previsão. O modelo hidrológico HEC-HMS teve melhorias na distribuição de vazão ao longo da bacia e na estabilidade global das vazões geradas. O modelo hidrodinâmico demonstrou redução significativa na vazão de pico a montante das áreas urbanas de Palmares, Água Preta e Barreiros, respectivamente. No entanto, mesmo com redução expressiva de vazão, as inundações nesses municípios ainda podem ocorrer caso eventos semelhantes ao de 2010 venham a acontecer.

Palavras-chave: HEC-RAS. Modelagem Hidrodinâmica Bidimensional. Bacia do rio Una. Controle de Cheias. Operação de Reservatórios.

ABSTRACT

Abstract of Thesis presented to PPGEC / UFPE as part of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.).

ADVANCED FLOOD FORECASTING: ANALYSIS AND IMPROVEMENTS OF RAIN FORECAST, HYDROLOGICAL AND HYDRODYNAMIC MODELS

FELLIPE HENRIQUE BORBA ALVES

February/2017

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

ALVES, Felipe Henrique Borba. 2017. **Flood prediction system: integration of rain forecast models, hydrological simulation and hydrodynamics**. 183 f. Dissertation (Masters) – Federal University of Pernambuco, Recife, 2017.

Northeast Brazil is commonly associated with prolonged drought effects. However, in specific areas are likely to occur from intense rainfall events, where such events generate catastrophic flooding. In this context, an Advanced Flood Forecasting Model was developed for an Una river basin in Pernambuco, capable of integrating information on rainfall forecasting, hydrological modeling and hydrodynamic modeling. The objective of this work is to analyze the data of the ETA 40 km and APAC 9 km rain forecast models, to evaluate a flow distribution generated through a HEC-HMS hydrological model and to test new calibration coefficients, to simulate in hydrodynamic model HEC-RAS the effect of flood control dams and generate a flood spot in the cities of Palmares, Água Preta and Barreiros, considering the largest rainfall event ever recorded in 2010. The results indicated the quantitative difference and the data of the forecast models, the HEC-HMS hydrological model had improvements in the flow distribution along the basin and in the overall stability of the flows generated, the hydrodynamic model demonstrated a reduction in the upstream peak flow of the urban areas of Palmares, Água Preta and Barreiros, respectively. However, even with expressive flow reduction, such as floods in municipalities can still occur if events similar to the year 2010 occur again.

Palavras-chave: HEC-RAS. Two-dimensional Hydrodynamic Modeling. Una River basin. Flood Control. Reservoir Operation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Registros globais de inundações entre de 1950 a 2010.....	25
Figura 2 – Registros globais de eventos de inundação entre 1970 e 2011.	26
Figura 3 – Distribuição de danos e prejuízos com inundações nas regiões brasileiras no período de 1995 a 2014.....	27
Figura 4- Imagens de Satélite geradas pelo Lamepe do dia 17 de junho de 2010 às 17h 45min (Figura 4a) e 23h 45min (Figura 4b) GMT.	30
Figura 5 – Anomalia de temperatura da superfície do mar entre 09 de junho de 2010 a 16 de junho de 2010.....	30
Figura 6 – Bairros completamente inundados no município de Palmares em 19/06/2010....	39
Figura 7 – Viaduto Profa. Lúcia Paiva, destruído pela inundação do rio Una, no município de Palmares..	39
Figura 8 – Destroços no cenário de destruição no município de Barreiros logo após as enchentes de 2010.	40
Figura 9 – Ações para reconstrução de infraestrutura urbana em Palmares.	41
Figura 10 – Execução de serviços de readequação e ampliação da calha do rio Una.	43
Figura 11 – Identificação de áreas de ocupação irregular e desapropriações realizadas em edificações às margens do rio Una, em Palmares.	44
Figura 12 – Representação das barragens de controle de cheias na bacia dos rios Una e Sirinhaém.	45
Figura 13 – Barragem Serro Azul, em Palmares-PE.....	46
Figura 14 – Esquema de obtenção de imagens de satélites.	47
Figura 15– Representação do comportamento espectral de diferentes alvos em função dos comprimentos de onda.	48
Figura 16 – Região de sobreposição frontal entre fotografias aéreas para geração de par estereoscópico.....	50
Figura 17 – Método de obtenção de pontos a partir de perfilamento a laser.	52
Figura 18 – Demonstração de feixe de luz do sensor laser e detecção de pontos a partir de diferentes retornos e alturas.	54
Figura 19 – Identificação de áreas mapeadas pelo primeiro perfilamento a laser após as cheias de 2010 e 2011.....	56
Figura 20 – Divisão de blocos e quadrículas do mapeamento Pernambuco Tridimensional para todo território do Estado.....	56
Figura 21 – Amostra de produtos da escala 1:1000 na área urbana de Caruaru.	58
Figura 22 – Página de disponibilização de dados do Pernambuco Tridimensional.	59
Figura 23 – Malha do modelo numérico de previsão OLAM.....	62

Figura 24 – Pós-processamento da precipitação prevista no modelo Eta 15km do CPTEC/INPE.	63
Figura 25 – Etapas de cálculo na relação chuva x vazão em modelos hidrológicos.....	66
Figura 26 – Principais componentes hidrodinâmicas do escoamento em rios.....	68
Figura 27 – Esquema geral do Monitor Avançado de Enchentes – MAVEN.	71
Figura 28 – Tela principal de funcionalidades do Sistema MAVEN.....	72
Figura 29 – Pontos da grade de previsão de satélites e gráficos de precipitação.	72
Figura 30 – Gráficos de dados de chuva, nível e vazão de rios obtidos da ANA.....	73
Figura 31 – Mapa de localização da bacia hidrográfica do rio Una.	74
Figura 32 – Mapa da bacia do rio Una e limite dos municípios integrantes.	75
Figura 33 – Mapa de hidrografia simplificada da bacia do rio Una e principais barragens. ..	78
Figura 34 – Precipitações médias anuais entre 1977 e 2006 na bacia do rio Una.	80
Figura 35 – Mapa de domínios geológicos da bacia do rio Una.	81
Figura 36 – Mapa de relevo da bacia do rio Una.....	82
Figura 37 – Mapa hipsométrico da bacia do rio Una.	82
Figura 38 – Mapa de solos da bacia do rio Una.	84
Figura 39 - Mapa de vegetação da bacia do rio Una.....	85
Figura 40 – Leito seco do rio Una em São Bento do Una e vegetação típica de Caatinga. .	86
Figura 41 – Leito do rio Pirangi em São Benedito do Sul e vegetação típica da Zona da Mata.	86
Figura 42 – Simulação dos modelos de previsão numérica ETA (40 e 20 Km), GFS, RPSAS (Regional Physical-space Analysis System), T213 e ENSEMBLE de precipitação acumulada para 21h do dia 17 de Junho de 2010.....	91
Figura 43 – Discretização da bacia do Una adotada para modelagem hidrológica no HEC-HMS.	94
Figura 44 – Vazões geradas pelas sub-bacias do modelo HEC-HMS da bacia do rio Una para o evento de chuva de 2010.....	95
Figura 45 – Balanço hídrico esquemático utilizado na metodologia “Soil Moisture Accounting – SMA”.....	97
Figura 46 – Localização das seções transversais do modelo hidrodinâmico, municípios e barragens para controle de cheias da bacia do Una.	106
Figura 47 – Seção típica do modelo hidrodinâmico HEC-RAS da bacia do Una.	106
Figura 48 – Seções transversais do HEC-RAS ao longo da barragem Igarapeba (em construção).....	107
Figura 49 – Curvas de parâmetros hidráulicos para seção transversal do HEC-RAS.	108
Figura 50 – Seções transversais do modelo hidrodinâmico com e sem barragem.	109
Figura 51 – Dados de entrada para definição da geometria de barragem no HEC-RAS. ...	111

Figura 52 – Parâmetros de configuração dos dispositivos de descarga.	112
Figura 53 – Barragem Igarapeba no modelo hidrodinâmico HEC-RAS.	113
Figura 54 – Esquema de simulação bidimensional nas áreas urbanas de Água Preta e Palmares-PE.	114
Figura 55 – Detalhes da malha de células para modelagem bidimensional em Palmares-PE.	115
Figura 56 – Comparativo do Modelo Digital do Terreno antes e depois dos serviços de readequação da calha do rio Una, em Palmares.	116
Figura 57 – Exemplo de perfil do terreno na borda, curva área x elevação e curva perímetro molhado x elevação para uma célula do HEC-RAS 2D.	117
Figura 58 – Distribuição da chuva medida no período de 16 a 20 de junho de 2010.	119
Figura 59 – Distribuição da chuva prevista no modelo ETA 40 km no período de 16 a 20 de junho de 2010.	120
Figura 60 – Distribuição da chuva prevista no modelo APAC 9 km no período de 16 a 20 de junho de 2010.	121
Figura 61 – Precipitação média por sub-bacia no período de 16 a 20 de junho de 2010. ..	124
Figura 62 – Vazão específica na bacia do Una gerada pelo modelo hidrológico do sistema MAVEN 1.0.	125
Figura 63 – Vazão específica na bacia do Una gerada pelo modelo hidrológico do Sistema MAVEN 2.0.	126
Figura 64 – Vazões estimadas e observadas na calibração do modelo hidrológico MAVEN 2.0, no período de 25/01 a 11/02/04.	130
Figura 65 – Vazões estimadas e observadas na calibração do modelo hidrológico MAVEN 2.0, no período de 16/06 a 03/07/00.	131
Figura 66 – Vazões estimadas e observadas na calibração do modelo hidrológico MAVEN 2.0, no período de 16/06 a 03/07/10.	132
Figura 67 – Vazões estimadas e observadas na calibração do modelo hidrológico MAVEN 2.0, no período de 28/04 a 15/05/11.	133
Figura 68 – Trecho do perfil longitudinal do rio Una e barragem Serro Azul em sua condição inicial de operação.	136
Figura 69 – Trecho do perfil longitudinal do rio Una e barragem Serro Azul em nível máximo de acumulação durante a simulação do evento de chuva de 2010.	137
Figura 70 – Resumo de descargas da barragem Igarapeba na cheia de 2010.	139
Figura 71 – Resumo de descargas da barragem Panelas na cheia de 2010.	139
Figura 72 – Resumo de descargas da barragem Serro Azul na cheia de 2010.	140
Figura 73 – Hidrogramas a montante da área urbana de Palmares para simulação de 2010 com e sem os efeitos das barragens de controle de cheias.	141

Figura 74 – Hidrogramas a montante da área urbana de Água Preta para simulação de 2010 com e sem os efeitos das barragens de controle de cheias.	142
Figura 75 – Hidrogramas a montante da área urbana de Água Preta para simulação de 2010 com e sem os efeitos das barragens de controle de cheias.	142
Figura 76 – Malha de células da simulação bidimensional, gráfico de vazão de seção transversal e profundidade de um ponto na área urbana de Água Preta.	145
Figura 77 – Resultados da simulação hidrodinâmica bidimensional para o evento de 2010 sem barragens, na área urbana de Palmares.	146
Figura 78 – Variação da direção e intensidade da velocidade ao longo da área urbana de Palmares.	146
Figura 79 – Mapa de inundação de área urbana de Palmares-PE, cheia de 2010 sem barragens.	149
Figura 80 – Mapa de inundação de área urbana de Palmares-PE, cheia de 2010 com barragens.	150
Figura 81 – Mapa de inundação de área urbana de Água Preta-PE, cheia de 2010 sem barragens.	151
Figura 82 – Mapa de inundação de área urbana de Água Preta-PE, cheia de 2010 com barragens.	152
Figura 83 – Mapa de inundação de área urbana de Barreiros-PE, cheia de 2010 sem barragens.	153
Figura 84 – Mapa de inundação de área urbana de Barreiros-PE, cheia de 2010 com barragens.	154

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Sumário de perdas e danos no Estado de Pernambuco em decorrência das enchentes ocorridas em junho de 2010.	27
Tabela 2 – Barragens em construção para contenção de enchentes nas bacias do rio Una e Sirinhaém.	45
Tabela 3 – Características técnicas dos produtos do Pernambuco Tridimensional.	57
Tabela 4 – Mesorregiões, regiões de desenvolvimento e municípios drenados pela bacia do rio Una.	76
Tabela 5 – Reservatórios existentes na bacia do rio Una até 2016.	77
Tabela 6 – Reservatórios em construção na bacia do rio Una.	78
Tabela 7 – Classificação de vegetação, uso e ocupação do solo para bacia do Una.	87
Tabela 8 – Postos pluviométricos utilizados na modelagem hidrológica.	88
Tabela 9 - Postos fluviométricos utilizados na modelagem hidrológica.	89
Tabela 10 – Dimensões dos dispositivos de descargas das barragens simuladas.	111
Tabela 11 – Coeficientes de Nash-Sutcliffe para o período de 25/01 a 11/02/04, utilizado na calibração do modelo hidrológico do Sistema MAVEN 1.0.	127
Tabela 12 – Coeficientes de Nash-Sutcliffe para o período de 25/01 a 11/02/04, utilizado na calibração do modelo hidrológico do Sistema MAVEN 2.0.	128
Tabela 13 – Coeficientes de Nash Sutcliffe para versão do MAVEN 1.0 em períodos anuais de 2004 a 2014.	134
Tabela 14 – Coeficientes de Nash Sutcliffe para versão do MAVEN 2.0 em períodos anuais de 2004 a 2014.	134
Tabela 15 – Volume acumulado nas barragens durante simulação da cheia de 2010.	141
Tabela 16 – Amortecimento de cheia para configuração das barragens simuladas.	141
Tabela 17 – Amortecimento das cheias de 2010 nas áreas urbanas dos municípios de Palmares, Água Preta e Barreiros após construção de barragens.	143

LISTA DE SIGLAS E ABREVIações

1D - Unidimensional

2D - Bidimensional

ANA - Agência Nacional de Águas

APAC - Agência Pernambucana de Águas e Clima

ASCII - American Standard Code for Information Interchange

ASTER - Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer

BRAMS - Brazilian Regional Atmospheric Modeling System

CAD - Computer Aided Design

CBMPE - Corpo de Bombeiros Militar de Pernambuco

CEPED - Centro de Estudos e Pesquisas em Engenharia e Defesa Civil

CPTEC - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos

CODECIPE - Coordenadoria de Defesa Civil do Estado de Pernambuco

CONDEPE-FIDEM - Agência Estadual de Planejamento e Pesquisa de Pernambuco

CPRM - Serviço Geológico do Brasil

EBAPE – Empresa de Abastecimento e Extensão Rural de Pernambuco

EM-DAT - Emergency Events Database

ENOS - El Niño-Oscilação Sul

GDEM - Global Digital Elevation Model

GEOSS - Global Earth Observation System of Systems

GFS - Global Forecast System

GI - Grupo de Rios Interiores

GL - Grupo de Rios Litorâneos

GNSS - Global Navigation Satellite System

GW - Groundwater

HEC - Hydrologic Engineering Center

HMS - Hydrologic Modeling System

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IMU - Inertial Measurement Unit

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

IPA - Instituto Agrônômico de Pernambuco

ITEP - Instituto Tecnológico de Pernambuco

LAMEPE - Laboratório de Meteorologia de Pernambuco

LIDAR - Light Detection and Ranging

LP DAAC - Land Processes Distributed Active Archive Center

MAVEN - Monitoramento Avançado de Enchentes

MCG - Modelo de Circulação Global

MDE - Modelo Digital de Elevação

MDT - Modelo Digital de Terreno

METI - Ministry of Economy, Trade and Industry

NASA - National Aeronautics and Space Administration

NCEP - National Centers for Environmental Prediction
NOAA - National Oceanic & Atmospheric Administration
OLAM - Ocean Land Atmosphere Model
PCD - Plataforma de Colota de Dados
PE3D - Pernambuco Tridimensional
PERH - Plano Estadual de Recursos Hídricos
PNG - Portable Network Graphics
RAS - River Analysis System
RMR - Região Metropolitana do Recife
RPSAS - Regional Physical-space Analysis System
SAD - Sistema de Apoio à Decisão
SCS - Soil Conservation Service
SDEC - Secretaria de Desenvolvimento Econômico
SERH - Secretaria Executiva de Recursos Hídricos
SES - Secretaria Estadual de Saúde de Pernambuco
SI - Sistema Internacional
SMA - Soil Moisture Accounting
SRHE - Secretaria de Recursos Hídricos e Energéticos
SRTM - Shuttle Radar Topography Mission
SSD - Sistema de Suport à Decisão
TFW - Tiff File World
TIF - Tagged Image File Format
TIN - Triangular Irregular Network
TRMM - Tropical Rainfall Measuring Mission
UFPE - Universidade Federal de Pernambuco
UP - Unidade de Planejamento Hídrico
USACE - United States Army Corps of Engineering
UTC - Coordinated Universal Time
WRF - Weather Research and Forecasting

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	20
1.1. Problemática e Justificativa	20
1.2. Objetivos Gerais	21
1.3. Objetivos Específicos	21
1.4. Estrutura do Trabalho	22
CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	23
2.1. A gestão de recursos hídricos e o desenvolvimento socioeconômico	23
2.2. Chuvas intensas e um panorama dos prejuízos associados às enchentes	25
2.4. Ocorrência de Cheias em Pernambuco	31
2.4.1. Histórico de cheias em Pernambuco	31
2.4.2. O evento de cheia de 2010	38
2.5 Ações para mitigação dos efeitos de enchentes em Pernambuco	40
2.5.1. Investimentos para reconstrução da infraestrutura urbana	41
2.5.2. Previsão de Eventos Críticos e Prevenção de Catástrofes Naturais - Sala de Situação	42
2.5.3. Readequação e ampliação da calha do rio Una e desapropriações de áreas de risco	43
2.5.4. Construção de barragens para controle de cheias	44
2.6. Geotecnologias para elaboração de estudos e projetos de recursos hídricos	46
2.6.1. Sensoriamento remoto e imagens de satélites	47
2.6.2. Aerofotogrametria e restituição estereoscópica	49
2.6.3. Bases altimétricas globais	50
2.6.4. Perfilamento a laser e a tecnologia LiDAR	51
2.7. Programa Pernambuco Tridimensional – PE3D: base cartográfica para inovação tecnológica da gestão governamental de Pernambuco	54

2.8. Ferramentas de suporte à tomada de decisões em situações de eventos extremos	60
2.8.1. Modelos de previsão meteorológica	60
2.8.2. Modelos de simulação hidrológica	63
2.8.3. Modelos de simulação hidrodinâmica	67
2.9. Monitor Avançado de Enchentes – MAVEN	69
CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA PROPOSTA	74
3.1. Caracterização da bacia do rio Una	74
3.1.1. Localização e extensão da bacia hidrográfica do rio Una	74
3.1.2. Divisão político administrativa e aspectos socioeconômicos	75
3.1.3. Hidrografia e uso da água	77
3.1.4. Climatologia e precipitações	79
3.1.5. Geologia e relevo	80
3.1.6. Solos	83
3.1.7. Vegetação e uso do solo	85
3.2. Dados hidrológicos	87
3.3. Dados cartográficos	90
3.4. Análise comparativa entre dados de previsão meteorológica e precipitação medida em postos pluviométricos	90
3.4.1. Análise dos dados de previsão numérica do modelo ETA 40 km	91
3.4.2. Análise dos dados de previsão numérica do modelo APAC 9 km	92
3.4.3. Análise da chuva medida em postos pluviométricos	93
3.5. Aperfeiçoamento do modelo hidrológico da bacia do rio Una	93
3.5.1. Análise da distribuição de vazão gerada através de modelo HEC-HMS	94
3.5.2. Configuração dos métodos de cálculo do balanço hídrico no modelo hidrológico HEC-HMS	95
3.5.3. Verificação da precisão do modelo hidrológico	102
3.6. Modelagem hidrodinâmica unidimensional da bacia do rio Una	103

3.6.1. Definição da nova geometria e pré-processamento das seções -----	105
3.6.2. Simulação de reservatórios para controle de cheias-----	109
3.7. Modelagem hidrodinâmica bidimensional de áreas urbanas -----	114
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO -----	119
4.1. Análise comparativa entre dados de previsão meteorológica e precipitação medida em postos pluviométricos -----	119
4.2. Aperfeiçoamento do modelo hidrológico da bacia do rio Una -----	123
4.2.1. Análise comparativa entre a distribuição de chuva na bacia do rio Una e a vazão gerada através de modelo HEC-HMS-----	123
4.2.2. Resultados de calibração para o modelo hidrológico da bacia do rio Una ----- -----	126
4.3. Modelagem hidrodinâmica de barragens para controle de cheias na bacia do rio Una -----	136
4.4. Modelagem hidrodinâmica bidimensional em áreas urbanas -----	144
4.5. Considerações sobre a recorrência de inundações e a operação dos reservatórios -----	155
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES -----	157
5.1. Conclusões -----	157
5.2. Recomendações para trabalhos futuros -----	159
Referências-----	161
Anexo-----	171

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

1.1. Problemática e Justificativa

O Brasil é um país notadamente conhecido pela abundância hídrica, recebendo destaque global para questões ambientais devido à sua densa rede hidrográfica e expressiva disponibilidade de águas superficiais e subterrâneas. Consideradas suas grandes dimensões territoriais, com predominâncias de áreas de clima tropical, também é claramente identificada a diversidade de fenômenos naturais relacionados aos recursos hídricos.

Ao observar as questões hídricas da região Nordeste do país, rapidamente se faz associação ao clima semiárido, que de fato é predominante. Esta predominância climática é responsável pelas principais características da referida região, onde eventos extremos de escassez hídrica são comuns e levam entidades políticas, acadêmicas e a própria sociedade a desenvolverem técnicas de convivência com o semiárido.

No entanto, ao falar da ocorrência de eventos de grande intensidade pluviométrica, o Nordeste do Brasil também deve ser incluído nas áreas a receber atenção. Diferentemente de outras regiões, no Nordeste é possível haver períodos de vários anos sem inundações nas áreas urbanas, normalmente fragilizando as medidas preventivas adotadas pela população e fazendo com que os riscos de vida e perdas materiais aumentem consideravelmente.

Quanto ao desenvolvimento de estudos e projetos vinculados a engenharia de recursos hídricos, um desafio é o conhecimento dos aspectos fisiográficos de grandes áreas. Além disso, métodos de cálculos mais sofisticados demandam o conhecimento da variação altimétrica com precisão para se obter bons resultados em simulações que visam reproduzir fenômenos naturais como o escoamento das águas nas calhas dos rios.

A simulação hidrodinâmica fornece informações de grande importância para gestão de eventos de chuvas intensas, no entanto a necessidade de ganhar tempo na mobilização das equipes de defesa civil demanda o acompanhamento de dados de previsão meteorológicas, dados de chuva e vazão transmitidos quase que em tempo real através postos telemétricos.

Sendo assim, o desenvolvimento de sistemas estruturados que permitam integrar modelos matemáticos e realizar simulações a partir de diferentes fontes de dados, realizando diferentes cenários a serem analisados por gestores de recursos hídricos compõem algumas das premissas que justificam este trabalho.

Nesse contexto, este trabalho também se justifica diante dos desafios associados aos recorrentes eventos de chuvas intensas que atuam sobre a região Nordeste e das catástrofes associadas a estes eventos. De maneira específica, as justificativas ainda se fundamentam de forma indiscutível ao se ter conhecimento que em algumas das inundações houve perdas de vidas humanas e em muitas outras ocorrem grandes perdas de bens públicos e privados.

1.2. Objetivos Gerais

Este trabalho tem como objetivo geral o aperfeiçoamento dos sistemas de previsão e gestão dos riscos em eventos de chuvas extremas, bem como transferir conhecimento operacional de simulações para o corpo técnico gestor de recursos hídricos do Estado de Pernambuco.

1.3. Objetivos Específicos

Este trabalho tem como objetivos específicos as seguintes proposições:

- Avaliação da precisão de dados de previsão meteorológica
- Atualização de modelos hidrológicos e hidrodinâmicos existentes para a bacia do rio Una

- Simulação dos efeitos das cheias de 2010 e 2011 após à construção de barragens para controle de cheias
- Aplicação da base cartográfica do mapeamento Pernambuco Tridimensional para simulações hidrodinâmicas bidimensionais

1.4. Estrutura do Trabalho

A presente dissertação teve como proposta de estrutura a subdivisão em cinco capítulos. O conteúdo de cada capítulo pode ser conhecido através de breve resumo descritivo apresentado a seguir:

No Capítulo 1 são apresentados problemas relacionados à ocorrência de cheias e a motivação da realização deste trabalho, os objetivos gerais e específicos e o presente item que descreve a estrutura do trabalho. O Capítulo 2 traz uma fundamentação teórica visando o melhor entendimento das questões abordadas ao longo da dissertação: para este capítulo buscaram-se autores clássicos para apresentação de conceitos já consagrados, bem como autores mais recentes que representassem as tendências tecnológicas da atualidade.

O Capítulo 3 apresenta os materiais e métodos utilizados na pesquisa. Neste item buscou-se descrever as informações referentes à caracterização da área estudada e detalhes sobre os modelos existentes para a bacia do rio Una, desenvolvidos em trabalhos anteriores, e quais técnicas e ferramentas estão sendo aplicadas para aperfeiçoamento do sistema.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados mais relevantes. Neste capítulo mostra-se de maneira ilustrada os ganhos obtidos no sistema de previsão e controle de enchentes da bacia do Una, relacionando os resultados encontrados com aqueles obtidos por outros autores. Por fim, o Capítulo 5 mostra de maneira sucinta os pontos conclusivos do trabalho e faz algumas sugestões e recomendações para a continuidade desta pesquisa.

CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. A gestão de recursos hídricos e o desenvolvimento socioeconômico

A água é indiscutivelmente um recurso de extrema relevância para a vida no planeta e essa importância vem historicamente acompanhando o desenvolvimento da humanidade. Primordialmente utilizada para dessedentação e cultivo de alimentos, a presença de água transcende da condição de recurso natural necessário para a sobrevivência e torna-se, para o mundo moderno, elemento fundamental também ao desenvolvimento social, econômico e industrial (SETTI et al., 2001 [1]; BARROS & AMIN, 2007 [2]).

É possível dizer que a ideia de água como um recurso limitado está completamente difundida por todo o mundo. No entanto, considerando a importância da água também nas questões econômicas e sociais, entram em cena fatores diversos como a quantidade, qualidade, transporte, armazenamento e custos (YASSUDA, 1993) [3]. O planejamento, a execução, a operação e a manutenção de serviços e obras para utilização, controle e conservação das águas pressupõem a avaliação e o equacionamento das múltiplas variáveis que caracterizam valor as mesmas (YASSUDA, 1993) [3].

O Brasil possui um sistema de gestão territorial extremamente vinculado aos recursos hídricos, sendo bastante comum situação em que fronteiras territoriais entre estados e municípios sejam definidas por rios ou bacias hidrográficas (PORTO & PORTO, 2008) [4]. A delimitação das bacias hidrográficas é adotada como unidade hídrica de gestão: a Política Nacional de Recursos Hídricos, instituída através da Lei nº 9433 de 08 de janeiro de 1997, estabelece que a gestão dos recursos hídricos no Brasil deve ser descentralizada e contar com a participação do Poder Público e dos diversos usuários (BRASIL, 1997) [5].

Na região Nordeste do Brasil, particularmente na região semiárida, a disponibilidade e os usos da água são uma questão crucial para o desenvolvimento. Grandes esforços vêm sendo empreendidos com o objetivo de implantar infraestruturas capazes de

disponibilizar água suficiente para garantir o abastecimento humano e animal e viabilizar a irrigação (CIRILO, MONTENEGRO & CAMPOS, 2010) [6].

De contraponto à escassez hídrica, o excesso de água vindo a provocar inundações pode ter causas de origens naturais, no caso de chuvas intensas e efeitos de marés, ou causas antrópicas, como obstrução de canais, desmatamento e mau uso do solo. Tais problemas tornam-se mais graves com o aumento da população que resulta em mais urbanização, mais áreas impermeáveis, menos infiltração e maiores escoamentos (TINGSANCHALI, 2011) [7].

O impacto das cheias é um dos desastres mais significativos do mundo e cabe ao Poder Público implantar medidas de prevenção e mitigação das perdas por inundações, através de medidas estruturais como a construção de represas e diques, ou com medidas não estruturais como a utilização de sistemas de previsão e alerta de cheias, planos de gerenciamento de riscos, incentivo à participação social e organização de arranjos institucionais preparados para tais ocorrências (TINGSANCHALI, 2011) [7].

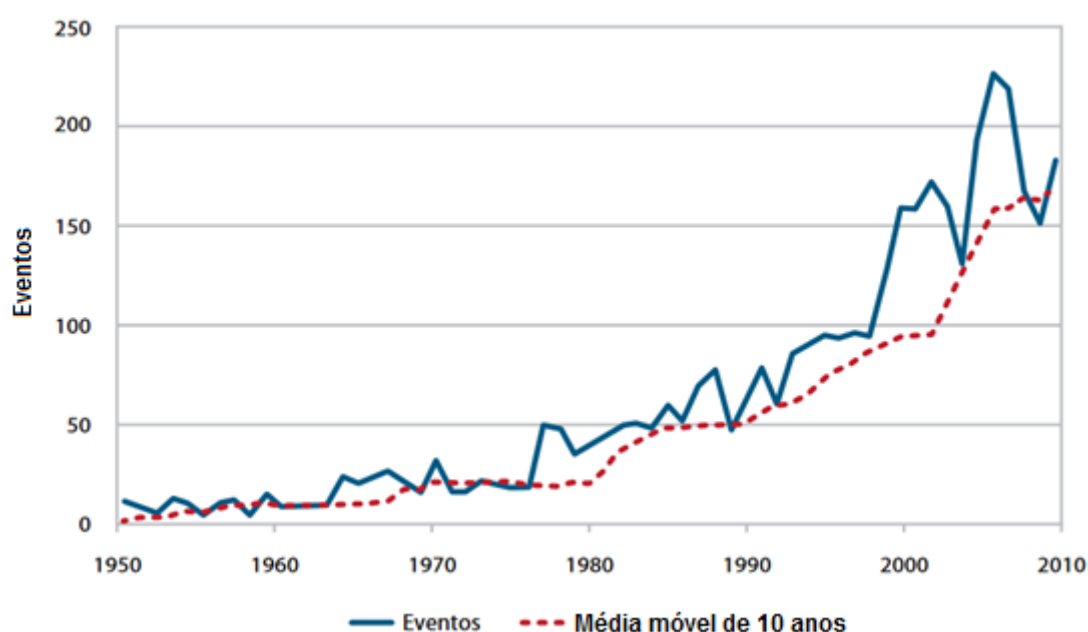
Com isso, percebe-se que o desenvolvimento de políticas públicas para o fortalecimento da gestão de recursos hídricos, na sua ampla importância socioeconômica, é cada vez mais relevante ao Poder Público e a população. Relacionado à escassez hídrica ou às chuvas intensas, o gerenciamento de recursos hídricos deverá buscar garantir as condições mais favoráveis para o desenvolvimento regional, como também prevenir que catástrofes ocorram e venham a ocasionar danos irreparáveis. Onde não se busca incorporar a engenharia de recursos hídricos à realização das atividades antrópicas, infelizmente, a natureza demonstra sua imponência trazendo perdas e sofrimento.

2.2. Chuvas intensas e um panorama dos prejuízos associados às enchentes

Sobre o aspecto climatológico, um dos temas mais abordados por gestores governamentais e pesquisadores de diversas partes do mundo é o aquecimento global. Embora este seja um tema que traz polêmicas e divergências na comunidade científica, o conceito de mudanças climáticas vem sendo consolidado por diversos autores de várias partes do mundo, segundo trabalhos publicados por Kawahata et al. (2016) [8]; Lin et al. (2017) [9]; Zhang, Zhang & Chen (2017) [10], respectivamente relacionados a estudos no Japão, Canadá e China.

Segundo Marengo (2009) [11], sobre os efeitos das mudanças climáticas é esperado que alterem os valores de precipitação e a variabilidade dos eventos, o que pode levar a enchentes e secas ainda mais intensas e frequentes. Estudo realizado por Jha, Block & Lamond, (2012) [12], financiado pelo Banco Mundial demonstra que nas últimas seis décadas, entre 1950 e 2010, os registros de inundações vem aumentando gradativamente e no período de 1990 a 2010 esse crescimento se tornou mais acentuado, conforme Figura 1.

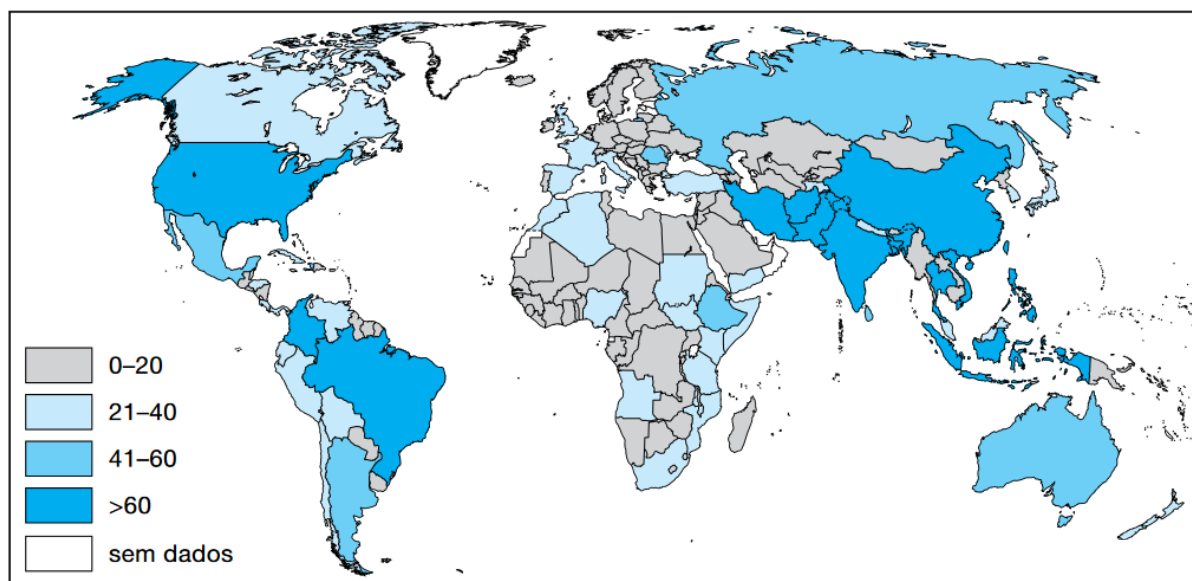
Figura 1 – Registros globais de inundações entre de 1950 a 2010.



Fonte: Jha, Block & Lamond, (2012) [12]

Ainda observando os dados de Jha, Block & Lamond, (2012) [12], na Figura 2, verifica-se que no contexto mundial, o Brasil está entre os países do mundo com maior número de registro de inundações. Nas Américas, Brasil, Colômbia e Estados Unidos são os únicos países a registrarem mais de 60 grandes eventos no período de 1970 a 2011.

Figura 2 – Registros globais de eventos de inundação entre 1970 e 2011.

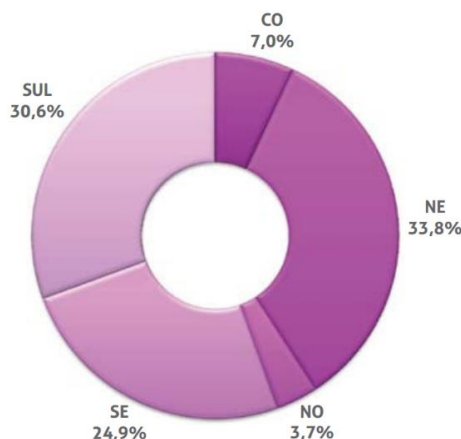


Fonte: EM-DAT, (2011) – Université Catholique de Louvain apud Jha, Block & Lamond, (2012) [12].

Segundo estudo realizado pelo Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres – CEPED da Universidade Federal de Santa Catarina (CEPED, 2016) [13], no Brasil foram identificados 22.810 registros de inundação e alagamentos entre 1995 e 2014. Tal análise estimou que nesse período a soma de danos e prejuízos é da ordem de R\$ 182 bilhões.

Na Figura 3 pode ser visto que no Brasil, as regiões Nordeste, Sul e Sudeste são as mais afetadas por inundações, visto que, respectivamente, 33,8%, 30,6% e 24,9% dos prejuízos no país ocorrem nessas regiões. Segundo o CEPED (2016) [13], na região Nordeste foram analisados 8.760 registros de inundação entre 1995 a 2014 sendo os prejuízos estimados na ordem de R\$ 62 bilhões. Desse montante, conforme apresentado na Tabela 1, cerca de R\$ 3,4 bilhões foi estimado como sendo o prejuízo do Estado de Pernambuco decorrido das enchentes de junho de 2010 (BANCO MUNDIAL, 2012) [14].

Figura 3 – Distribuição de danos e prejuízos com inundações nas regiões brasileiras no período de 1995 a 2014.



Fonte: CEPED, (2016) [13]

Tabela 1 – Sumário de perdas e danos no Estado de Pernambuco em decorrência das enchentes ocorridas em junho de 2010.

Impacto (milhões de R\$ em 2011)			Propriedade		
Setor	Danos	Perdas	Setor Público	Setor Privado	Total
Infraestrutura	398,2	45,6	434,9	8,9	887,6
Transporte	362,7	31,4	394,1	0,0	394,1
Telecomunicações	0,8	0,0	0,0	0,8	0,8
Água e Saneamento	28,0	8,2	28,0	8,1	36,2
Energia	6,7	6,0	12,7	0,0	12,7
Setores Sociais	1.196,3	1.239,9	1.514,5	921,7	2.436,2
Habitação	916,0	1.087,5	1.086,1	917,5	2.003,6
Saúde	91,6	54,4	143,3	2,7	146,0
Educação e Cultura	188,6	97,9	285,0	1,5	286,6
Setores Produtivos	350,8	74,1	0,0	424,8	424,8
Agricultura	63,3	0,1	0,0	63,4	63,4
Indústria	35,4	0,0	0,0	35,4	35,4
Comércio e Serviços	252,1	74,0	0,0	326,0	326,0
Meio Ambiente	66,3	0,0	66,3	0,0	66,3
Total	2.011,6	1.359,5	2.015,7	1.355,4	3.370,9

Fonte: adaptado de Banco Mundial, (2012) [14]

Nesse contexto, os dados apresentados evidenciam a importância das questões associadas a ocorrência de enchentes na região Nordeste. Embora na maior parte do tempo a escassez hídrica esteja presente e merecedora de grande atenção gerencial, talvez até ofuscando a relevância do tema relacionado às enchentes, alerta-se que Pernambuco é um dos estados mais susceptíveis à ocorrência desse tipo de fenômeno, deixando clara a necessidade de investimentos que venha a mitigar os enormes prejuízos.

2.3. Aspectos climatológicos para formação das chuvas

Segundo Schmidt (2014) [15], costuma-se descrever o clima de uma região por meio de médias aritméticas de temperatura, pluviosidade, umidade relativa e relevo, entre outros aspectos. Entretanto, é também importante conhecer a dinâmica atmosférica dessa região, sendo o estudo desta dinâmica bastante complexo e influenciado globalmente por mecanismos controladores de tempo e clima em escalas temporais e espaciais.

Segundo Santos (2013) [16], no que se refere aos sistemas atmosféricos influenciadores do clima em Pernambuco, em nível global, ressalta-se a influência dos fenômenos El Niño, La Niña e Oscilação Sul (ENOS), no Oceano Pacífico, e o Padrão de Dipolo no Oceano Atlântico. Além destes, outros sistemas secundários atuam na região: as Massas de Ar Tropical Atlântica, Zona de Convergência Intertropical, Frente de Ar Polar Atlântica, Zona de Convergência do Atlântico Sul, Vórtices Ciclônicos de Ar Superior, Ondas de Leste, Linhas de Instabilidade e as Brisas (Marinhas e Terrestres).

O fenômeno do El Niño é caracterizado por um aumento, considerado anormal, de 1°C até 6°C da temperatura das águas superficiais na porção central e Leste do oceano Pacífico, especificamente próximo da América do Sul perto da costa do Peru (MENDONÇA & DANNI-OLIVEIRA, 2007) [17].

O El Niño é um evento climático influenciado pelas características oceânicas numa relação direta oceano-atmosfera, podendo também ser denominado de ENOS quando ocorre somatório dos fenômenos El Niño e Oscilação Sul. A Oscilação Sul seria a alteração anômala da pressão atmosférica dos trópicos integrada com as transformações na circulação geral da atmosfera, sendo esta uma consequência aérea do El Niño (SOUZA, 1997) [18].

O ENOS tem dois momentos distintos: um através do El Niño, onde se processam anomalias positivas da temperatura superficial do oceano e outro conhecido como La Niña, caracterizada pelo oposto, com anomalias negativas de temperatura da

superfície do mar sobre a mesma porção do oceano. Logo, o El Niño deixa a temperatura das águas mais quentes no Pacífico, causando secas no Nordeste do Brasil e La Niña resfria as águas daquele oceano, originando tendência de inverter a distribuição das chuvas quando comparada com El Niño (SOUZA, 1997) [18]; (MOURA et al., 2009) [19]. Essas tendências, porém, não são bem determinísticas, sendo afetadas pelos outros fenômenos atmosféricos que muitas vezes predominam.

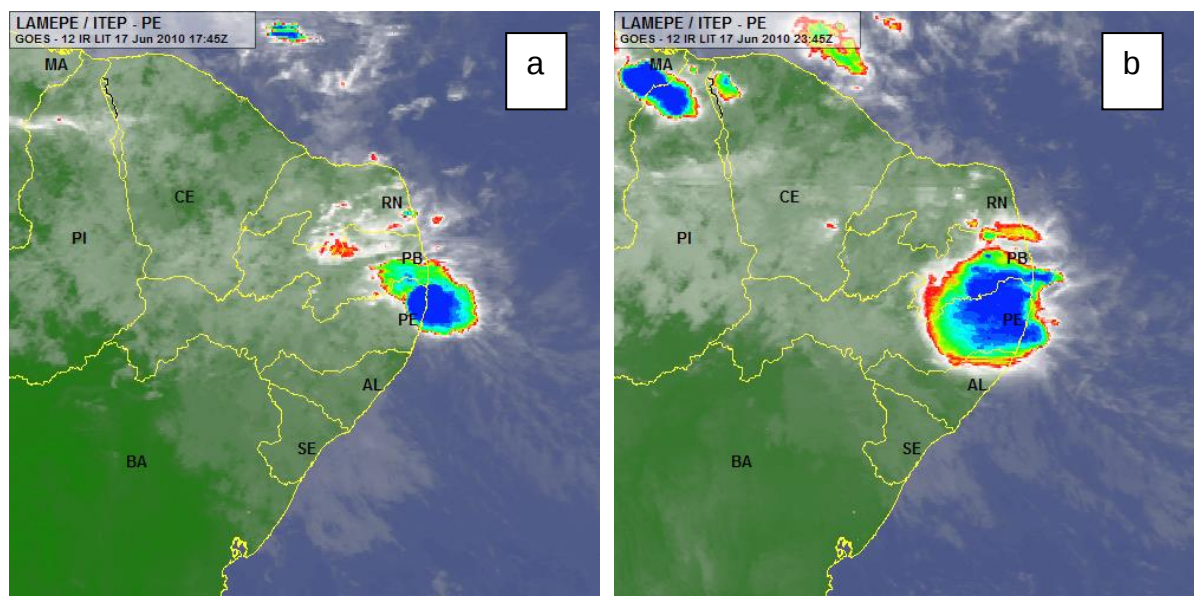
O outro fenômeno modelador da precipitação na área da restinga e no Nordeste do Brasil com um todo seria o Dipolo do Atlântico, que é uma modificação anormal na temperatura da água do oceano atlântico na faixa tropical (ARAGÃO, 1998) [20].

Entre os sistemas climáticos secundários, será dada ênfase às Ondas de Leste, por estarem associadas às maiores inundações já registradas na bacia do rio Una. Segundo Almeida 2013 [21] as Ondas de Leste são um típico sistema meteorológico do Nordeste do Brasil, e são definidas como agrupamentos de nuvens que se movem no Atlântico, de leste para oeste, até atingirem a costa oriental da região Nordeste, provocando precipitação ao longo do litoral, de 5° a 13°S (leste do Rio Grande do Norte até o Nordeste da Bahia), durante o período de maio a agosto. Esses sistemas influenciam principalmente as áreas costeiras, não avançando muito para o interior da região.

Segundo LAMEPE (2010) [22], ao analisar os dados sobre o evento meteorológico ocorrido em junho de 2010, verificou-se que se tratava de uma Onda de Leste (FIGURA 4) intensificada por um sistema frontal localizado sobre o Atlântico Sul, o qual fortaleceu esse sistema meteorológico. Além disso, as temperaturas elevadas da água do mar (FIGURA 5), adjacente à costa de Pernambuco, contribuíram ainda mais para instabilizar a atmosfera.

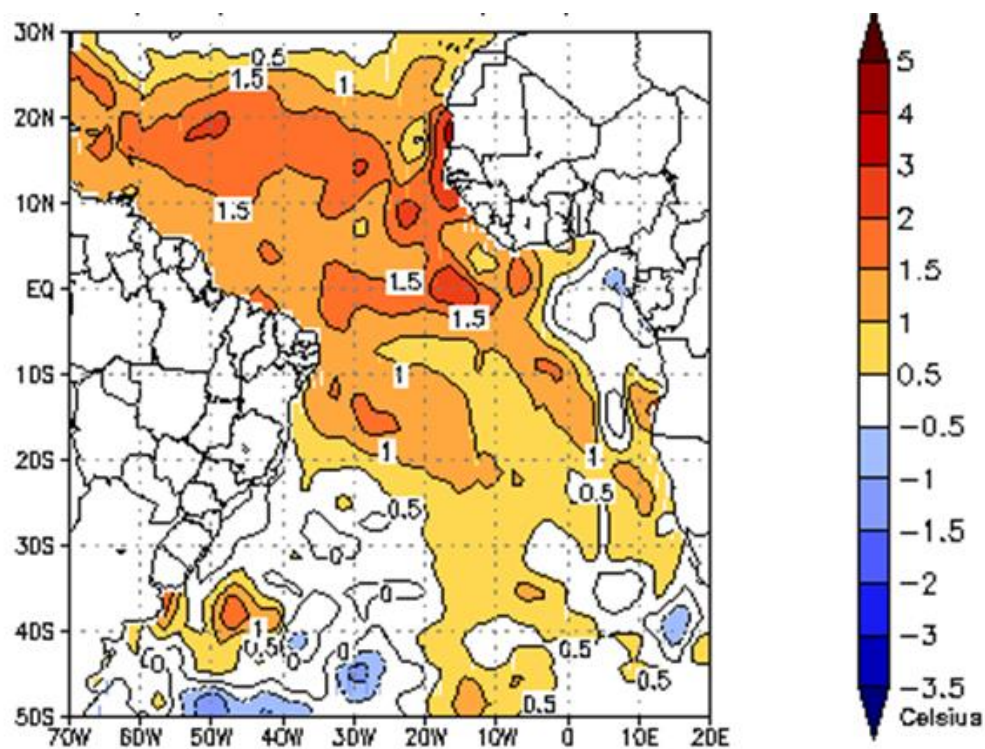
Ainda considerando as Figuras 4 e 5, através dos períodos apresentados, destaca-se que a formação das nuvens provenientes das Ondas de Leste ocorre de forma rápida, com intensificação em poucas horas. Uma vez que a presença do fenômeno La Niña é caracterizada, favorecendo a ocorrência de chuvas intensas, deve-se garantir que o monitoramento meteorológico seja contínuo e os dispositivos de prevenção de cheias estejam em perfeitas condições de operação.

Figura 4- Imagens de Satélite geradas pelo Lamepe do dia 17 de junho de 2010 às 17h 45min (Figura 4a) e 23h 45min (Figura 4b) GMT.



Fonte: LAMEPE, 2010 [22]

Figura 5 – Anomalia de temperatura da superfície do mar entre 09 de junho de 2010 a 16 de junho de 2010.



Fonte: LAMEPE, 2010 [22]

Ciente da dinâmica da variação das condições atmosféricas que podem vir a causar chuvas intensas, a Agência Pernambucana de Águas e Clima – APAC, entidade integrante da administração pública estadual indireta, vinculada no presente à Secretaria de Desenvolvimento Econômico – SDEC, criada através da Lei Estadual Nº 14.028 de 26 de março de 2010 (PERNAMBUCO, 2010) [23], possui em seu quadro técnico, meteorologistas que acompanham imagens de satélite 24h por dia com intuito de acionar a Defesa Civil em caso de alertas.

2.4. Ocorrência de Cheias em Pernambuco

2.4.1. Histórico de cheias em Pernambuco

A variação de vazão nos rios é um fenômeno comum, que ocorre em função da variação das chuvas ao longo do ano. O aumento do nível da água ao longo da calha do rio e possíveis transbordamentos também devem ser considerados um fenômeno natural. No entanto, segundo Tucci (2003) [24] as inundações ocorrem quando as águas dos rios, riachos, galerias pluviais saem do leito de escoamento devido à falta de capacidade de transporte de um destes sistemas e ocupam áreas onde a população utiliza para moradia, transporte (ruas, rodovias e passeios), recreação, comércio, indústria, entre outros em áreas urbanizadas.

Informações sobre o histórico de inundações são, em muitos casos, difíceis de serem obtidas, muitas vezes por falta de ferramentas tecnológicas para realização dos registros ou pelas condições adversas de se fazê-los imediatamente após os eventos catastróficos. Em Pernambuco, instituições como a Secretaria Executiva de Recursos Hídricos – SERH, a Agência Pernambucana de Águas e Clima – APAC, a Agência Estadual de Planejamento e Pesquisas – CONDEPE-FIDEM, a Coordenadoria de Defesa Civil – CODECIPE, o Corpo de Bombeiros Militares de Pernambuco – CBMPE, são algumas das instituições que possuem registros históricos de inundações no Estado.

Lista-se a seguir os principais eventos de inundações registrados no Estado de Pernambuco no período de 1632 a 2016, segundo Formato 8 Produções Editoriais (2016) [25].

- **28 de janeiro de 1632** - ocorreu a primeira enchente de que se tem notícia no Recife, causando perdas de muitas casas estabelecidas às margens do rio Capibaribe.
- **1638** - Maurício de Nassau manda construir a primeira barragem no leito do rio Capibaribe para proteger o Recife das enchentes. Foi chamada de dique de Afogados, com mais de 2 km, no local onde hoje se situa a rua Imperial.
- **1824** - Têm-se registros de enchente atingindo Recife entre fevereiro e abril, mas sem muitas informações.
- **Junho de 1842** - Nova enchente atinge o Recife, derrubando várias casas. Pontes desabaram; trens saíram dos trilhos; milhares de pessoas ficaram desabrigadas. Foi a primeira enchente de grandes proporções no Rio Capibaribe.
- **1854** - Aconteceu a maior enchente do século XIX com duração de 72 horas, atingindo todos os bairros do Recife. Foi derrubada a muralha que guarnecia a Rua da Aurora e parte do cais da Casa de Detenção. A cidade ficou sem comunicação com o interior e no porto do Recife os navios foram atirados uns contra os outros.
- **1862** - Uma nova enchente castigou o Recife, mas também sem muitos registros.
- **1869** - Grande enchente destruiu as pontes da Torre, Remédios e Barbalho e rompeu os aterros da via férrea do Recife. Foi a maior enchente até então, tendo o imperador Pedro II determinado que o engenheiro Rafael Arcanjo Galvão viesse a Pernambuco estudar o problema.
- **16 de julho de 1870** - O bacharel em matemática e ciências físicas José Tibúrcio Pereira de Magalhães, diretor de obras e fiscalização do serviço público do Estado, sugeriu ao governo imperial a construção de uma série de barragens nos principais afluentes do rio Capibaribe, para evitar cheias no Recife.
- **1884** - Outra enchente atingiu o Recife, sem muitas consequências.

- **Junho de 1894** - Uma enchente atingiu todos os subúrbios recifenses situados às margens do rio Capibaribe.
- **01 de julho de 1899** - Vários bairros do Recife foram inundados pela cheia do rio Capibaribe. No município de Vitória de Santo Antão desabou o segundo encontro da ponte sobre o rio Itapicuru.
- **1914** - Outra enchente desabou sobre o Recife, deixando vários mortos.
- **14 de abril de 1920** - Grande enchente deixou Recife isolada do resto do Estado durante três dias. Postes foram derrubados; linhas telegráficas foram interrompidas; trens paralisados; pontes vieram abaixo, entre elas a da Torre. Os bairros da Caxangá, Cordeiro, Várzea e Iputinga ficaram totalmente isolados do resto da cidade.
- **1924** - nova enchente deixou os bairros da Ilha do Leite, Santo Amaro, Afogados, Dois Irmãos, Apipucos, Torre, Zumbi e Cordeiro completamente submersos. O prédio do serviço de saúde e assistência desabou e as obras do quartel do Derby sofreram grandes prejuízos.
- **1960** - nova enchente do rio Capibaribe castigou o Recife. No ano seguinte, nova ocorrência na região deixou duas mil pessoas desabrigadas.
- **1965** - os bairros da Caxangá, Iputinga, Zumbi e Bongi ficaram completamente inundados. Nas áreas mais próximas ao rio Capibaribe a água cobriu o telhado das casas.
- **1966** - Enchente catastrófica provocada pelo Rio Capibaribe, com a água atingindo mais de 2 metros de altura nas áreas mais baixas do Recife. Em poucas horas, toda a extensão da Av. Caxangá foi transformada num grande rio. Na capital e interior, mais de 10 mil casas (a maioria mocambos) foram destruídas e outras 30 mil sofreram danos, como paredes derrubadas. Morreram 175 pessoas e mais de 10 mil ficaram desabrigadas. O nível do Rio Capibaribe subiu 9,20 metros além do nível normal. O presidente da República, marechal Humberto de Alencar Castelo Branco, veio ao Recife verificar os danos causados.
- **1967** - A Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste – SUDENE apresenta relatório de uma comissão de técnicos, constituída logo após a enchente de 1966, para encontrar soluções para o problema. O relatório sugere a construção de barragens nos seus principais afluentes e no próprio Rio

Capibaribe, que é a mesma sugestão apresentada quase um século antes pelo engenheiro José Tibúrcio.

- **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 04 dos seus 05 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.
- **Agosto de 1970** - 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.
- **1973** - Material de propaganda da Secretaria de Obras do governo do Estado anuncia, em letras garrafais, que a Barragem de Tapacurá, inaugurada naquele ano, era solução definitiva para dois graves problemas que afetavam o Recife: abastecimento de água da população e "o fim" das enchentes no Recife.
- **1974** - Outra enchente atinge o Recife. A Comissão de Defesa Civil, que tinha previsão do avanço das águas, retirou a tempo a população das áreas ribeirinhas. Em São Lourenço da Mata, uma ponte ficou parcialmente destruída e a população isolada. No município de Macaparana, 20 pessoas morreram, por conta do transbordamento do riacho Tiúma.
- **1975 (o maior evento)** - Essa enchente ocorreu entre os dias 17 e 18 de julho, deixando 80% da cidade do Recife sob as águas. Outros 25 municípios da bacia do Capibaribe também foram atingidos. Morreram 107 pessoas e outras 350 mil ficaram desabrigadas. Na capital e no interior, 1.000 km de ferrovias foram destruídos, pontes desabaram, casas foram arrastadas pelas águas. Só no Recife, 31 bairros, 370 ruas e praças ficaram submersos; 40% dos postos de gasolina da cidade foram inundados; o sistema de energia elétrica foi cortado em 70% da área do município; quase todos os hospitais recifenses ficaram inundados, tendo o depósito de alimentos do Hospital Pedro II sido saqueado. Por terra, o Recife ficou isolado do resto do País durante dois dias. O governador Moura Cavalcanti decretou estado de calamidade pública na

capital e em 09 municípios do interior. O presidente da República, em cadeia nacional de televisão, anunciou medidas para socorrer as cidades pernambucanas atingidas. No Recife, a cheia atingiu seu ponto culminante às 04 da madrugada do dia 18.

- **1975 (o boato)** - Na manhã do dia 21, quando as águas baixaram e a população começava a retomar a vida, o pânico tomou conta das ruas do Recife, em decorrência de um boato de que a Barragem de Tapacurá havia estourado e que a cidade seria arrasada. Tudo ocorreu às 10 horas: de repente, a multidão corria de um lado para outro sem saber aonde ir; mulheres desmaiavam; os carros não respeitavam sinais nem contramão; guardas de trânsito abandonavam seus postos; várias pessoas foram atropeladas; bancos, casas comerciais e a agência central dos Correios fecharam as portas; no Hospital Barão de Lucena várias pessoas pularam do primeiro andar, enquanto o boato se espalhava de boca em boca.
- **1975 (o controle da situação)** - No Palácio do Governo, ao saber do que estava acontecendo, o governador Moura Cavalcanti comentou: "Agora não é mais tragédia, agora é mortandade". As emissoras de rádio passaram imediatamente a divulgar insistentes desmentidos. A Polícia Militar divulgou nota oficial informando que prenderia quem fosse flagrado repetindo o alarme. A Polícia Federal anunciou que estava investigando a origem (nunca descoberta) do boato. O pânico durou cerca de duas horas, mas seu momento de maior intensidade teve cerca de 30 minutos. Mais de 100 pessoas foram atendidas nos serviços de emergência dos hospitais. Passado o pânico, técnicos da Companhia de Abastecimento de Água informaram que um rompimento da Barragem de Tapacurá (que tem capacidade para 94 milhões de metros cúbicos de água e nada sofrera com a enchente) traria consequências imprevisíveis para a cidade do Recife.
- **1º de maio de 1977** - Nova enchente do Rio Capibaribe deixa 16 bairros do Recife embaixo d'água. Olinda e outras 15 cidades do interior do Estado também foram atingidas. Mais de 15 mil pessoas ficaram desabrigadas e só não foram registradas mortes porque a população das áreas ribeirinhas foi retirada 24 horas antes. São Lourenço da Mata foi o município mais atingido. Em Limoeiro, houve desabamento de ponte.

- **29 de maio de 1978** - O presidente da República, Ernesto Geisel, vem ao Recife inaugurar a Barragem de Carpina, construída para conter as enchentes do Rio Capibaribe. Com 950 metros de comprimento, 42 metros de altura, a barragem tem capacidade para armazenar 295 milhões de m³ de água e fica a maior parte do ano seca, só enchendo no período chuvoso.
- **2000** - Entre os dias 30 de julho e 01 de agosto, fortes chuvas castigaram o Estado, inclusive a Região Metropolitana do Recife, deixando um total de 22 mortos, 100 feridos e mais de 60 mil pessoas desabrigadas. Cidades foram parcialmente destruídas, tendo às águas que transbordaram dos rios levado pontes e casas. As chuvas foram anunciadas com 40 dias de antecedência pelos serviços de meteorologia, mas as autoridades governamentais deram pouca importância à previsão. As chuvas atingiram 300 milímetros em apenas três dias e só na RMR aconteceram 102 deslizamentos de barreiras. 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. O presidente da República, Fernando Henrique Cardoso, veio a Pernambuco observar de perto os efeitos da calamidade e, dias depois, autorizou a liberação de apenas 30% dos R\$ 129 milhões que, segundo levantamento do governo do Estado, seriam os recursos emergenciais necessários para recuperação das áreas atingidas.
- **2004** - Fortes chuvas entre 08 de janeiro 02 de fevereiro de 2004 castigam todas as regiões do Estado, deixando 36 mortos e cerca de 20 mil pessoas desabrigadas. As chuvas (jamais 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 vários dias isolada, depois que as águas levaram a estrada de acesso à cidade. Todos os açudes e barragens do Sertão e Agreste transbordaram, inclusive a Barragem de Jucazinho, em Surubim. De acordo

com levantamento do governo estadual, os prejuízos em todo o Estado chegaram a R\$ 54 milhões.

- **2005** - Entre os dias 30 de maio e 02 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 sete mil casas foram parciais 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. Pouco mais de 30 mil estudantes da rede estadual de ensino ficaram vários dias sem aulas, porque em todas as cidades atingidas 93 escolas foram danificadas e outras 11 foram transformadas em abrigos para os desabrigados. As cidades mais atingidas foram Moreno, Vitória de Santo Antão, Jaboatão, Nazaré da Mata, Pombos, Ribeirão, Cabo e Escada. O município que teve o maior número de casas destruídas ou parcialmente danificadas foi Vitória: cinco mil casas.
- **2010** - Neste ano ocorreu a maior evento hidrológico já registrado sobre a bacia do rio Una, sendo descrito em detalhes no item 2.4.2.
- **2011** – Em menos de um ano após à tragédia ocorrida em 2010, municípios da Zona da Mata e Região Metropolitana do Recife novamente foram atingidos por inundações. Segundo a Defesa Civil, 55 cidades foram atingidas pelas chuvas em Pernambuco, 26 decretaram situação de emergência e nove em calamidade pública. Em Barreiros, 20% da população ficou isolada do restante da cidade por três dias, até uma ponte ser improvisada com tronco de coqueiro. O fornecimento de água foi interrompido, não havia acesso para carros-pipa e nesse período a população utilizou água de poço para beber.

Fonte: Formato 8 Produções Editoriais, (2011) [25]; O Globo, (2011) [26]

A partir de 2012 até à presente data, não foram registrados eventos de chuvas intensas que viessem a causar inundações sobre o aspecto de bacias hidrográficas, onde teve início anos de secas severas que ainda preocupam o Poder Público e a sociedade. Ainda assim, chuvas intensas ocorreram na RMR, vindo a causar graves deslizamentos de terra na região de morros, chegando a causar óbitos e deixar diversas famílias desabrigadas.

2.4.2. O evento de cheia de 2010

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 dos rios Una e Mundaú, esta última com reflexos catastróficos no Estado de Alagoas. A bacia hidrográfica do rio Una, cuja área de drenagem abrange as três regiões geográficas 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) [27].

Em Pernambuco, na madrugada do dia 17 para o dia 18 de junho, choveu na região afetada o equivalente a 180 mm, o que representa aproximadamente 70% do esperado para os 30 dias do mês de junho. Entre os dias 17, 18 e 19 de junho, a enchente atingiu 67 cidades em Pernambuco e 19 cidades do Estado de Alagoas. O número de indivíduos afetados chegou a 284.632, sendo 181.018 no estado de Alagoas e 103.612 de Pernambuco. O número de desalojados chegou a 55.643 em Pernambuco e 47.897 em Alagoas, totalizando 102.420 indivíduos. Os óbitos somaram 79 (34 em Alagoas e 20 em Pernambuco) (CIRILO et al., 2011a [28]; BANCO MUNDIAL, 2012a [14]; 2012b [29]).

Ainda nas localidades afetadas em Pernambuco, contabilizou-se 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 (CIRILO et al., 2011a [28]).

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) (CIRILO et al., 2011a [28]).

A destruição ocorrida nas cidades pernambucanas é ilustrada nas Figuras 6, 7 e 8.

Figura 6 – Bairros completamente inundados no município de Palmares em 19/06/2010.



Foto: Roberto Pereira/SEI Fonte: Yahoo! Inc (2010) [29]

Figura 7 – Viaduto Profa. Lúcia Paiva, destruído pela inundação do rio Una, no município de Palmares. (7a) no dia 19/06/2010; (7b) no dia 23/06/2010.



(a) Foto: Roberto Pereira/SEI.
Fonte: Yahoo! Inc (2010) [29]

(b) Foto Antônio Cruz/Agência Brasil.
Fonte: EBC (2010) [30]

Figura 8 – Destroços no cenário de destruição no município de Barreiros logo após as enchentes de 2010.



Foto Antônio Cruz/Agência Brasil. Fonte: EBC (2010) [30]

Infelizmente os estragos causados ainda refletem a vida da população dos municípios afetados. Apesar das diversas ações para mitigar os efeitos das enchentes de 2010 e 2011, a população destas cidades ainda sofre com as consequências destes eventos e ainda podem estar vulneráveis a novos incidentes.

2.5. Ações para mitigação dos efeitos de enchentes em Pernambuco

Após as enchentes de 2010 e 2011, o então Governador do Estado, Eduardo Campos, deu início a um conjunto de ações para mitigação dos efeitos das cheias. Entre as ações planejadas destacam-se investimentos para reconstrução da infraestrutura urbana, sistemas de previsão de eventos críticos de catástrofes naturais, ampliação de calha dos rios e construção de barragens para controle de cheias.

2.5.1. Investimentos para reconstrução da infraestrutura urbana

Logo após às enchentes da Mata Sul, algumas ações de reconstrução ocorreram de forma emergencial, com um horizonte de conclusão de curto e médio prazo, como reestabelecimento de energia elétrica e abastecimento de água, recuperação de acessos e pontes, além da reconstrução de moradias, hospitais e escolas.

Entre as ações de reconstrução, o município de Palmares recebeu a orla fluvial “Poetas dos Palmares” (FIGURA 9a) e duas novas pontes construídas em substituição às que foram arrastadas pela força das águas: a do Engenho Limeira (FIGURA 9b) e a do Riacho Guaraná. As três obras foram construídas pelo governo do Estado, por meio da Coordenadoria de Engenharia e Arquitetura da Casa Militar. Na orla foram investidos R\$ 2.378.730,18, sendo que as pontes Limeira e Guaraná foram orçadas, respectivamente em R\$ 1.729.804,60 e R\$ 1.668.528,75 (PERNAMBUCO, 2014) [31].

Figura 9 – Ações para reconstrução de infraestrutura urbana em Palmares.

(9a) Orla fluvial Poetas dos Palmares.



(a) Foto: Paula Cavalcanti
Fonte: G1, (2015) [32]

(9b) Ponte Engenheiro Limeira reconstruída.



(b) Foto: ASCOM/CAMIL
Fonte: PERNAMBUCO, (2014) [33]

5.171 unidades habitacionais foram entregues nos municípios de Palmares, Catende e Água Preta, já havendo sido investido pelo Governo do Estado R\$ 16,4 milhões. A rede escolar também foi bastante atingida, com 533 escolas ficaram prejudicadas, gerando um prejuízo calculado em R\$ 127 milhões. Foi planejada a reconstrução de 242 escolas da rede municipal e outras 67 da rede estadual, R\$ 70 milhões foram destinados à reconstrução de escolas da Mata Sul apenas em 2015 (G1, 2015 [32]; PERNAMBUCO, 2011a [34]).

Em agosto de 2010, a Secretaria Estadual de Saúde (SES) deu início às obras de reconstrução do Hospital Regional Silvio Magalhães, com um investimento de R\$ 65 milhões, a obra foi concluída em dezembro de 2011 (PERNAMBUCO, 2011b) [35].

2.5.2. Previsão de Eventos Críticos e Prevenção de Catástrofes Naturais - Sala de Situação

Devido à frequência de sucessivos eventos críticos e à necessidade de acompanhá-los sistematicamente em tempo real, fornecendo respostas com maior agilidade e precisão, surgiu a necessidade da criação da Sala de Situação. Ambiente localizado nas instalações da APAC, a Sala de Situação é resultado de uma parceria realizada por meio de um acordo de cooperação técnica com a Agência Nacional de Águas – ANA, cujo objetivo é acompanhar as tendências hidrológicas e meteorológicas, análise da evolução das chuvas, dos níveis e das vazões dos rios e reservatórios e da previsão de eventos extremos, gerando resultados para a adoção de medidas de prevenção adequadas (PERNAMBUCO, 2013) [36].

A Sala de Situação funciona como centro de gestão de situações críticas e subsidia a tomada de decisões, por meio do acompanhamento das condições climáticas e da situação dos principais sistemas hídricos do Estado, de modo a identificar possíveis ocorrências de eventos críticos, minimizando os efeitos de secas e de inundações. A Sala de Situação fornece informações confiáveis em tempo hábil para a tomada de decisões aos órgãos competentes em situações de crise, permitindo a adoção antecipada de medidas mitigadoras (PERNAMBUCO, 2013) [36].

Para previsão e controle de inundações na Mata Sul foi desenvolvido, em parceria com a UFPE, um modelo que gera cenários possíveis de inundação em Palmares, Água Preta e Barreiros para diferentes ocorrências esperadas de precipitação intensa na bacia do rio Una. A parceria entre Governo do Estado e universidade foi de grande importância para o aperfeiçoamento das linhas de pesquisas nas áreas de simulação hidrológica e hidrodinâmica desenvolvidas na UFPE, vindo a subsidiar informações para os trabalhos de Cirilo et al. (2011a) [28], (2011b) [37]; Ribeiro Neto, Cirilo e Dantas (2011) [38]; Dantas, (2012) [39]; Almeida (2013) [21]; Silva (2015) [40].

2.5.3. Readequação e ampliação da calha do rio Una e desapropriações de áreas de risco

A Secretaria de Recursos Hídricos e Energéticos – SRHE realizou os serviços de ampliação da calha do rio Una, nos trechos que banham a zona urbana do município de Palmares. A ação na calha foi necessária para retificação das margens do rio e ampliação da sua capacidade de escoamento das águas, de modo a contribuir com as ações de contenção de cheias na região, como as ocorridas em 2010 e 2011. Os serviços receberam investimentos da ordem de R\$ 12 milhões e deverão ser complementados por ações no perímetro urbano de Água Preta e Barreiros. Trecho destruído pela cheia, onde existiam antigos estabelecimentos comerciais, foi dragado e reurbanizado em dezembro de 2013 (PERNAMBUCO, 2013) [36].

Além dos serviços de readequação da calha do rio, foram realizadas desapropriações de edificações construídas em áreas de risco e de preservação permanente para programa de reordenamento da ocupação das margens. As Figuras 10 e 11, respectivamente, ilustram a realização dos serviços de ampliação e readequação da calha do rio Una e a localização das áreas desapropriadas.

Figura 10 – Execução de serviços de readequação e ampliação da calha do rio Una.

(10a) Máquinas em operação na realização de serviços de dragagem do rio Una.

(10b) Trecho de obra de readequação da calha do rio concluído.

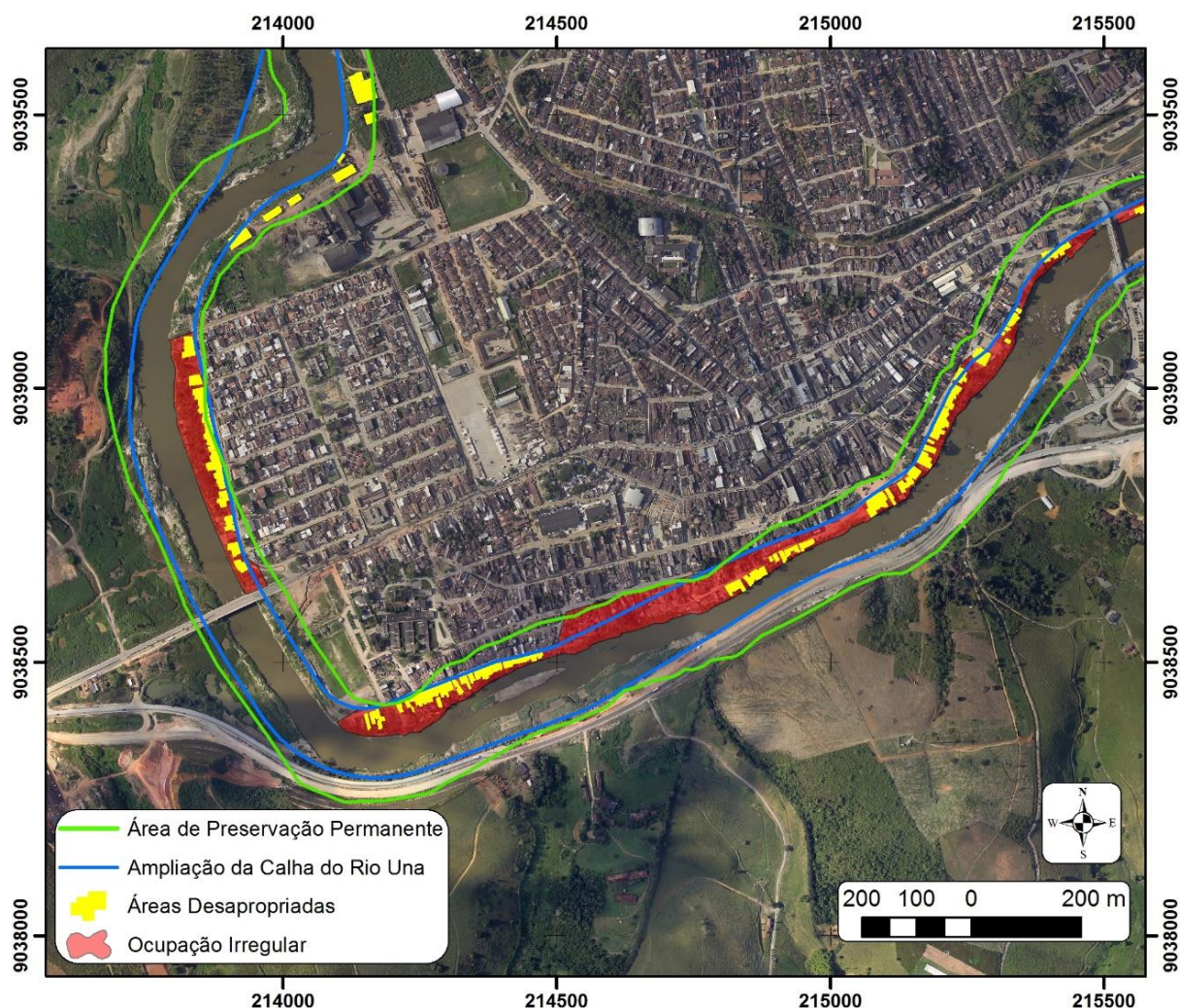


Fonte: Pernambuco, 2013 [36]



Fonte: Pernambuco, 2013 [36]

Figura 11 – Identificação de áreas de ocupação irregular e desapropriações realizadas em edificações às margens do rio Una, em Palmares.

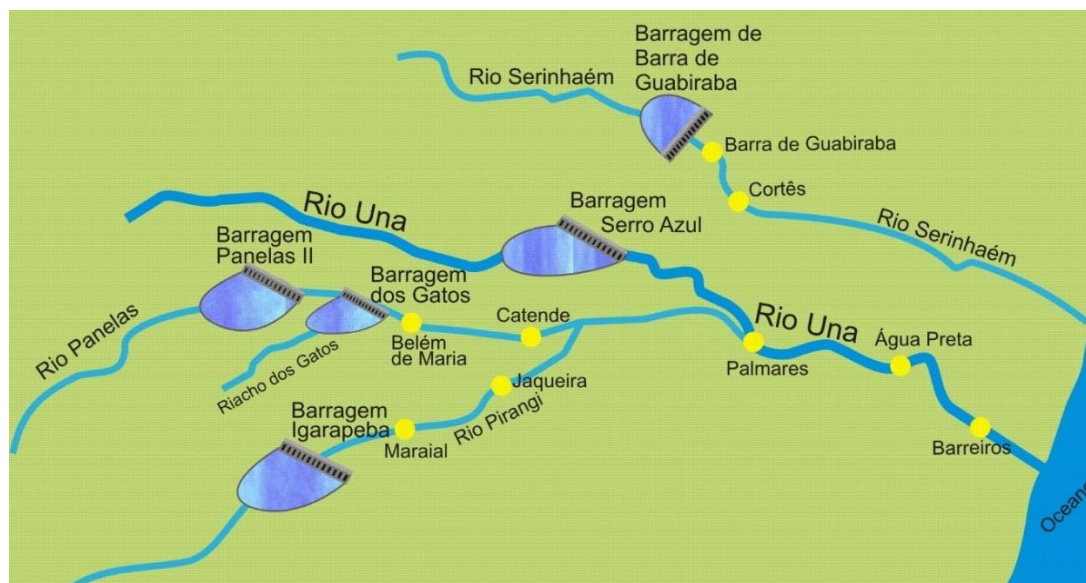


Fonte: Cirilo et al. (2014) [41]

2.5.4. Construção de barragens para controle de cheias

O Sistema Integrado de CONTENÇÃO de Cheias na Mata Sul se propõe a controlar as enchentes em áreas das bacias hidrográficas dos rios Una e Sirinhaém. Conforme ilustrado na Figura 12, cinco barragens vão proteger das enchentes uma área da bacia hidrográfica do Una de 2.060 km² (30,58% da área total), onde estão inseridas 10 sedes municipais (Belém de Maria, Catende, Cupira, Jaqueira, Lagoa dos Gatos, Maraial, Palmares, São Benedito do Sul, Água Preta e Barreiros) (PERNAMBUCO, 2011) [42].

Figura 12 – Representação das barragens de controle de cheias na bacia dos rios Una e Sirinhaém.



Fonte: Pernambuco, (2011) [42].

O investimento previsto para a construção das cinco barragens é da ordem de R\$ 750 milhões. Informações do município, capacidade de armazenamento e investimento total estimado para cada barragem de controle de cheias, a partir de estimativas realizadas pela Secretaria Executiva de Recursos Hídricos em 2016 são apresentadas na Tabela 2 (PERNAMBUCO, 2016) [43].

Tabela 2 – Barragens em construção para contenção de enchentes nas bacias do rio Una e Sirinhaém.

Barragem	Município	Capacidade (m³)	Investimento Estimado (R\$)
Barra de Guabiraba	Barra de Guabiraba	16.000.000	82.000.000,00
Gatos	Lagoa dos Gatos	6.300.000	60.000.000,00
Igarapeba	São Benedito do Sul	42.500.000	159.000.000,00
Panelas	Cupira	17.000.000	85.000.000,00
Serro Azul	Palmares	303.000.000	365.000.000,00

Fonte: Adaptado de Pernambuco, (2016) [43].

Além da finalidade principal de controle de cheias, as barragens promovem múltiplos usos para benefício da população que vive nas proximidades dos reservatórios. Serro Azul, a principal barragem para controle de cheias será de fundamental importância para o abastecimento de 10 cidades do Agreste pernambucano, quando a partir de

2018 irá fornecer 500 l/s para atender parte das demandas suprimidas na região. Com os serviços de execução quase concluídos, Serro Azul em dezembro de 2016 estava com 99% das obras realizadas, conforme Figura 13.

Figura 13 – Barragem Serro Azul, em Palmares-PE.



Fonte: SDEC, (2016) [43]

As demais barragens, também de extrema importância, ainda não tem prazo de conclusão previstos.

2.6. Geotecnologias para elaboração de estudos e projetos de recursos hídricos

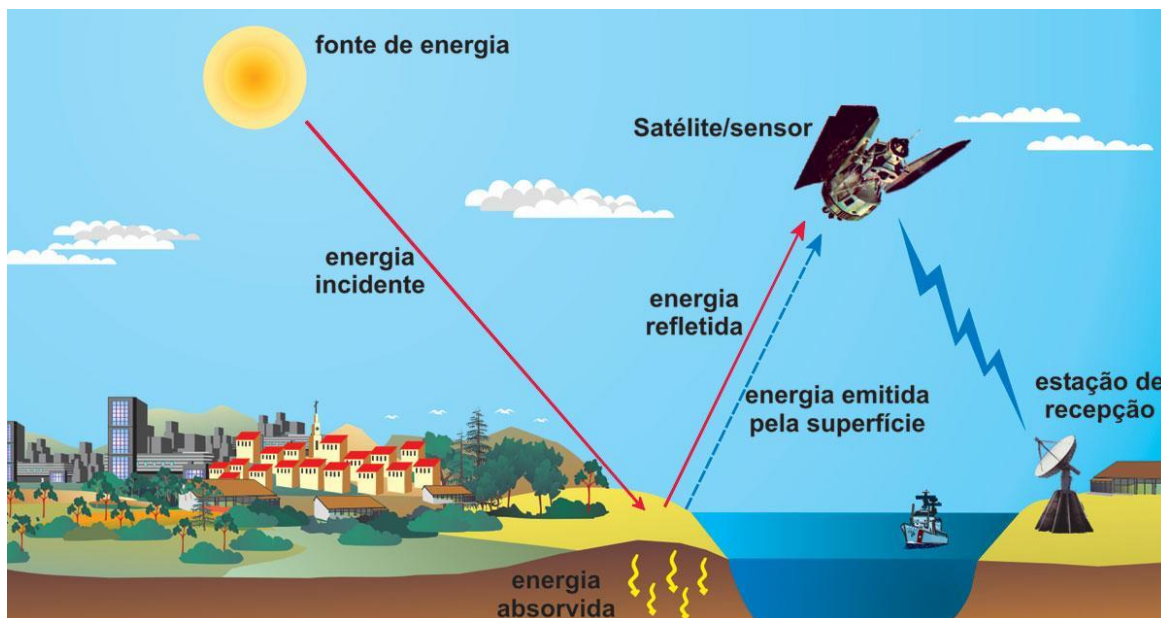
Segundo Barbosa, Oliveira & Alves (2011) [43] o uso de geotecnologias permite uma abordagem integrada de todo o meio físico, associando-o aos aspectos sociais, econômicos e políticos, podendo ser adotado como ferramenta para localizar áreas críticas onde se devem concentrar esforços e visando à eficiência da identificação dos elementos que integram o meio ambiente.

Estudos ambientais, como os relacionados à área de recursos hídricos, encontram grandes desafios para realização de experimentos que visem resultados de alta precisão. Associadas às dificuldades de representar os diversos parâmetros físicos para representação do ambiente, está sempre presente a complexidade de executar as medições em campo para grandes áreas e em muitas vezes de forma simultânea. As técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento são difundidas e amplamente aplicadas na área de recursos hídricos a partir da utilização de satélites espaciais, sensores aerofotogramétricos instalados em aeronaves, radares e técnicas de perfilamento a laser (MENDES & CIRILO, 2001) [44].

2.6.1. Sensoriamento remoto e imagens de satélites

Segundo Florenzano (2011) [45], sensoriamento remoto é a tecnologia que permite obter imagens, e outros tipos de dados, da superfície da Terra por meio da energia refletida ou emitida pela superfície, conforme ilustrado na Figura 14.

Figura 14 – Esquema de obtenção de imagens de satélites.



Fonte: Florenzano, (2011) [45]

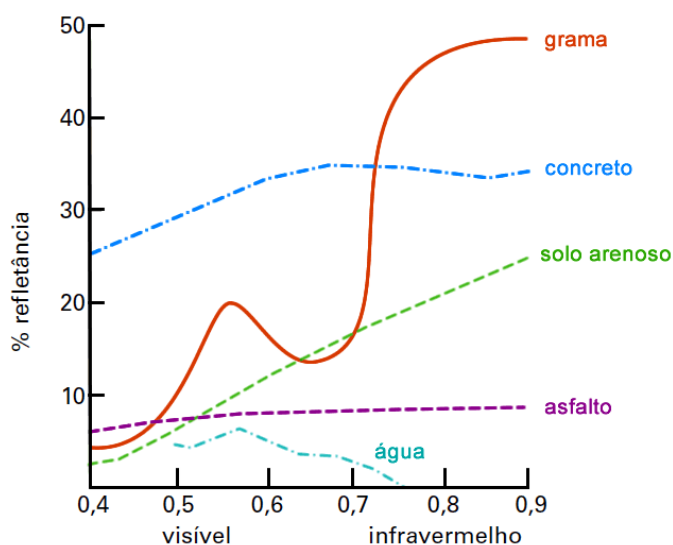
A origem do sensoriamento remoto nos anos de 1960 deve-se ao desenvolvimento da área espacial nesses anos, que ficou conhecida como a década da corrida espacial. Foi nesse período que se viu o mais rápido desenvolvimento de foguetes lançadores

de satélites, que possibilitou colocar no espaço esses equipamentos para várias finalidades, sendo os satélites meteorológicos os pioneiros (MENESES et al, 2012) [46].

Segundo Liu (2015) [47], as aplicações da Ciência de Sensoriamento Remoto via satélite abrangem o monitoramento dinâmico de usos de solo e evoluções de biodiversidade, recursos naturais, precipitação, clima, manejo dos recursos hídricos da superfície, exploração de recursos hídricos no subsolo, inventário e monitoramento das coberturas vegetais e pastagens, monitoramento da produção primária das florestas, monitoramento de eventos catastróficos, tais como geadas, enchentes, secas, doenças e pragas das culturas, monitoramento dos focos de queimadas, mapeamento topográfico, monitoramento da degradação e erosão de solos, estudos e mudanças climáticas, entre outros.

Segundo Novo (2010) [48], os sensores utilizados para imageamento dos alvos registram a energia emitida e refletida de acordo com faixas espectrais de diferentes comprimentos de onda. De modo geral, a refletância dos alvos possui comportamento distinto em função de uma faixa espectral de comprimento de onda específica (FIGURA 15). A definição de padrões de refletância permite a identificação, classificação e monitoramento dos elementos do meio ambiente.

Figura 15– Representação do comportamento espectral de diferentes alvos em função dos comprimentos de onda.



Fonte: D'Arco, (2009) [49].

Entre diversas linhas de pesquisas que utilizam técnicas de sensoriamento remoto, se traz exemplos do cálculo da evapotranspiração em áreas no delta do rio Colorado, no México, utilizando sensoriamento remoto (JARCHOW, 2016) [50] e do desenvolvimento de ferramenta para avaliação dos riscos de inundações a partir de dados de precipitação obtidos através de sensoriamento remoto (WRIGHT, MANTILLA & PETERS-LIDARD, 2017) [51].

2.6.2. Aerofotogrametria e restituição estereoscópica

Além da obtenção de imagens através de satélites espaciais, as ferramentas de geotecnologias, já na década de 60, disponibilizavam fotografias obtidas especialmente para extração de informações do ambiente.

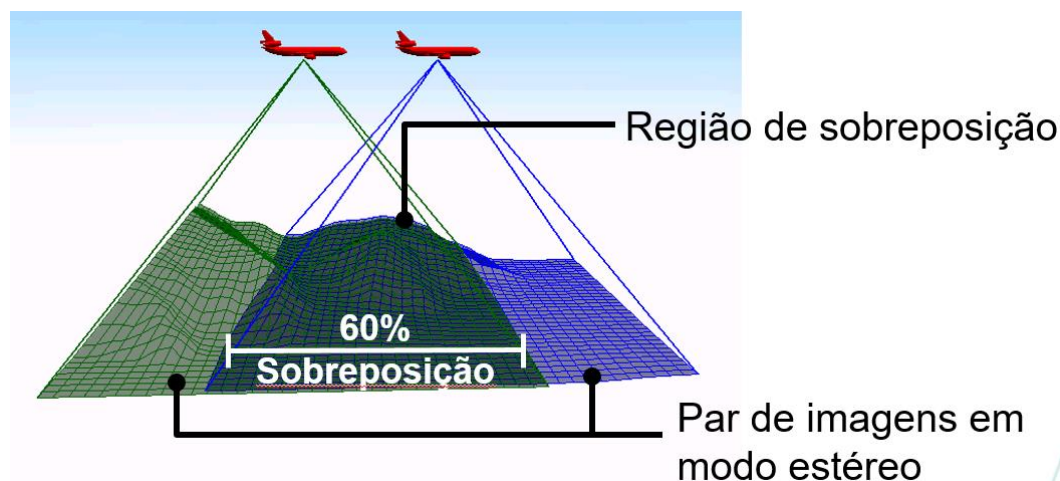
Também considerada uma técnica de sensoriamento remoto, a Fotogrametria é definida como arte, ciência e tecnologia de obter informações de confiança sobre objetos e do meio ambiente com o uso de processos de registro, medições e interpretações das imagens fotográficas e padrões de energia eletromagnética radiante e outras fontes (THOMPSON, 1966) [52].

Na aerofotogrametria as fotografias do terreno são tomadas por uma câmera de precisão montada em uma aeronave. As faixas de voo são planejadas de modo que ocorra sobreposição frontal entre as fotos de 60% e sobreposição lateral de 30% para a área mapeada. Conforme ilustrado na Figura 16, esta sobreposição permite que seja criado um par estereoscópico e a partir dele é possível gerar uma perspectiva tridimensional das fotografias. Neste ambiente tridimensional, é possível obter com precisão a restituição de elementos do meio ambiente e do espaço urbano como rios e corpos d'água, vegetação, sistema viário, parcelamento urbano e até informações de altimetria para obtenção de um Modelo Digital do Terreno – MDT (SLAMA, THEURER & HENRIKSEN, 1980) [53].

Segundo Brandalize (2003) [54], na Fotogrametria pode-se obter um MDT, manualmente, a partir da coleta de pontos com o uso de Estereoscopia em aparelhos reconstituídos ou estações digitais. Os pontos são obtidos através da leitura de coordenadas em perfis consecutivos ou pela geração de uma grade regular de pontos

extraídos por curvas de nível, pontos cotados e linhas estruturais, obtidos por captação fotogramétrica.

Figura 16 – Região de sobreposição frontal entre fotografias aéreas para geração de par estereoscópico.



Fonte: Hexagon, (2014) [55]

As fotografias aéreas possuem algumas vantagens em relação aos satélites espaciais, como a flexibilidade de variar a escala das fotografias em função da demanda de um projeto específico, a disponibilidade de obter imagens em condições meteorológicas de ausência de nuvens, além de menores interferências devido a massas de ar que pode vir a causar distorções em imagens de satélite.

2.6.3. Bases altimétricas globais

A necessidade de se obter uma base altimétrica global confiável fez com que, em fevereiro de 2000, fosse estabelecido um projeto de cooperação entre diversas instituições, entre elas a National Aeronautics and Space Administration (NASA). Essa cooperação realizou uma missão com duração de 10 dias, a bordo da nave Endeavour, que coletou dados topográficos de alta resolução da superfície terrestre entre as latitudes -54° e 60° tanto Norte quanto Sul. Os dados foram coletados usando um método denominado de interferometria radar por única passagem, que é um sistema de imageamento do radar Shuttle com espaçamento de 60 metros entre as imagens obtidas. Esta tecnologia é baseada no Imageamento Radar Espacial (RIVIX, 2000) [56].

Para as regiões imageadas, com exceção dos Estados Unidos, a base de dados disponibilizada publicamente inicialmente foi a SRTM-90, com pontos cotados espaçados aproximadamente 90 m entre si. Sobre ela o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) realizou trabalho de preenchimento de falhas e interpolação, o que deu origem ao TOPODATA – base de dados espaciais de todo o território brasileiro equivalente, segundo os autores, à base de dados SRTM com pontos cotados a cada 30 m (VALERIANO, 2008) [57]. Atualmente estão sendo disponibilizadas dados SRTM com resolução de 30 m para áreas fora dos Estados Unidos.

Em 17 de outubro de 2011, o *Ministry of Economy, Trade, and Industry – METI* do Japão e a NASA anunciaram conjuntamente a liberação do Radiômetro Espacial Avançado de Emissão Térmica e Reflexão – ASTER, Versão 2. A segunda versão do Modelo Digital de Elevação Global – GDEM, foi gerada através do satélite ASTER a partir de imagens de par estéreo coletadas numa cobertura que abrange as latitudes 83° norte a 83° sul, englobando 99% da massa terrestre da Terra (NASA, 2011) [58].

Como contribuição do METI e da NASA para o Sistema Global de Observação da Terra (GEOSS), os dados do ASTER GDEM com resolução espacial de 30m estão disponíveis gratuitamente para usuários de todo o mundo a partir do Centro de Arquivos Ativos Distribuídos (LP DAAC) e J-spacesystems. No entanto, os usuários são informados de que os dados contêm anomalias que impedem a efetividade do uso em determinadas aplicações. Os dados são fornecidos "tal como estão", e nem a NASA nem o METI serão responsáveis por quaisquer danos resultantes da utilização dos dados (NASA, 2011) [58].

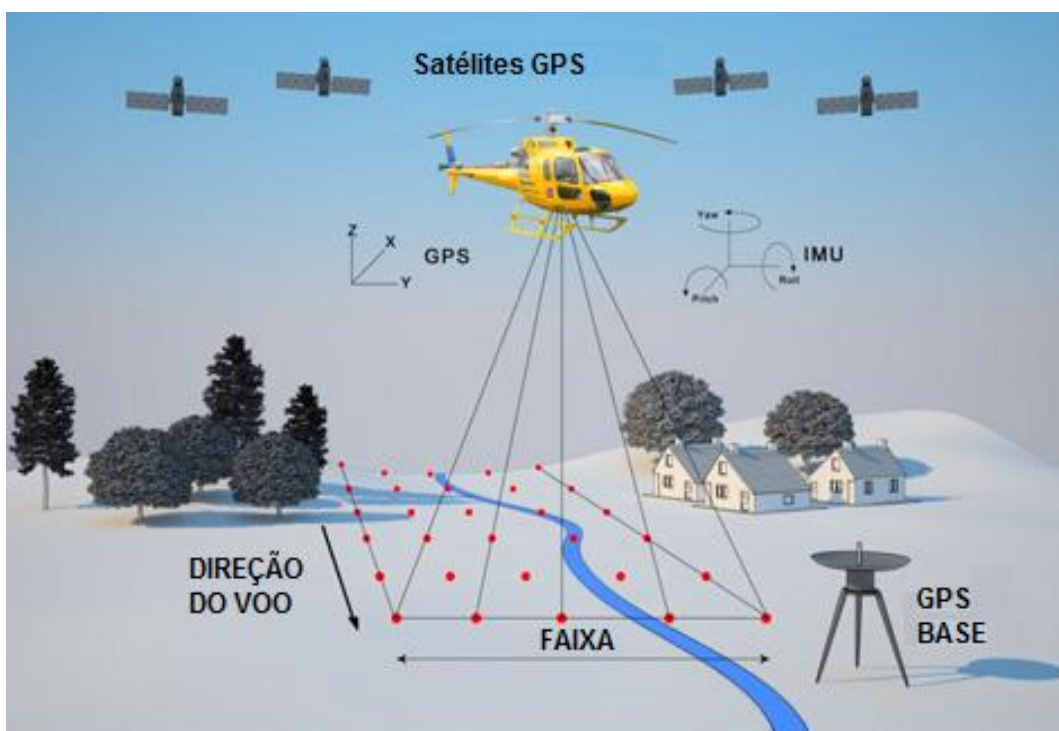
2.6.4. Perfilamento a laser e a tecnologia LiDAR

Embora as bases altimétricas globais tenham sua importância consagrada e ainda possam ser importantes para realização de diversos estudos e projetos, a representação do terreno com resolução espacial de 90m ou 30m não atende demandas que necessitem de precisão na ordem de centímetros, como exemplo de projetos de engenharia ou simulações hidrodinâmicas.

Segundo Popescu (2002) [59], o sistema LIDAR (*Light Detection and Ranging*) é uma tecnologia que permite a obtenção de informações tridimensionais da superfície terrestre com alta precisão. Embora os primeiros trabalhos tenham sido desenvolvidos ainda na década de 60, somente a partir dos anos 80 a técnica de perfilamento a laser começou a ser utilizada em mapeamentos de grandes áreas, isso devido ao aperfeiçoamento dos sensores e a qualidade do posicionamento dinâmico via Sistema de Satélites de Navegação Global – GNSS e posicionamento estático a partir de Unidades de Medições Inerciais – IMU (FLOOD, 2001) [60]; (FERREIRA & HERMERLY, 2010) [61].

O método de obtenção de informações altimétricas a partir de mapeamento, ou perfilamento a laser, consiste na emissão de pulsos de luz, e uma vez conhecida a frequência de emissão e a posição precisa do equipamento no instante em que o pulso é emitido, torna-se possível calcular as elevações do terreno, conforme ilustrado na Figura 17. A precisão e densidade de pontos sobre o terreno variam, principalmente, em função de especificações técnicas dos sensores e da altura de voo (RENSLOW, 2012) [62] apud Silva, (2014) [63].

Figura 17 – Método de obtenção de pontos a partir de perfilamento a laser.



Fonte: Adaptado de Helica, (2016) [64]

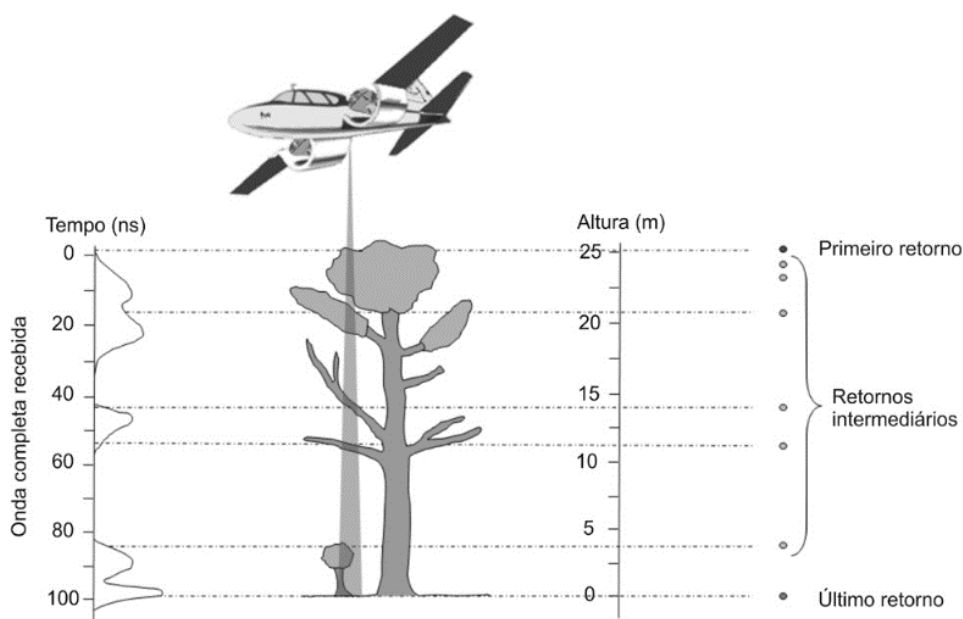
O resultado do perfilamento a laser é uma nuvem de pontos cotados, distribuídos aleatoriamente sobre o terreno. É possível transformar a nuvem de pontos em Redes Triangulares Irregulares (TIN), onde cada ponto torna-se um vértice de um triângulo, ou a partir de métodos de interpolação, em grades regulares de pontos. Quando a transformação é realizada considerando todos os pontos obtidos no mapeamento, incluindo vegetação, edificações, pontes, barragens ou linhas de transmissão, o resultado proveniente é chamado de Modelo Digital de Elevação – MDE. Quando a nuvem de pontos é filtrada, através de algoritmos e ajustes manuais, para remoção destes elementos sobre a superfície do terreno dá-se o nome de Modelo Digital de Terreno – MDT à interpolação dos pontos filtrados (PETZOLD et al., 1999) [65]; (BRANDALIZE, 2004) [66].

Segundo Ferreira (2014) [67], os modelos digitais do terreno são utilizados para representar as formas naturais do terreno e a partir de um MDT produtos decorrentes podem ser gerados, como curvas de nível, mapas de declividade, delimitação de bacias hidrográficas, extração de mapas de drenagem, definição de áreas de preservação permanente, entre outras.

Segundo Brandalize (2003) [54], outra característica importante do perfilamento a laser é a medição de mais de uma reflexão para cada pulso (FIGURA 18), além de detectar reflexões múltiplas oriundas de objetos pequenos como fios e cabos suspensos acima do solo.

Segundo Falat (2005) [68], este recurso permite num processamento posterior que se faça a distinção de objetos acima do solo (árvores, casas, postes, etc.) impulsionando um campo de desenvolvimento de pesquisas para determinar algoritmos de classificação destes objetos como nos trabalhos de Assunção (2010) [69] que estuda os métodos de classificação automática e filtragem dos pontos de elevação e Cao et al., (2016) [70] que utiliza técnicas de classificação para identificação de até três espécies de árvores.

Figura 18 – Demonstração de feixe de luz do sensor laser e detecção de pontos a partir de diferentes retornos e alturas.



Fonte: Giongo et al., (2010) [71]

Particularmente para aplicações voltadas para hidrodinâmica, destaca-se que a qualidade dos dados provenientes de perfilamento a laser e a forma de representar o terreno trouxeram ganhos extraordinários às simulações computacionais. Marks & Bates (2000) [72] e Cobby (2003) [73], enfatizam que o ganho de qualidade se dá principalmente pela precisão de representação das planícies de inundação.

2.7. Programa Pernambuco Tridimensional – PE3D: base cartográfica para inovação tecnológica da gestão governamental de Pernambuco

A utilização do perfilamento a laser em grande escala ainda não é acessível a qualquer território, e mesmo com a crescente utilização do recurso, ainda pode ser considerado um privilégio técnico dispor de uma base altimétrica de alta resolução. Fazer uso de técnicas avançadas de planejamento do uso do solo urbano e rural pode trazer expressivos ganhos de qualidade e rapidez para a elaboração de estudos, como planos diretores, e projetos de engenharia de maneira geral (PERNAMBUCO, 2016) [74]

Em Pernambuco, a primeira grande experiência na contratação de produtos decorrentes de perfilamento a laser veio após as enchentes que atingiram drasticamente municípios da Mata Sul do Estado de Pernambuco, entre 2010 e 2011. Por meio da Secretaria de Recursos Hídricos e Energéticos – SRHE foram executados serviços de mapeamento das áreas afetadas e da calha dos principais rios das bacias hidrográficas atingidas. Esse mapeamento realizou uma varredura a laser do terreno que permitiu obter com rapidez e qualidade as informações altimétricas para elaboração dos projetos das barragens de controle de cheias, desenvolvimento de modelos de simulação hidrológica e hidrodinâmica, elaboração de estudos ambientais, identificação de áreas de risco e desapropriações (CIRILO et al., 2014) [41].

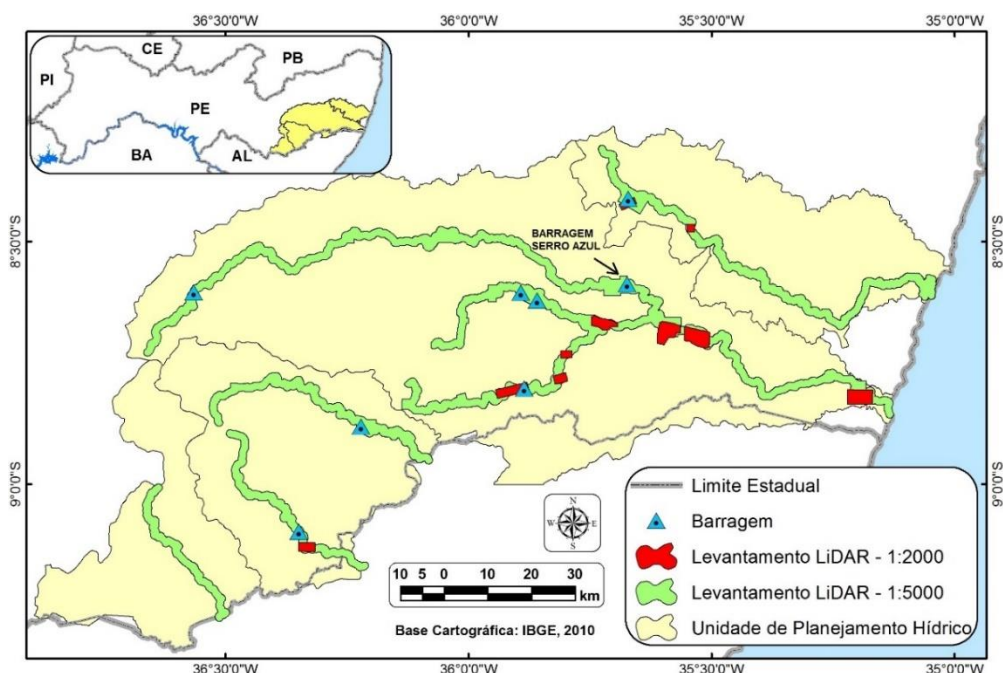
Para realização do mapeamento dos rios, foi considerada uma área no entorno do eixo central dos mesmos de 850 metros para cada lado, com extrapolação em alguns trechos de acordo com os interesses da SRHE. Ainda para as áreas referentes aos rios, foi definida a escala de representação cartográfica dos produtos igual a 1:5.000. Os rios mapeados foram: Una, Panelas, Pirangi e Sirinhaém, desde a nascente até à foz, e os rios Paraíba, Canhoto e Mundaú, mapeados até à divisa estadual com o estado de Alagoas (LACTEC, 2011) [75].

No mapeamento das cidades foram consideradas as áreas urbanizadas acrescidas das áreas para realocação de famílias desabrigadas. Foram mapeados os municípios de Correntes, São Benedito do Sul, Jaqueira, Palmares, Maraial, Catende, Água Preta, Barreiros, Cortês e Barra de Guabiraba, todos na escala de representação cartográfica igual a 1:2.000 (LACTEC, 2011) [75]. A Figura 19 identifica as áreas mapeadas na calha dos rios e nas cidades.

Em janeiro de 2014 teve início o Programa Pernambuco Tridimensional – PE3D. Os serviços contratados visam o recobrimento aerofotogramétrico e perfilamento a laser de todo o território pernambucano. Na contratação foi incluído o mapeamento dos 98.149km² do Estado de Pernambuco na escala 1:5.000, subdividindo o Estado em 13.115 folhas, articuladas e agrupadas em cinco blocos (FIGURA 20), para as quais foram geradas ortofotos nesta escala e produtos decorrentes do perfilamento a laser

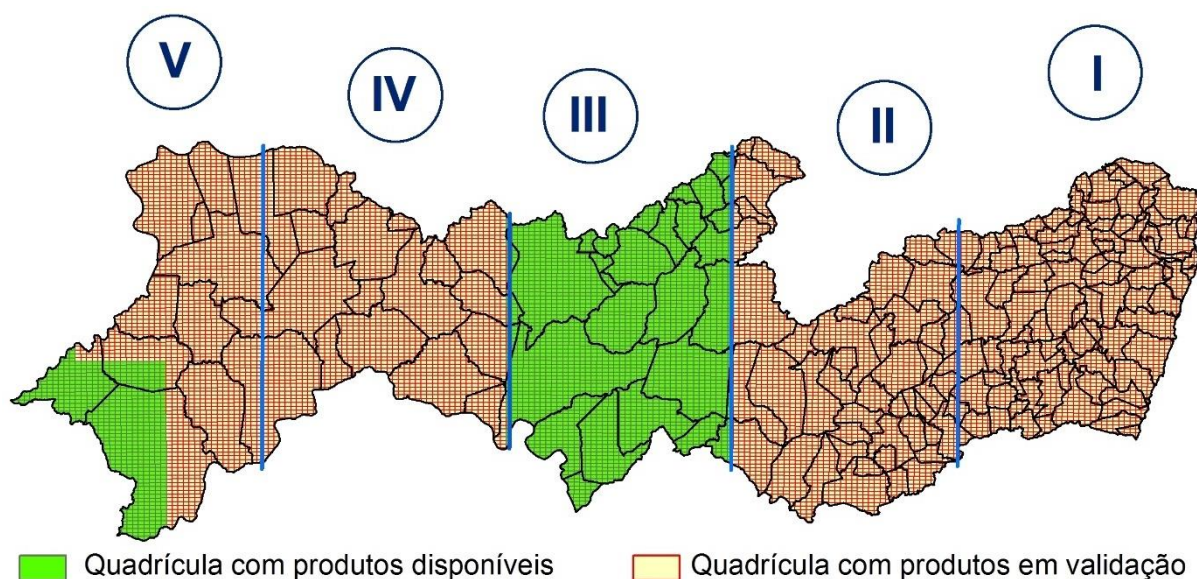
com precisão altimétrica melhor que 25 cm. Entre estes produtos estão Modelos Digitais de Terreno (MDT), Modelos Digitais de Elevação (MDE) e imagens de Intensidade Hipsométrica.

Figura 19 – Identificação de áreas mapeadas pelo primeiro perfilamento a laser após as cheias de 2010 e 2011.



Fonte: Cirilo et al., (2014) [41]

Figura 20 – Divisão de blocos e quadrículas do mapeamento Pernambuco Tridimensional para todo território do Estado.



Fonte: O autor, (2017)

Adicionalmente, 870 km² distribuídos em áreas urbanas de 26 municípios foram contempladas com recobrimento aerofotogramétrico e geração de ortofotos na escala 1:1.000, perfilamento a laser com precisão altimétrica melhor que 10 cm e geração de Modelos Digitais de Terreno (MDT), Modelos Digitais de Elevação (MDE) e Imagens Hipsométricas. Algumas especificações dos produtos na escala 1:5.000 e 1:1.000 podem ser vistas na Tabela 3.

Tabela 3 – Características técnicas dos produtos do Pernambuco Tridimensional.

	Escala 1:5000		Escala 1:1000	
	Ortofoto	Perfilamento Laser	Ortofoto	Perfilamento Laser
Extensão dos arquivos	.tif .tfw e .dwg	.xyz .xyzi e .tif	.tif .tfw e .dwg	.xyz .xyzi e .tif
Densidade de pontos	-	~ 1 ponto/m ²	-	~ 4 pontos/m ²
Resolução espacial	50 cm	1 m	12 cm	50 cm
Resolução radiométrica	8 bits	32 bits	8 bits	32 bits
Precisão planimétrica	~ 1 m	-	~ 25 cm	-
Precisão altimétrica*	-	25 cm	-	10 cm
Altura média de voo	4.800 m	2.800 m	700 m	700 m

* A precisão altimétrica dos produtos 1:5000 tem como referência o MAPGEO 2010, enquanto os produtos 1:1000 são referenciados segundo Referências de Nível (RN's) do IBGE.

Fonte: O autor, (2017)

Todos os produtos do PE3D estão referenciados no sistema de coordenadas projetadas SIRGAS 2000, nos fusos 24S ou 25S. Para cada uma das folhas do Pernambuco Tridimensional serão disponibilizados conjuntos de seis produtos:

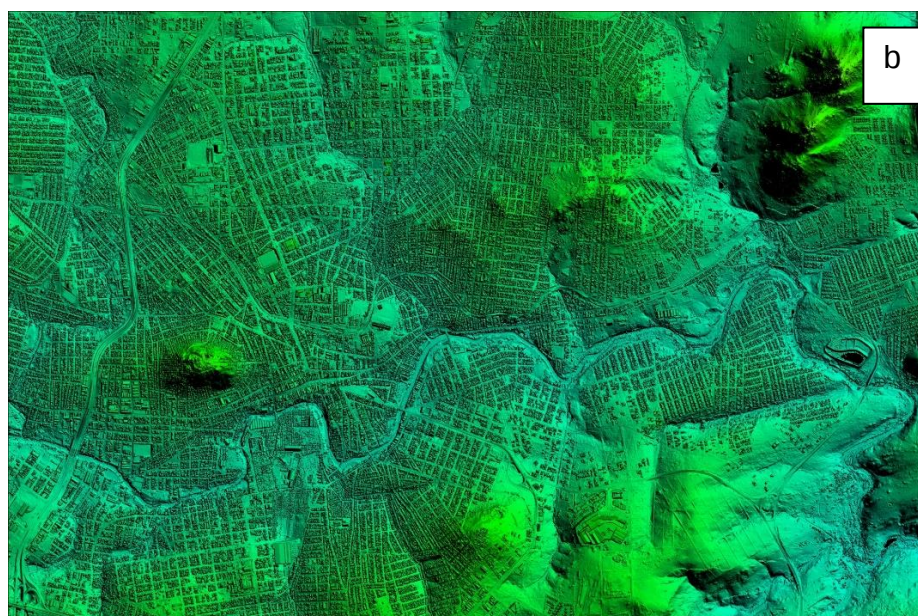
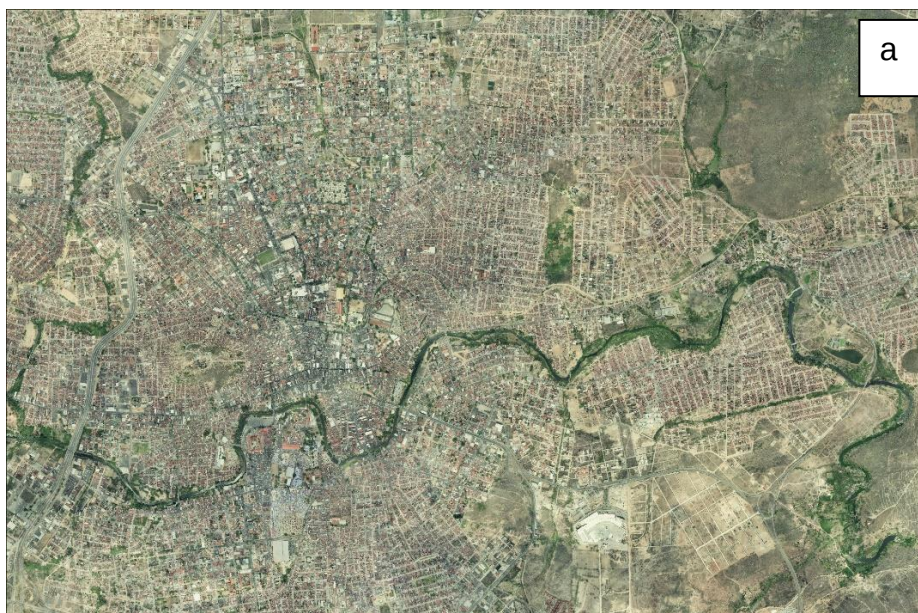
- 1) ORTOFOTOS – Ortofotos digitais articuladas e disponibilizadas em formato GeoTIFF, com arquivo em formato CAD configurado para impressão em tamanho A1.
- 2) MDE (ASCII) – Modelo Digital de Elevação apresentado em formato XYZI, com as coordenadas de todos os pontos coletados pelo laser e a intensidade de retorno do pulso laser, incluindo áreas com elevações como vegetação, edifícios, pontes.
- 3) MDE (RASTER) – Modelo Digital de Elevação obtido através do MDE ASCII, apresentado em formato GeoTIFF e arquivo auxiliar TFW, com resolução espacial de 1m.
- 4) MDT (ASCII) – Modelo Digital de Elevação apresentado em formato XYZ, com as coordenadas de todos os pontos coletados pelo laser, excluindo áreas com elevações como vegetação, edifícios, pontes.

- 5) MDT (RASTER) – Modelo Digital de Terreno obtido através do MDT ASCII, apresentado em formato GeoTIFF e arquivo auxiliar TFW, com resolução espacial de 1m.
- 6) MDE COMPOSIÇÃO – Imagem de composição das informações hipsométricas e intensidade de retorno do pulso laser com resolução espacial de 1m. Produto apresentado em formato GeoTIFF, arquivo auxiliar TFW e escala hipsométrica em formato PNG.

A Figura 21 apresenta a visão geral de ortofotos e Modelo Digital de Elevação referentes aos produtos da Escala 1:1.000 na área urbana do município de Caruaru.

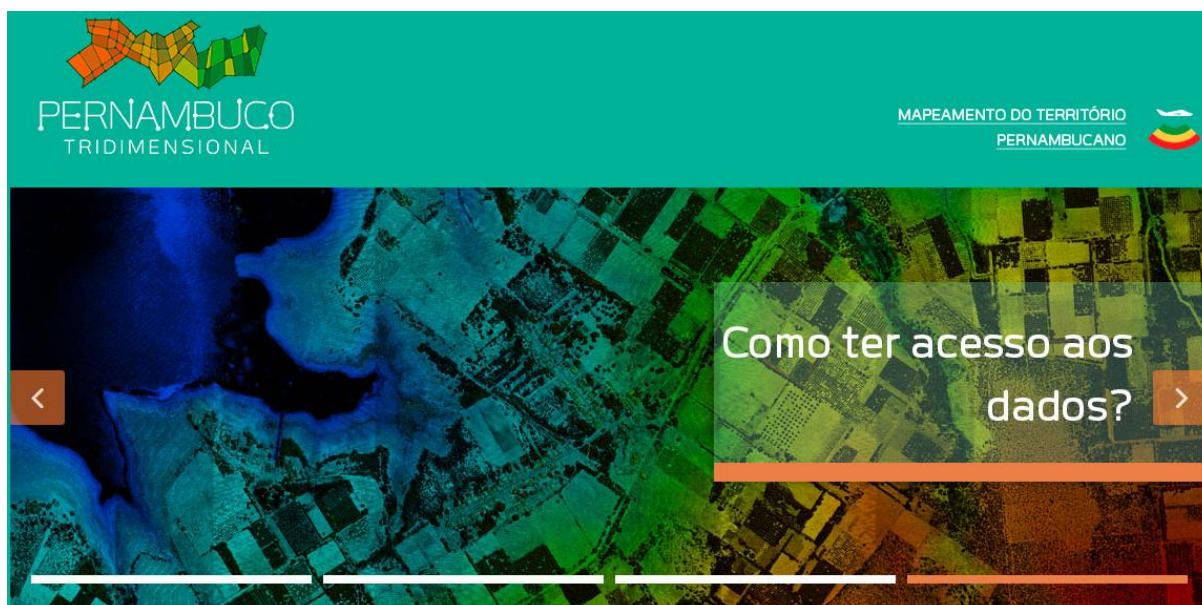
Figura 21 – Amostra de produtos da escala 1:1000 na área urbana de Caruaru.

(21a) Ortofotos. (21b) MDE RASTER.



Todos os dados do Pernambuco Tridimensional estão sendo disponibilizados, na medida em que são validados, através do endereço eletrônico www.pe3d.sdec.pe.gov.br, conforme ilustrado na Figura 22. Os dados podem ser utilizados por estudantes, profissionais de empresas públicas ou privadas. Não é cobrado nenhum valor por qualquer produto disponibilizado através do Pernambuco Tridimensional.

Figura 22 – Página de disponibilização de dados do Pernambuco Tridimensional.



Fonte: Pernambuco, (2016) [75]

Segundo Cirilo et al. (2015) [76], o Programa Pernambuco Tridimensional está sendo desenvolvido para se tornar uma importante ferramenta de gestão e planejamento territorial no Estado de Pernambuco. A partir destes dados já foram desenvolvidas aplicações para monitoramento e prevenção dos efeitos de enchentes, sendo esperado que diversas outras surjam nas mais diversas áreas de conhecimento, como monitoramento de riscos geotécnicos e ações de controle de erosão, projetos de redes de água, esgoto, linhas de transmissão, estradas, planejamento urbano, ações de controle e recuperação ambiental, implantação de empreendimentos agrícolas e industriais e muitas outras ações voltadas ao desenvolvimento, com amplas possibilidades para realização dessas ações dentro de princípios sustentáveis de gestão.

2.8. Ferramentas de suporte à tomada de decisões em situações de eventos extremos

As geotecnologias têm como premissas fornecer instrumentos para a pesquisa, gestão e desenvolvimento de atividades em áreas de conhecimento multidisciplinares. No caso dos instrumentos de gestão para tomada de decisões durante eventos de chuvas intensas, a engenharia de recursos hídricos tem utilizado intensamente dos recursos disponíveis para sistematizar essas decisões e prever ou minimizar os efeitos de desastres naturais.

Entre as ferramentas aperfeiçoadas com base na qualidade das informações espaciais disponíveis, são ilustrados a seguir conceitos e recursos sobre os modelos de previsão meteorológica, modelos de simulação hidrológica e modelos de simulação hidrodinâmica.

2.8.1. Modelos de previsão meteorológica

Segundo Ribeiro (2008) [77], o principal objetivo da investigação meteorológica é a previsão do tempo e para atingir o referido objetivo é necessário conhecer e compreender os fenômenos atmosféricos. Depois de se conhecer o estado da atmosfera num determinado instante, incluindo as condições em diferentes altitudes ao longo das camadas atmosféricas e as leis que governam o movimento da atmosfera, o objetivo da previsão é determinar o estado do tempo num instante posterior ao atual. Quanto ao prazo de previsão, a meteorologia classifica-se em:

- Previsão a muito curto prazo (próximas horas);
- Previsão a curto prazo (1 a 2 dias);
- Previsão a médio prazo (até uma semana);
- Previsão a longo prazo (superior a uma semana) que inclui a previsão mensal e a previsão sazonal;
- Previsão climática (cenários previstos para vários anos).

As previsões meteorológicas são realizadas com base na análise de resultados de modelos físico-matemáticos da atmosfera, designados por modelos numéricos de previsão meteorológica. Os modelos de previsão numérica recorrem ao potencial de cálculo de supercomputadores para produzir uma estimativa do cenário futuro da atmosfera (RIBEIRO, 2008) [77].

Segundo Pielke (2002) [78], a modelagem meteorológica também se divide de acordo com a escala dos sistemas atmosféricos. Quando os eventos ocorrem em até 10 km de extensão, define-se como um evento de microescala. Quando um evento meteorológico ocorre entre algumas dezenas ou até centenas de quilômetros de extensão pode ser definido como um sistema de mesoescala. A classificação dos modelos acompanha a escala dos sistemas físicos.

Sendo assim, os modelos numéricos podem ser classificados como modelos globais ou modelos regionais. Os modelos globais possuem uma resolução espacial da ordem de 1-5 graus de latitude-longitude e, portanto, não conseguem representar muito bem os fenômenos meteorológicos de escala regional. Isto ocorre porque a representação global dos processos meteorológicos requer a necessidade de um grande número de pontos de grade, exigindo enorme capacidade computacional. Por outro lado, os modelos regionais possuem resolução mais acurada, mas são utilizados para regiões específicas e devem ser alimentados em suas fronteiras laterais por condições atmosféricas de larga escala, logo não simulam fenômenos de grande escala (RAMOS DA SILVA, et al. 2009) [79]

O refinamento de escala (*downscaling*) das projeções de mudanças climáticas produzidas pelos Modelos de Circulação Geral - MCG requer a incorporação de informações locais e é particularmente importante para áreas de topografia complexa, ilhas e regiões costeiras ou ainda áreas com cobertura do solo/uso da terra extremamente heterogêneos. Os métodos de *downscaling* podem ser de natureza temporal ou espacial (CHOU & NOBRE, 2014) [80]. A Figura 23 ilustra a malha de simulação do modelo regional OLAM (Ocean-Land-Atmosphere Model), onde se percebe a diferença de resolução entre a região de *downscaling* na América do Sul e o resto do globo.

Figura 23 – Malha do modelo numérico de previsão OLAM.



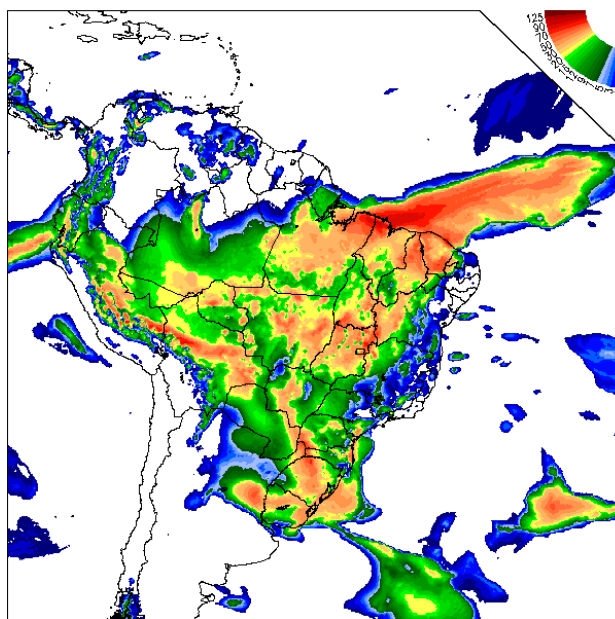
Fonte: Ramos da Silva, et al. (2009) [79]

O Brasil tem se destacado pelo desenvolvimento de modelos atmosféricos regionais e globais, a exemplo dos modelos atmosféricos regionais ETA e BRAMS (CHOU & NOBRE, 2011) [80]. O Modelo ETA foi desenvolvido pela Universidade de Belgrado e pelo Instituto Hidrometeorológico da antiga Iugoslávia e posteriormente foi operacionalizado pelo National Center for Environmental Prediction (NCEP), vinculado a Agência Nacional de Gestão Oceanica e Atmosferica dos Estados Unidos (NOAA). No Brasil, o Modelo ETA foi instalado no Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) em 1996 (CHOU, 1996) [81].

O software de execução do modelo ETA pode ser obtido gratuitamente no site: <http://etamodel.cptec.inpe.br> do CPTEC, vinculado ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, junto com as instruções de instalação. As condições iniciais do modelo (ou os campos para tempo inicial) são fornecidas pelo CPTEC, em uma área para download, para os usuários cadastrados. As condições iniciais descrevem a atmosfera em três dimensões (x,y,z), com os valores das variáveis como temperatura, vento, umidade, pressão atmosférica especificadas na grade do modelo. Em termos simples, é a partir dessa condição inicial que o modelo é integrado no tempo para determinar a evolução temporal da atmosfera, ou para fazer previsão (BASSAN, 2014) [82].

O modelo possui dois módulos: de processamento e de pós-processamento, sendo que a visualização de resultados do modelo (FIGURA 24), que é uma parte importante de pós-processamento, pode ser feita usando um software que interprete o formato de arquivos de saída de dados do modelo (BASSAN, 2014) [82].

Figura 24 – Pós-processamento da precipitação prevista no modelo Eta 15km do CPTEC/INPE.



Fonte: INPE, (2016) [83]

Inicialmente, a versão do modelo ETA que rodava operacionalmente no CPTEC/INPE possuía resolução horizontal de 40 km, além de outra de 20 km, ambas com 38 camadas na vertical, que cobrem praticamente toda a América do Sul. As versões com resolução de 40 e 20 km foram substituídas pelo ETA 15 km, sendo que nesta versão as previsões são fornecidas duas vezes ao dia, uma com condição inicial as 0h 00min UTC e outra às 12h 00min UTC para um período de 11 dias à frente do momento da simulação (MOURA et al., 2010) [84].

2.8.2. Modelos de simulação hidrológica

A modelagem meteorológica é determinante para anteceder situações de prováveis catástrofes ambientais. No entanto, uma vez detectada uma situação de alerta, informações adicionais são necessárias para subsidiar decisões que podem vir a

alterar significativamente os efeitos de um desastre ambiental. Segundo Tucci (2005) [85] um modelo hidrológico é uma ferramenta para representar os processos que ocorrem na bacia hidrográfica e prever as consequências das suas ocorrências, sendo a relação entre chuva e vazão um dos processos comumente analisados.

Kaiser (2006) [86] comenta que os modelos hidrológicos podem ser utilizados em diversas situações, como para estender séries de dados fluviométricos na elaboração de projetos de engenharia, simular vazões em cursos de água de bacias submetidas a intervenções, gerenciar barragens e sistemas de alerta de cheias, analisar o impacto de obras hidráulicas e ações antrópicas numa bacia hidrográfica, ou ainda simular fases do ciclo hidrológico a fim de subsidiar estudos específicos.

Segundo Tucci (2005) [85] e Rennó & Soares (2000) [87], os modelos podem ser classificados sob diferentes aspectos. Comumente os modelos são classificados, dentre outras formas, de acordo com o tipo de variáveis utilizadas na modelagem (estocásticos ou determinísticos), o tipo de relações entre essas variáveis (empíricos ou conceituais), a forma de representação dos dados (discretos ou contínuos), a existência ou não de relações espaciais (pontuais ou distribuídos), e a existência de dependência temporal (estáticos ou dinâmicos).

O tipo de modelo hidrológico para representar o regime hidrológico de uma bacia hidrográfica não é uma solução única, podendo haver situações em que mais de um tipo de modelo represente a bacia satisfatoriamente. Como também não é certo que ao se utilizar um modelo que possua um método de cálculo mais completo, e portanto mais complexo, os resultados sejam necessariamente melhores (TUCCI, 2005) [85].

Uma vez escolhido o modelo hidrológico a ser utilizado para um determinado estudo, é necessário fornecer as informações e parâmetros que descrevam as características físicas da bacia hidrográfica e os históricos de precipitação e vazões observadas ao longo da área de estudo. Segundo Santos (2009) [88] existem três grupos de parâmetros que podem descrever a bacia:

- Parâmetros obtidos por meio de ensaios de campo em uma área experimental, em laboratórios ou de acordo com as características geométricas dos elementos;
- Parâmetros obtidos de referências da literatura, com base em trabalhos efetuados na bacia em estudo ou em áreas semelhantes;
- Parâmetros desconhecidos que precisam ser testados em através de calibração.

Segundo Alcoforado & Cirilo (2001) [89] a obtenção das características geométricas para representar a bacia hidrográfica num modelo hidrológico pode ser realizada com o auxílio de ferramentas de geoprocessamento e sensoriamento remoto.

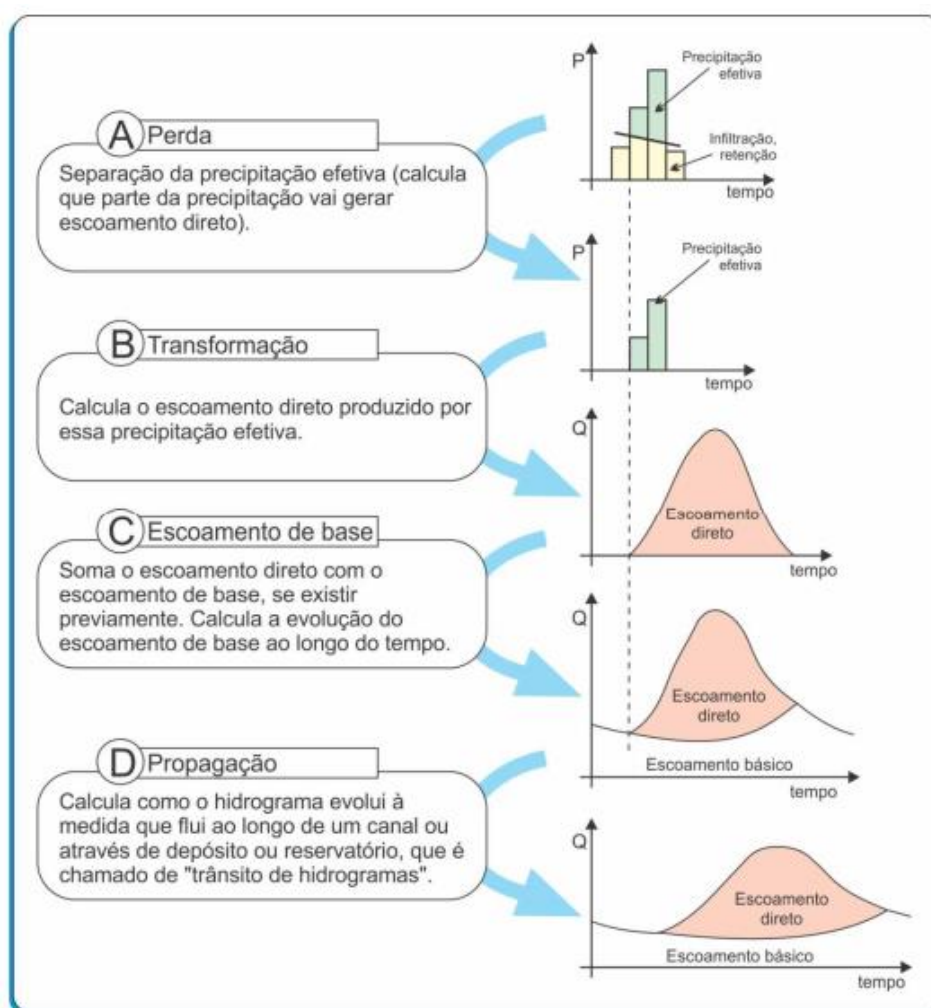
Já os parâmetros que precisam de calibração, em muitos casos, podem apresentar dificuldades para serem definidos. A calibração de modelos hidrológicos é um processo iterativo em que os valores dos parâmetros são modificados e seu efeito nos resultados é avaliado repetidamente. A condição de parada é atingida quando o hidrograma calculado reproduz o hidrograma observado com boa precisão (COLLISCHONN, 2001) [90].

A calibração pode utilizar métodos qualitativos como uma avaliação visual, em gráficos, verificando se as vazões calculadas e observadas têm valores próximos nos períodos de cheia e estiagem, se a recessão do hidrograma está bem apresentada. Métodos quantitativos também podem ser utilizados para avaliar a qualidade da calibração dos parâmetros dos modelos hidrológicos, como a comparação das diferenças de volume entre os hidrogramas simulados e observados, as diferenças entre as vazões de pico ou ainda por meio de coeficientes de correlação como o R^2 , descrito na equação de Nash-Sultcliffe (COLLISCHONN, 2001) [90].

Segundo Almeida (2013) [21], o Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos da América (U.S. Army Corps of Engineers - USACE) contribuiu significativamente para o desenvolvimento dos modelos hidrológicos com a criação de programas computacionais, os quais foram reunidos na família HEC (Hydrologic Engineering Center).

Desenvolvido pelo USACE, o HEC-HMS é um programa computacional de domínio público que inclui grande diversidade de métodos de cálculo para definição do balanço hídrico de uma bacia. Ferramentas com essa versatilidade podem ser consideradas como multimodelos, pois oferecem várias alternativas metodológicas para modelar os processos hidrológicos. O HEC-HMS é um programa que pode ser adaptado a um sistema de interesse, através de mudanças nos dados em um banco de dados ou alterações nos parâmetros, nas condições de contorno e nas condições de entrada iniciais (CAMPOS, 2009) [91]. De maneira simplificada, grande parte das ferramentas para simulações hidrológicas utilizam métodos de cálculo para relacionar chuva e vazão considerando as etapas de cálculo de perdas, escoamento de base e propagação da onda de cheia, conforme mostrado na Figura 25.

Figura 25 – Etapas de cálculo na relação chuva x vazão em modelos hidrológicos.



Fonte: Adaptado de Sánchez, (2009) [92].

Com a evolução dos recursos computacionais e linguagens visuais, os programas para modelagem hidrológica foram enriquecidos quanto à incorporação de dados de entrada detalhados e na elaboração dos relatórios de saída. Os recursos gráficos, as ligações com banco de dados e a interatividade com os recursos da internet realizaram grandes transformações tecnológicas nas ferramentas de simulação (ALMEIDA, 2013) [21]. A utilização desses recursos cada vez mais traz ganhos de qualidade nos procedimentos de cálculo e na apresentação de resultados para os diversos interessados.

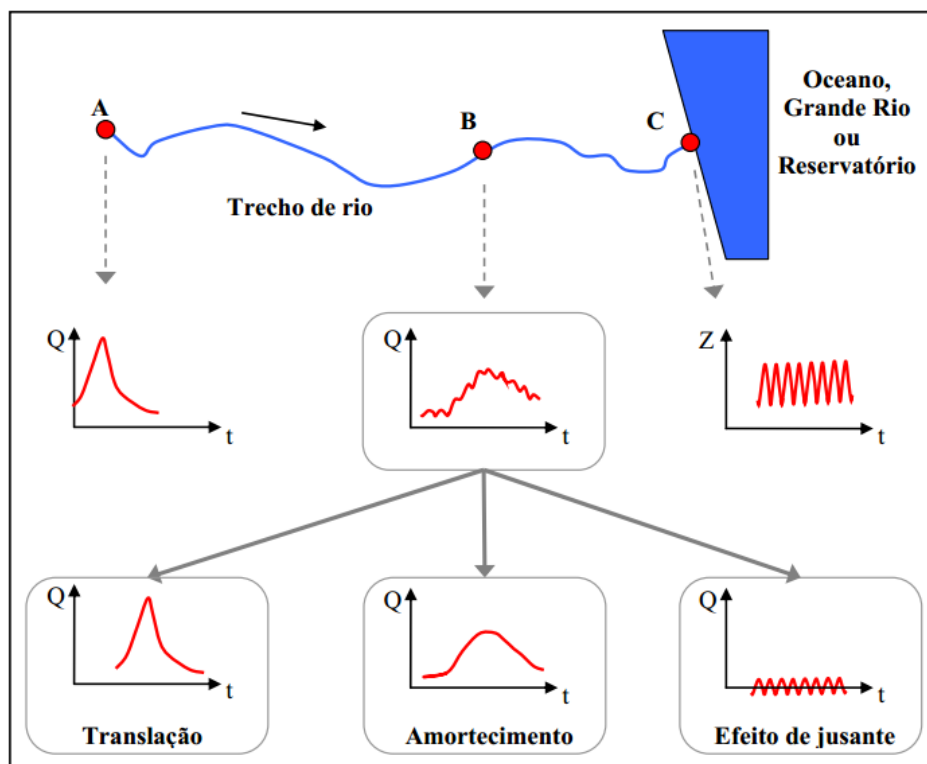
2.8.3. Modelos de simulação hidrodinâmica

Em situações de eventos de chuvas intensas e possibilidade de ocorrência de vazões acima da média, as simulações hidrológicas se apresentam como uma ferramenta que permite transformar a informação de chuva em estimativa de vazão em um determinado ponto. Para algumas aplicações, como estudos de regularização de vazões, estimar a vazão pode ser uma informação suficiente para conclusão dos estudos. No entanto, para gestão de situações de emergência também é necessário conhecer quais os efeitos e quais áreas uma determinada onda de cheia pode atingir.

Os modelos hidrológicos utilizam métodos de cálculo para transportar a onda de cheia que não conseguem representar a variação de nível do rio de modo a identificar áreas de inundação. Segundo Cirilo et al. (2003) [93] os modelos hidrodinâmicos fazem uso das equações da continuidade e dinâmica, sendo que na última aparecem todos os termos referentes à gravidade, atrito, pressão e aceleração.

Segundo Paiva (2009) [94] a consideração dos efeitos hidrodinâmicos sobre um hidrograma traz consequências relevantes sobre o escoamento de rios, havendo efeitos de advecção que causam a translação da cheia, efeitos de dispersão que causam o amortecimento da vazão de pico e efeitos de jusante que consideram a influência do curso d'água principal sobre um afluente. Os efeitos hidrodinâmicos citados por Paiva (2009) [94] podem ser acompanhados na Figura 26.

Figura 26 – Principais componentes hidrodinâmicas do escoamento em rios.



Fonte: Paiva, (2009) [94]

As equações da hidrodinâmica fluvial não são consideradas triviais por não ser possível resolvê-las analiticamente. Sendo assim, métodos numéricos baseados em aproximações por diferenças finitas são os mais utilizados para obtenção dos resultados. A solução das equações por métodos de diferenças finitas é integrada em dois grupos. O primeiro agrega os chamados esquemas explícitos: as equações após à discretização são mais simples, sendo possível calcular os valores das variáveis no tempo $t+1$ somente em função de dados já conhecidos no passo de tempo t anterior. A segunda abordagem, dos esquemas de discretização implícitos, relaciona os valores das variáveis no tempo $t+1$ entre si. Esses esquemas são mais estáveis numericamente, porém trazem o inconveniente da necessidade de resolução de sistemas de várias equações simultâneas não lineares, na versão mais fiel das equações de Saint-Venant, segundo Cirilo et al. (2003) [93].

Segundo Silva (2015) [40] o ponto inicial da modelagem hidrodinâmica é a construção da geometria do canal ou canais. Para isso vários métodos são usados, entre eles os

mecanismos que utilizam modelos digitais de terreno em programas de geoprocessamento.

A mais recente versão da ferramenta computacional desenvolvida pelo USACE, pertencente à família de programas computacionais HEC, denominada de “*River Analysis System*” (HEC-RAS) permite realizar cálculos de hidráulica fluvial em condições unidimensional (1D) e bidimensionais (2D). O sistema HEC-RAS contém quatro componentes de análise hidráulica que permitem realizar: (1) Cálculos de perfil de superfície de água em regime permanente; (2) Simulações de escoamentos unidimensional e bidimensional de escoamentos não-permanentes; (3) Cálculos de transporte de sedimentos e (4) Modelagem de qualidade de água (USACE, 2016) [95].

Mark et al. (2004) [96] comentam sobre limitações da modelagem hidrodinâmica 1D no estudo de enchentes em áreas urbanas. Em seu trabalho são avaliadas questões relativas à metodologia a ser empregada na modelagem do fenômeno, os requisitos de dados, parâmetros, além da relação entre o movimento da água no rio e os sistemas de drenagem das áreas urbanas.

Segundo Paz, Schetinni & Tucci (2003) [97] em determinadas situações a utilização de um modelo hidrodinâmico 2D é recomendada como na análise de inundação de planícies. Brasil (2005) [98] utilizou modelagem hidrodinâmica bidimensional para simular a ruptura de barragens e a propagação de uma de cheia de maneira brusca. Rosman (2000) [99] desenvolveu modelo hidrodinâmico bidimensional para análise de baías onde ocorre forte influência dos efeitos de marés e regiões com baixas velocidades de fluxo.

2.9. Monitor Avançado de Enchentes – MAVEN

As enchentes que ocorreram no Estado de Pernambuco em 2010 e 2011 fizeram ressurgir, sob os aspectos administrativos, a relevância dos efeitos das inundações em áreas urbanas de forma que a maior parte das instituições públicas tiveram algum envolvimento com as ações emergenciais de assistências às vítimas ou com as ações de reconstrução da infraestrutura. Diante da abrangência das ações relacionadas às

enchentes, foi realizada parceria entre Universidade Federal de Pernambuco – UFPE e Governo do Estado para desenvolvimento de um sistema de suporte à decisão que integrasse informações da bacia do rio Una.

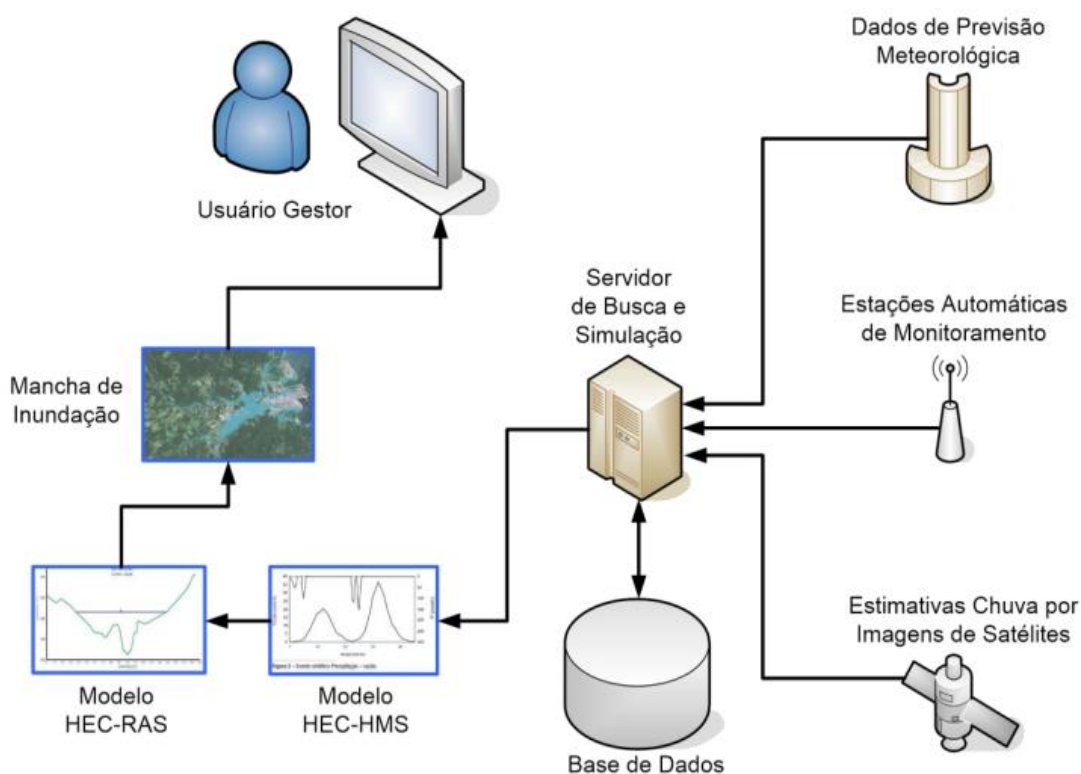
Segundo Silva (2015) [40], de uma maneira geral os Sistemas de Suporte à Decisão (SSD's), também conhecidos como Sistemas de Apoio à Decisão – SAD's, são ferramentas computacionais que subsidiam a obtenção, tratamento e apresentação de informações relacionadas a um determinado campo de conhecimento. Os SSD's proporcionam simulações de cenários com o objetivo de melhorar o processo de decisões e auxiliar técnicos em situações de conflitos.

Na gestão de recursos hídricos do Estado de Pernambuco, os trabalhos de desenvolvimento de SSD's tiveram contribuição pioneira com estudos desenvolvidos por Alcoforado & Cirilo (2001) [88] e Alcoforado (2006) [100], onde foram feitas integrações das ferramentas disponíveis para gestão de cheias na bacia hidrográfica do rio Capibaribe.

No caso da bacia do rio Una, existe disponível o Monitor Avançado de Prevenção de Enchentes – MAVEN. O MAVEN teve início com o desenvolvimento de modelos hidrológicos e hidrodinâmicos unidimensionais, conforme apresentado por Ribeiro Neto, Cirilo & Dantas (2011) [38] e Dantas (2012) [39]. Na sequência a idealização do MAVEN foi apresentada por Cirilo et al. (2011b) [37] onde se apresentou a estrutura do sistema, com a utilização de estações telemétricas

O desenvolvimento do MAVEN, do ponto de vista computacional, foi realizado por Silva (2015) [40]. Em seu trabalho, Silva (2015) [40] integrou três alternativas de entrada de dados de chuva, a partir de dados de previsão meteorológica, estações automáticas e estimativas através de imagens de satélites. Na sequência um servidor conectado a base de dados onde se encontram os modelos hidrológicos e hidrodinâmicos realiza todas as simulações em ambiente WEB. Conforme ilustrado na Figura 27, as simulações podem ser sequenciadas, onde resultados do HEC-HMS servem como dados de entrada para o HEC-RAS, que por sua vez permite gerar cenários de inundação.

Figura 27 – Esquema geral do Monitor Avançado de Enchentes – MAVEN.

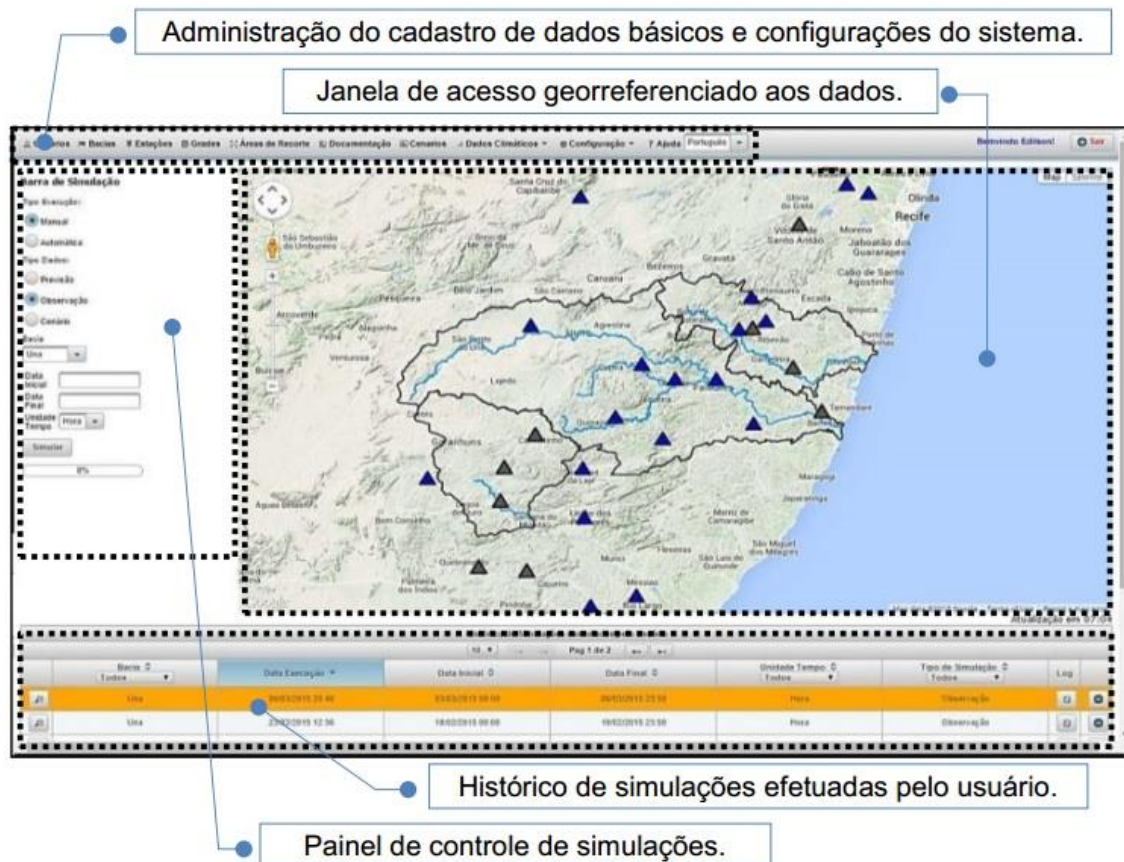


Fonte: Silva, (2014) [94]

A Figura 28 apresenta a tela inicial do sistema, onde são definidas quatro ferramentas distintas: uma barra de tarefas para gerenciamento de dados básicos e configurações do sistema, um painel de controle para definição do tipo de dado de entrada e período a ser simulado, um ambiente de informações geográficas para visualização e seleção de estações automáticas, seções transversais dos modelos e pontos da grade de previsão dos satélites, e por fim um ambiente com histórico de simulações realizadas, permitindo assim comparar cenários.

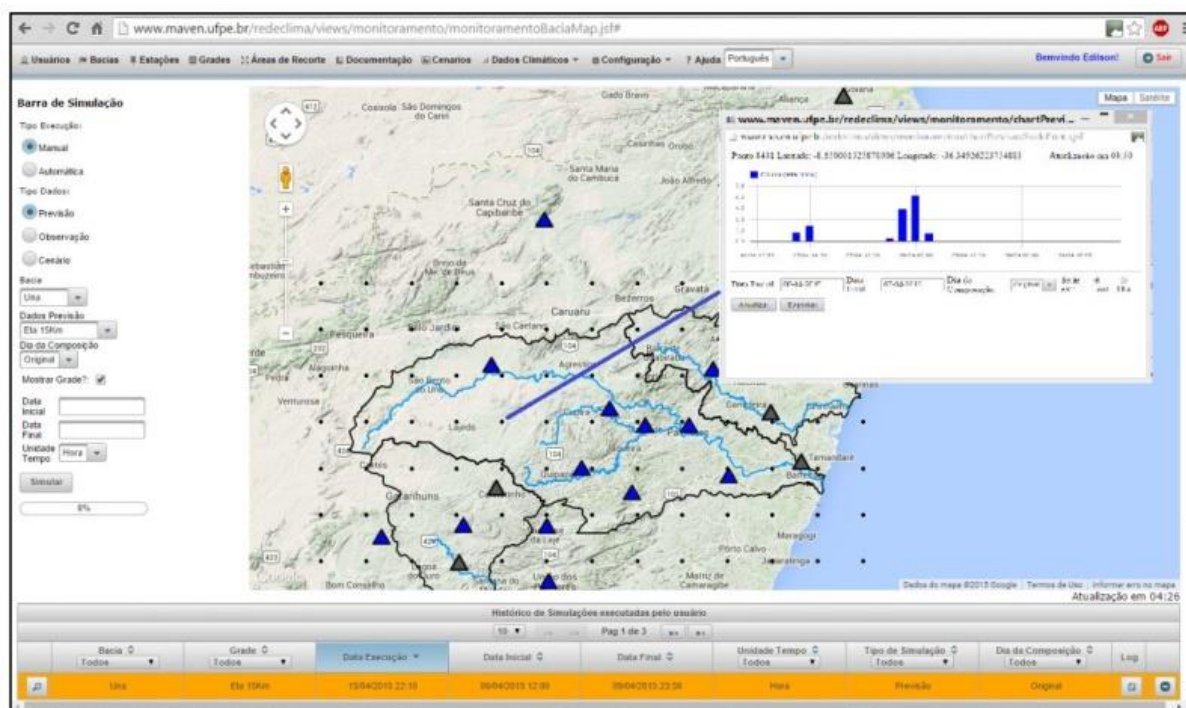
A Figura 29 mostra pontos da grade e previsão de satélites, onde para cada ponto é possível identificar quantitativamente a chuva prevista. Os pontos da grade contêm dados de precipitação prevista a partir de seis fontes de dados: (1) Satélite Hydroestimator; (2) Satélite TRMM; (3) Satélite CMORPH; (4) Modelo de Previsão ETA; (5) Modelo de Previsão BRAMS; e (6) Modelo de Previsão WRF. A Figura 30 mostra séries de precipitação, nível e vazão dos rios nos pontos de estações automáticas da ANA, facilitando o monitoramento de informações em tempo real.

Figura 28 – Tela principal de funcionalidades do Sistema MAVEN.



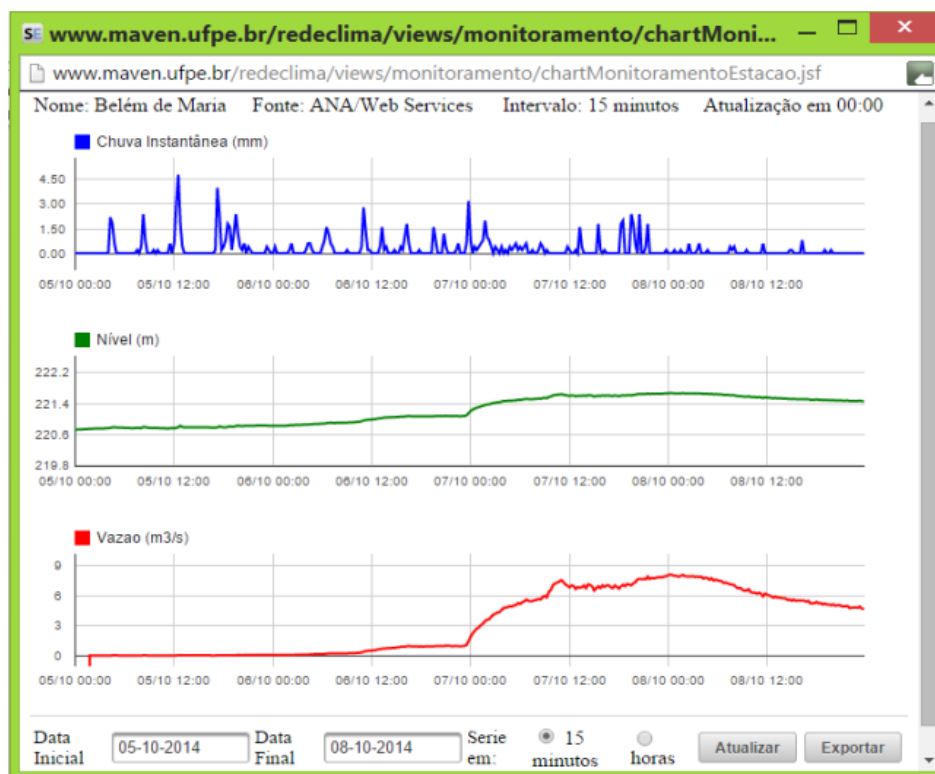
Fonte: Silva, (2014) [94]

Figura 29 – Pontos da grade de previsão de satélites e gráficos de precipitação.



Fonte: Silva, (2014) [94]

Figura 30 – Gráficos de dados de chuva, nível e vazão de rios obtidos da ANA.



Fonte: Silva, (2014) [94]

O conjunto de ferramentas integradas no MAVEN, atualmente hospedado na infraestrutura da APAC, juntamente com o monitoramento meteorológico realizado na Sala de Situação, compõem os principais recursos disponíveis no Estado de Pernambuco para previsão, monitoramento e gerenciamento de eventos meteorológicos extremos.

Uma vez feitas as integrações das ferramentas disponíveis, deve-se ter em mente que novos recursos surgem com grande rapidez. No caso do MAVEN, houve um desenvolvimento de modo que novos recursos e atualização sejam facilmente inseridas. Nesse contexto, considerando os temas aqui abordados, este trabalho busca melhorias e aperfeiçoamento das funcionalidades existentes de modo que as contribuições realizadas possam vir subsidiar a versão MAVEN 2.0.

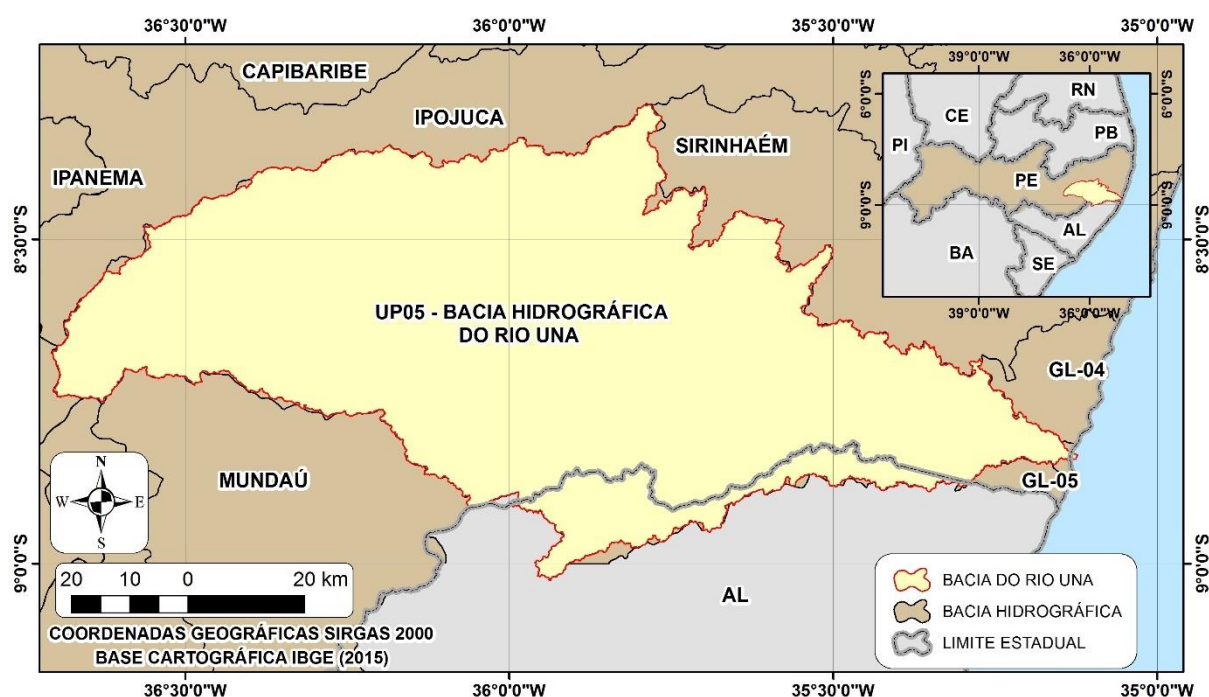
CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA PROPOSTA

3.1. Caracterização da bacia do rio Una

3.1.1. Localização e extensão da bacia hidrográfica do rio Una

Em Pernambuco, a Unidade de Planejamento Hídrico UP05 corresponde à bacia hidrográfica do rio Una e está inserida nas regiões de desenvolvimento do Agreste e Mata Sul do Estado de Pernambuco, entre as coordenadas $08^{\circ}17'14''$ e $09^{\circ}01'25''$ de latitude sul, e $35^{\circ}07'48''$ e $36^{\circ}42'10''$ de longitude oeste, conforme Figura 31. A área total da bacia é de 6 295,77 km², sendo que aproximadamente 450 km² estão inseridos no Estado de Alagoas (PERNAMBUCO, 1998 [101], 2006 [102]).

Figura 31 – Mapa de localização da bacia hidrográfica do rio Una.



Fonte: O autor, (2017)

A bacia do rio Una limita-se: ao norte, com as bacias dos rios Ipojuca (UP3) e Sirinhaém (UP4), e o grupo de bacias de pequenos rios litorâneos 4 – GL4 (UP17); ao sul, com a bacia do rio Mundaú (UP6), o Estado de Alagoas, o grupo de bacias de pequenos rios litorâneos 5 - GL5 (UP18) e o grupo de bacias de pequenos rios

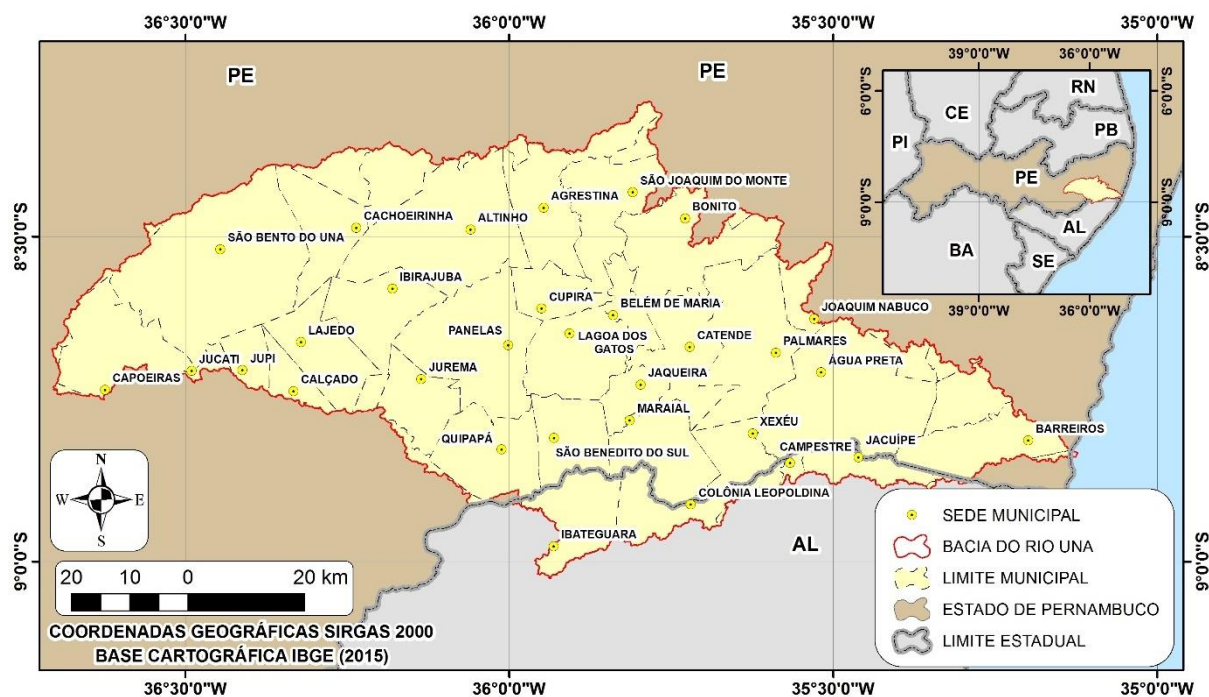
interiores 1 – GI1 (UP20); a leste, com o Oceano Atlântico, a bacia do rio Sirinhaém, o GL4 e GL5; e, a oeste, com as bacias dos rios Ipojuca e Ipanema (UP7) (PERNAMBUCO, 1998 [101], 2006 [102]).

3.1.2. Divisão político administrativa e aspectos socioeconômicos

Os limites territoriais brasileiros sofrem alterações e atualizações periódicas. Sabe-se que os limites territoriais de municípios e bacias hidrográficas de Pernambuco, sem exceção, sofrerão alterações quando forem atualizados com a base cartográfica do PE3D. No entanto em 2006, a Secretaria de Planejamento de Pernambuco, através da agência CONDEPE-FIDEM, publicou estudo onde foram identificados espaços territoriais de 42 municípios inseridos total ou parcialmente na área da bacia. Dentre estes apenas 31 possuem suas sedes em áreas da bacia (TABELA 4).

A Figura 32 ilustra a divisão territorial dos 42 municípios que compõem a bacia do rio Una e as 31 sedes municipais inseridas na bacia.

Figura 32 – Mapa da bacia do rio Una e limite dos municípios integrantes.



Fonte: O autor, (2017)

Tabela 4 – Mesorregiões, regiões de desenvolvimento e municípios drenados pela bacia do rio Una.

Mesorregião	Região de Desenvolvimento	Município	Área do município			
			Total km²	Na bacia km² %		
Mata Pernambucana	Mata Sul	Água Preta*	532,0	477,2	89,7	
		Barreiros*	229,8	195,1	84,9	
		Belém de Maria*	63,8	63,8	100,0	
		Catende*	160,9	160,9	100,0	
		Gameleira	260,8	33,1	12,7	
		Jaqueira*	90,9	90,9	100,0	
		Joaquim Nabuco*	115,6	67,9	58,7	
		Maraial*	217,3	217,3	100,0	
		Palmares*	376,2	376,2	100,0	
		Quipapá*	225,6	225,6	100,0	
		Rio Formoso	235,0	15,7	6,7	
		São Benedito do Sul*	209,3	209,3	100,0	
		S. J. da Coroa Grande	75,0	18,7	24,9	
		Tamandaré	205,0	92,3	45,0	
		Xexéu*	116,5	116,5	100,0	
		Agrestina*	198,0	198,0	100,0	
		Agreste Central	Altinho*	432,5	447,2	98,8
	Barra de Guabiraba		118,1	5,0	4,2	
	Bonito*		392,9	284,1	72,3	
	Camocim de São Felix		50,9	13,6	26,7	
	Cupira*		104,2	104,2	100,0	
	Ibirajuba*		218,0	218,0	100,0	
	Lagoa dos Gatos*		189,2	189,2	100,0	
	Panelas*		369,6	369,6	100,0	
	S. Joaquim do Monte*		230,6	218,8	94,9	
	Agreste Pernambucano		Agreste Meridional	Caetés	324,2	25,0
		Calçado*		56,0	39,7	70,9
Canhotinho		423,0		36,4	8,6	
Jucati*		109,4		22,0	20,1	
Jupi*		151,2		86,5	57,2	
Jurema*		147,0		139,4	94,8	
Lajedo*		208,9		206,2	98,9	
Bezerras		545,7		63,8	11,7	
Cachoeirinha*		183,2		181,2	98,9	
Caruaru		932,0		11,1	1,2	
Pesqueira		1 036,0		17,6	1,7	
Sanharó		247,5		2,57	1,04	
São Bento do Una*		715,9		638,6	89,2	
São Caetano		373,9		105,4	28,2	
Tacaimbó		210,9		55,3	26,2	
Capoeiras*		344,3		235,1	73,5	
Venturosa		326,1		3,6	1,1	
Total			-	6 295,77	100,0	

*Município com a sede inserida na bacia hidrográfica do rio Una.

Fonte: Adaptado de Pernambuco, (2006) [102]

3.1.3. Hidrografia e uso da água

A nascente do rio Una está localizada na serra da Boa Vista, no município de Capoeiras, a uma altitude de aproximadamente 900 m e percorre uma extensão aproximada de 255 km até sua foz, no município de São José da Coroa Grande. A direção do seu curso em geral é no sentido oeste-leste e apresenta-se intermitente até aproximadamente a cidade de Altinho, a partir de onde torna-se perene (PERNAMBUCO, 1998 [101], 2006 [102]).

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. Na margem esquerda destacam-se: riacho Gomes, riacho Gravatá, riacho Exú, rio Mentiroso, rio Maracujá, rio Camevô, rio Preto, rio Camocim-Mirim e rio José da Costa (PERNAMBUCO, 2006 [102]).

Em Pernambuco, o uso da água é outorgado pela APAC, que atualmente monitora os reservatórios com capacidade acima de 1 000 000 m³. O monitoramento é feito por meio de PCD's que transmitem remotamente informações como precipitação e nível de acumulação. Os reservatórios existentes, construídos até 2016, podem ser vistos na Tabela 5 e os seus usos principais estão associados ao abastecimento humano, com presente utilização na agricultura irrigada nas proximidades das áreas inundadas.

Tabela 5 – Reservatórios existentes na bacia do rio Una até 2016.

Reservatório	Município	Capacidade (m ³)	Finalidade
Prata	Bonito	42 147 000	Abastecimento
Gurjão	Capoeiras	4 700 000	Abastecimento/Irrigação
Poço da Areia	Camocim de S. Félix	2 363 324	Abastecimento/Irrigação
Caiana	São Joaq. do Monte	1 361 340	Abastecimento
Brejo do Buraco	São Caetano	1 070 347	Abastecimento
Cantinho	Altinho	831 376	Abastecimento
Sítio Barragem	Lajedo	735 000	Abastecimento/Irrigação
Capoeira do Pinto	São Bento do Una	625 900	Irrigação
Santa Rita	Calçado	579 000	Abastecimento
Capoeiras	Capoeiras	500 000	Abastecimento

Fonte: Adaptado Pernambuco, (2006) [102]

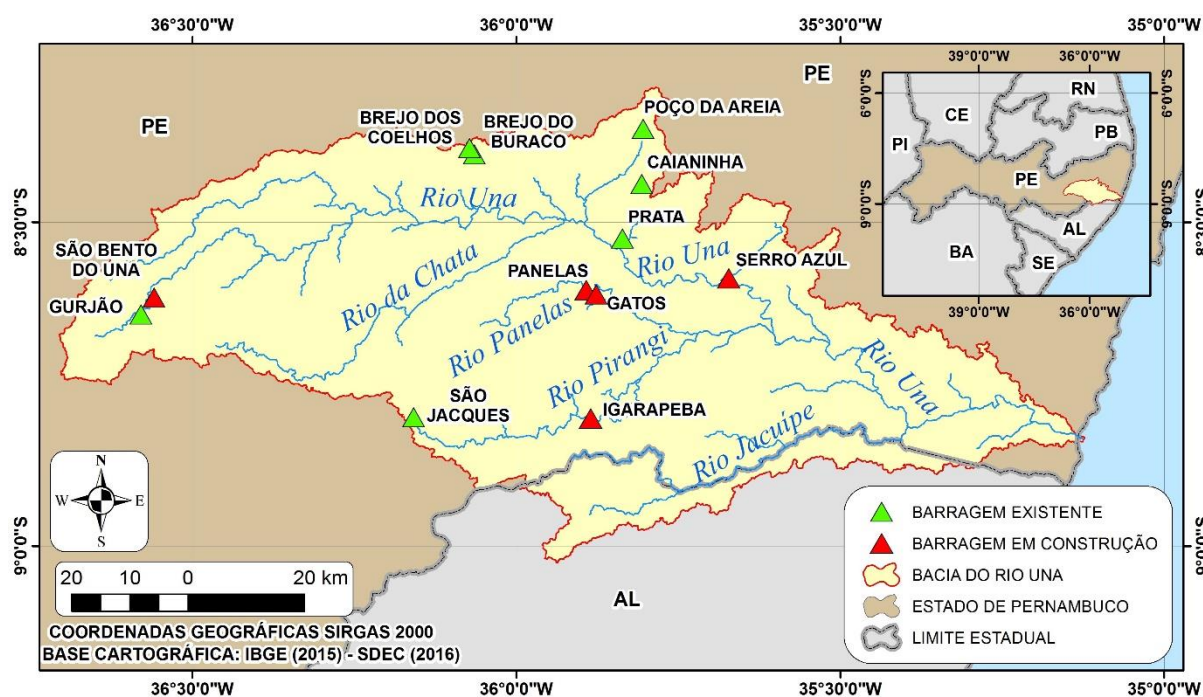
Após as cheias de 2010 e 2011 foram iniciadas as obras para construção de quatro barragens cuja finalidade principal é o controle de cheias, embora atualmente já existam obras de grande relevância associadas ao abastecimento humano. Mais recentemente, em 2014, foi dado início à elaboração do projeto básico para construção da barragem São Bento do Una, localizada no município de São Bento do Una, sendo esta exclusiva para abastecimento humano. Essa obra aguarda início de construção. Na Tabela 6 é apresentada a capacidade e o município em que cada barragem em construção é localizada. Na Figura 33 é apresentado mapa da bacia do rio Una com principais rios, reservatórios existentes e em construção.

Tabela 6 – Reservatórios em construção na bacia do rio Una.

Reservatório	Município	Capacidade (m³)	Finalidade
Gatos	Lagoa dos Gatos	6 300 000	Abast. / Controle de cheias
Igarapeba	São Benedito do Sul	42 500 000	Abast. / Controle de cheias
Panelas	Cupira	17 000 000	Abast. / Controle de cheias
São Bento do Una	São Bento do Una	17 750 000	Abastecimento
Serro Azul	Palmares	303 000 000	Abast. / Controle de cheias

Fonte: Adaptado de Pernambuco, (2011) [42].

Figura 33 – Mapa de hidrografia simplificada da bacia do rio Una e principais barragens.



Fonte: O autor, (2017)

3.1.4. Climatologia e precipitações

O clima da região da bacia do rio Una é quente, tropical chuvoso e de monção, com temperatura média de 24 °C e umidade relativa média de 80%, sendo maior nos meses de maio e junho e menor no período de outubro a dezembro. (PERNAMBUCO, 1998 [101], 2006 [102]). Entende-se por clima de monção a situação climática onde as massas de ar podem se mover do interior do continente para a costa, monção continental, ou da costa para o continente, monção marítima (FARIA, 2006) [103].

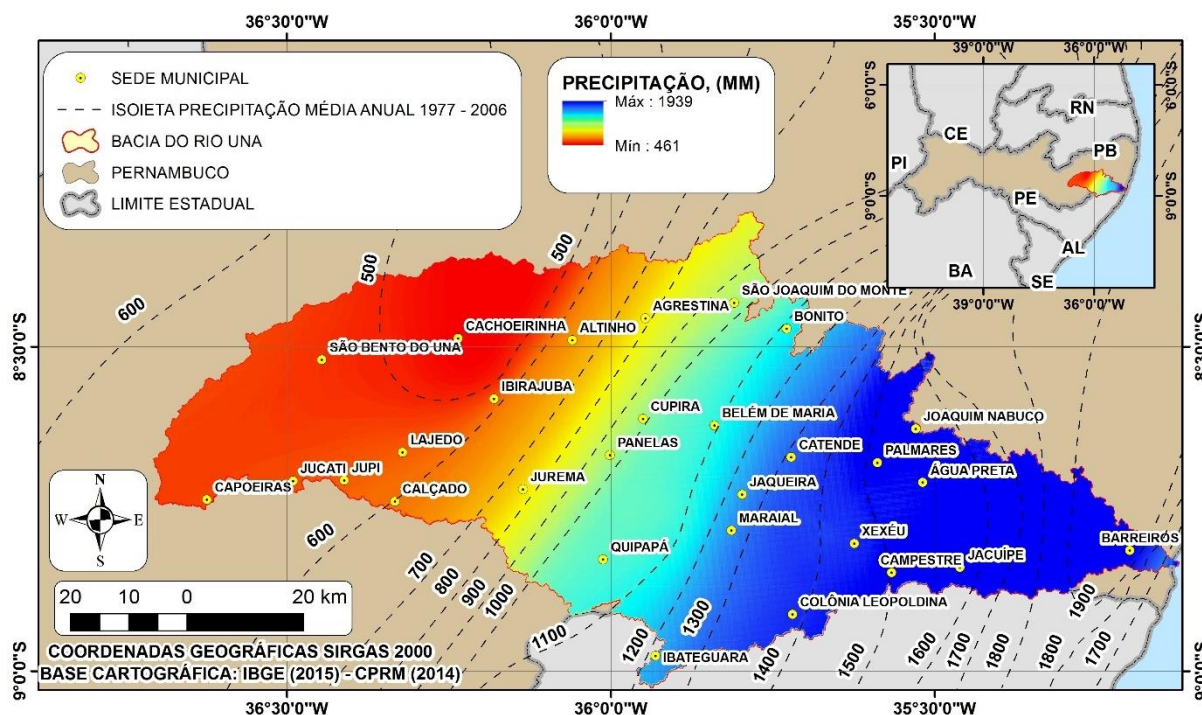
Registra-se uma insolação média anual de 2.800 h, sendo maior no período de novembro a janeiro e menor de maio a julho (PERNAMBUCO, 1998 [101], 2006 [102]).

No período de janeiro a setembro predominam os ventos que sopram de sudeste e de outubro a dezembro os ventos que sopram de nordeste, sendo a velocidade maior que 0,6 m/s no período de junho a agosto e menor que 0,5m/s no entre março a maio (PERNAMBUCO, 1998 [101], 2006 [102]).

O balanço hídrico é positivo, tendo como referência a precipitação média de 1.800 mm/ano, sendo maior nos meses de junho e julho e menor nos meses de novembro e dezembro, enquanto que a evaporação média é de 1.025mm/ano, sendo maior no período de outubro a janeiro e menor nos meses de maio e junho (PERNAMBUCO, 1998 [101], 2006 [102]).

Embora em termos de médias o balanço hídrico da bacia do Una seja positivo, cabe salientar que existem duas regiões climáticas distintas. A porção da bacia inserida na região Agreste possui predominância de clima semiárido, onde a precipitação média anual varia de 450 a 850 mm/ano. Já a porção inserida na Zona da Mata possui clima tropical úmido e a precipitação média anual pode chegar a 2.200 mm/ano, conforme indicações da Figura 34.

Figura 34 – Precipitações médias anuais entre 1977 e 2006 na bacia do rio Una.



Fonte: O autor, (2017)

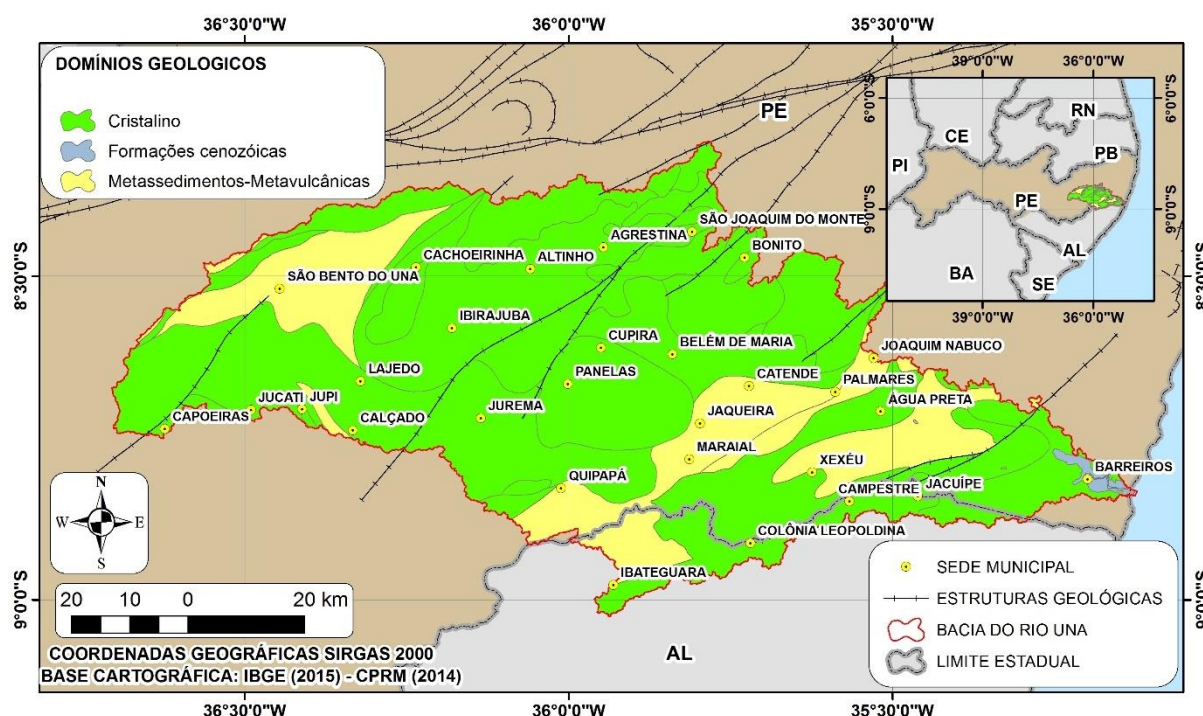
3.1.5. Geologia e relevo

Quanto aos aspectos geológicos, a bacia do rio Una é representada quase que em sua totalidade por rochas cristalinas e cristalofilianas do Pré-Cambriano Indiviso. Como efeito, 97,4% dessa área é constituída pelo Complexo Migmatítico-Granitóide - pCmi com participação aproximadamente igualitária entre os migmatitos e os granitos (PERNAMBUCO, 1998 [101], 2006 [102]).

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. Já os granitos associados a granodioritos dominam no baixo curso em Barreiros e no médio curso de Jurema, Lagoa dos Gatos a Bonito; isolados como corpos graníticos, ocorrem ainda a oeste de Lajedo e Jupi e ao sul de Belo Jardim (PERNAMBUCO, 1998 [101], 2006 [102]).

Além da forte presença de rochas cristalinas, também existem áreas com rochas de formação sedimentar em 35,62 km², correspondentes a apenas 2,6% da bacia. Esta área 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. A visualização das formações geológicas citadas pode ser vista na Figura 35 (PERNAMBUCO, 1998 [101], 2006 [102]).

Figura 35 – Mapa de domínios geológicos da bacia do rio Una.

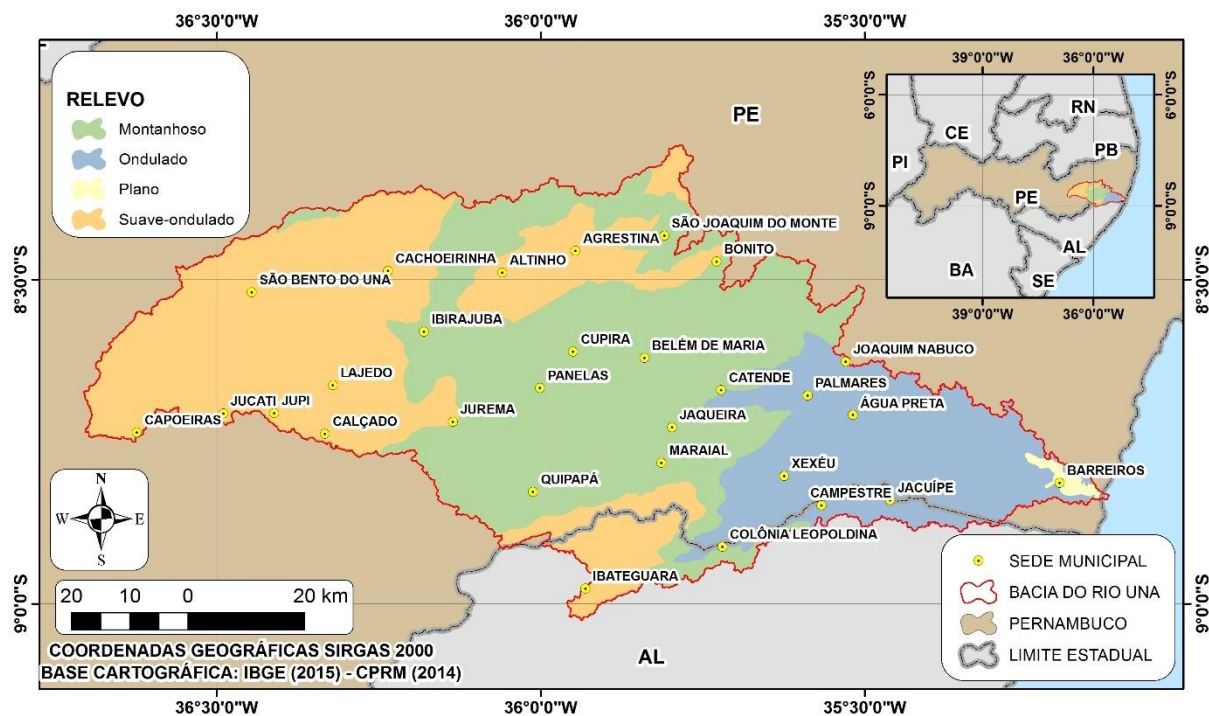


Fonte: O autor, (2017)

A região oriental da unidade hídrica apresenta formas de relevo bem distintas: planície (com cotas altimétricas inferiores a 100m), correspondente à faixa costeira e outra formada por um conjunto de morros e colinas que se estendem até às proximidades do planalto da Borborema, no espaço territorial dos municípios de Maraial, Catende e Palmares (as altitudes chegam a até 300 m). A partir deste ponto na parte ocidental da bacia (sobre o planalto da Borborema), localizam-se superfícies com altitudes variando entre 400 e 700 m. As áreas com cotas altimétricas mais elevadas, variando entre 800 e 1.000 m, estão situadas na porção oeste, em áreas dos seguintes municípios: Capoeiras, Pesqueira e Jupi (PERNAMBUCO, 1998 [101], 2006 [102]).

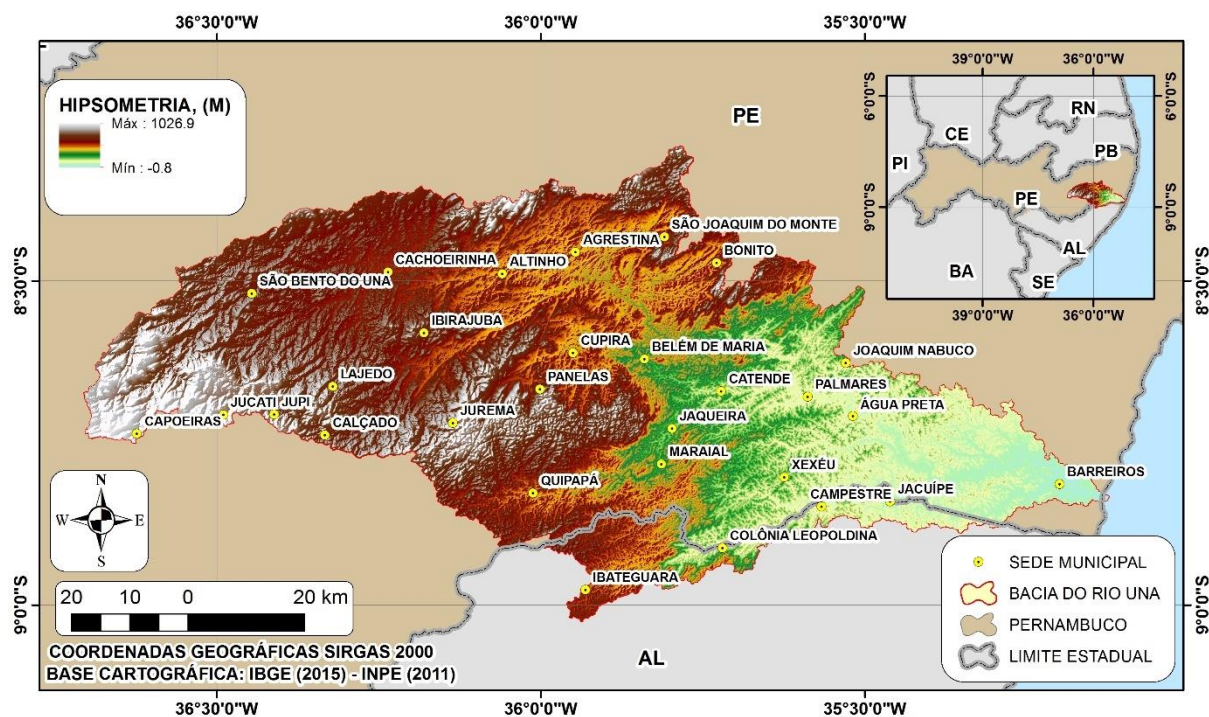
Nas Figuras 36 e 37 podem ser vistos os mapas de relevo e hipsometria da bacia do rio Una.

Figura 36 – Mapa de relevo da bacia do rio Una.



Fonte: O autor, (2017)

Figura 37 – Mapa hipsométrico da bacia do rio Una.



Fonte: O autor, (2017)

3.1.6. Solos

Na bacia do Una existe grande diversidade de solos, destacando-se dois contextos diferenciados: solos do cristalino e solos da faixa sedimentar litorânea. Os solos do cristalino, dentre os quais ocorrem Planossolos, Regossolos, Vertissolos e Solos Litólicos, situam-se nos dois terços superiores da bacia, onde domina um ambiente semiárido, enquanto que, a faixa sedimentar litorânea caracterizada pela presença de Podzólicos Distróficos, Latossolos Distróficos e Areias Quartzosas Marinhas representa a porção mais chuvosa (PERNAMBUCO, 1998) [101].

Os Planossolos Solódicos são solos rasos, de baixa permeabilidade, que frequentemente apresentam excesso de água no período chuvoso e extremo ressecamento no período seco. Têm relevo plano e suavemente ondulado e salienta-se que eles representam grandes áreas ao longo dos principais rios na bacia (PERNAMBUCO, 2006) [102].

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 (PERNAMBUCO, 2006) [102].

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 (PERNAMBUCO, 2006) [102].

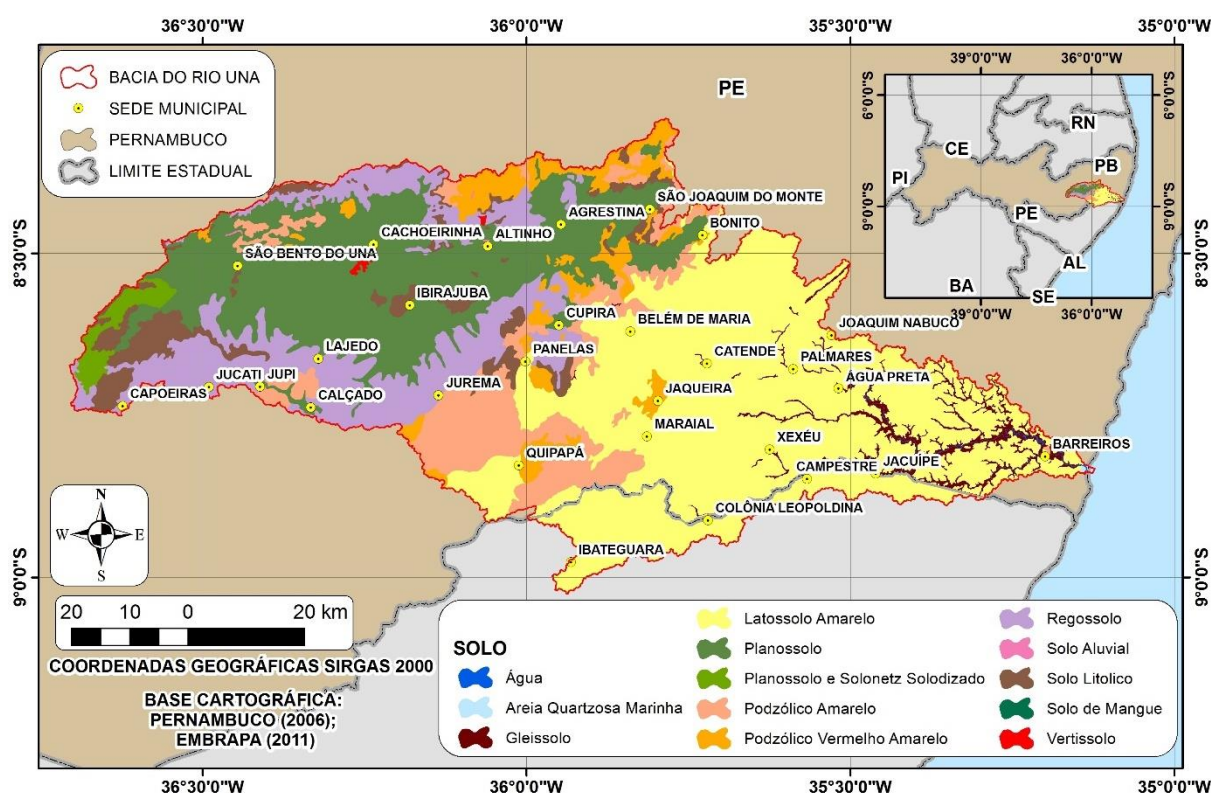
Os Solos Litólicos são muito pouco desenvolvidos e fortemente sujeitos à erosão face ao relevo forte ondulado e montanhoso que apresentam. Têm baixa capacidade de retenção hídrica e elevado poder de escoamento superficial quando da ocorrência de chuvas (PERNAMBUCO, 2006) [102].

As Areias Quartzosas Marinhas Distróficas (AMd) são excessivamente arenosas e drenadas, muito ácidas e de baixa fertilidade natural. Ocorrem na bacia já na baixada

litorânea próximo à orla marítima. Por serem excessivamente drenadas, 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) [101].

Conforme Figura 38, na porção semiárida da bacia, já situada no 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. Cabe ainda registrar a maciça presença de Latossolos e Podzólicos originários do recobrimento Barreiras que cobre toda a porção litorânea da bacia (PERNAMBUCO, 1998) [102].

Figura 38 – Mapa de solos da bacia do rio Una.



Fonte: O autor, (2017)

3.1.7. Vegetação e uso do solo

Na porção ocidental da bacia do rio Una, localizada na região Agreste do Estado, observa-se a ocorrência da cobertura vegetal característica da região de clima semiárido. Conforme apresentado na Figura 39, na parte ocidental da bacia, correspondente à região Agreste, podem ser encontradas espécies xerófilas, algumas com espinhos, decíduas e grande presença de Cactáceas e Bromeliáceas (PERNAMBUCO, 1998 [101], 2006 [102]). A Figura 40 apresenta uma foto do leito do rio Una no município de São Bento do Una representando a região semiárida e a vegetação típica da caatinga às margens do rio, em um dos períodos mais secos já registrados.

A porção oriental da bacia, cuja maior parte se localiza na Zona da Mata, apresenta vegetação do tipo floresta perenifolia tropical atlântica, hoje já bastante degradada pela ação do homem para atender a exploração da cultura da cana-de-açúcar. Na Figura 41 é apresentada paisagem às margens do rio Pirangi que ilustra a vegetação predominante atualmente na Zona da Mata. Na área litorânea predomina a vegetação formada por mangues, restingas e coqueiros (PERNAMBUCO, 2006) [102].

Figura 39 - Mapa de vegetação da bacia do rio Una.



Fonte: O autor, (2017)

Figura 40 – Leito seco do rio Una em São Bento do Una e vegetação típica de Caatinga.



Foto: Vanessa Maranhão, Set/2013

Fonte: ITEP, 2015 [104]

Figura 41 – Leito do rio Pirangi em São Benedito do Sul e vegetação típica da Zona da Mata.



Foto: Marcondes Oliveira, em 16/10/2011

Fonte: ITEP, 2011 [105]

A classificação de uso e ocupação do solo quantifica as feições naturais e antrópicas de uma área. Em 1998, a Secretaria de Ciência Tecnologia e Meio ambiente, no contexto do “Plano Estadual de Recursos Hídricos – PERH” publicou classificação de uso e ocupação do solo para todas as bacias hidrográficas do Estado. Nessa classificação foram utilizadas imagens do satélite Landsat 5 TM, onde na Tabela 7 são apresentados os resultados obtidos para a bacia do Una.

Tabela 7 – Classificação de vegetação, uso e ocupação do solo para bacia do Una.

Classe	Área (km²)	Percentual (%)
Vegetação arbórea fechada	160,75	2,55
Açude	6,57	0,10
Solo exposto	878,17	13,96
Mangue	9,77	0,15
Oceano	0,79	0,01
Veg. arbustiva arbórea fechada	283,69	4,51
Veg. arbustiva arbórea aberta	5,62	0,08
Mata Atlântica	323,01	5,13
Antropismo	1427,92	22,70
Cana	2620,59	41,66
Área urbana	12,75	0,20
Uso não identificado:		
<i>Nuvem</i>	340,24	5,41
<i>Sombra</i>	223,03	3,54
TOTAL	6292,90	100,0

Fonte: Adaptado PERNAMBUCO, (1998) [101]

3.2. Dados hidrológicos

Os dados hidrológicos que serviram de base para todo o presente trabalho foram obtidos das informações publicadas pela Agência Nacional de Águas – ANA e Agência Pernambucana de Águas e Climas – APAC. Foi dada preferência pela obtenção dos dados disponíveis no endereço eletrônico da APAC, uma vez que, além dos postos disponibilizados no HIDROWEB e os postos operados pelo Estado, existe ferramenta que permite exportar os dados para formato de planilha, filtrando dados por datas e regiões de desenvolvimento do Estado.

Foram selecionados 47 postos que podem ser identificados através das informações da Tabela 5. Para cada posto foram utilizados os dados de precipitação diária acumulada entre os períodos de 01 de janeiro de 2000 até 31 de dezembro de 2014.

Tabela 8 – Postos pluviométricos utilizados na modelagem hidrológica.

Posto Pluviométrico	Código*	Coordenadas Geográficas		Órgão Responsável
		Longitude	Latitude	
Agrestina (IPA)	115	-35,9419	-8,4583	APAC / IPA
Água Preta (IPA)	80	-35,5219	-8,7089	APAC / IPA
Altinho (IPA)	116	-36,0597	-8,4906	APAC / IPA
Barra de Guabiraba (IPA)	459	-35,6667	-8,4167	APAC / IPA
Barreiros - PCD	314	-35,1936	-8,8236	ANA / CPRM
Barreiros (IPA)	106	-35,1903	-8,8125	APAC / IPA
Belém de Maria	530	-35,8406	-8,6222	APAC
Belo Jardim (IPA)	20	-36,4253	-8,3367	APAC / IPA
Bonito (Fazenda Vila Bela)	469	-35,7836	-8,4742	APAC
Bonito (IPA)	0	-35,8363	-8,5238	APAC / IPA
Cachoeirinha	125	-36,2372	-8,4806	APAC
Caetés (IPA)	286	-36,6211	-8,7728	APAC / IPA
Calçados (IPA)	279	-36,3344	-8,7400	APAC / IPA
Camocim de S. Félix (IPA)	282	-35,7417	-8,3175	APAC / IPA
Canhotinho (IPA)	53	-36,1936	-8,8825	APAC / IPA
Capoeiras (IPA)	287	-36,6267	-8,7342	APAC / IPA
Caruaru (EBAPE)	211	-35,9678	-8,2794	APAC/EPABE
Caruaru (CPRM)	835106	-36,0028	-8,2992	ANA / CPRM
Catende (Usina Grande)	284	-35,7167	-8,6667	APAC
Catende (IPA)	527	-35,7086	-8,6694	APAC / IPA
Cortês	103	-35,5144	-8,5028	APAC
Cupira (IPA)	118	-35,9511	-8,6039	APAC / IPA
Engenho Mato Grosso	835140	-35,3056	-8,6375	APAC
Ibirajuba (IPA)	119	-36,1778	-8,5828	APAC / IPA
Jacuípe (CPRM)	835139	-35,4480	-8,8420	ANA / CPRM
Jaqueira (IPA)	508	-35,7953	-8,7306	APAC / IPA
Joaquim Nabuco (IPA)	285	-35,4167	-8,6417	APAC / IPA
Jucati (IPA)	157	-36,4928	-8,7067	APAC / IPA
Jupi (IPA)	482	-36,4167	-8,7125	APAC / IPA
Jurema (IPA)	126	-36,1369	-8,7181	APAC / IPA
Lagoa dos Gatos (IPA)	79	-35,9050	-8,6567	APAC / IPA
Lajedo (IPA)	128	-36,3178	-8,6556	APAC / IPA
Maraial (IPA)	316	-35,8333	-8,8000	APAC / IPA
Palmares (IPA)	25	-35,5797	-8,6783	APAC / IPA
Palmares (CPRM)	835141	-35,5772	-8,6794	ANA / CPRM
Panelas (IPA)	121	-36,0078	-8,6633	APAC / IPA
Quipapá	525	-36,0119	-8,8269	APAC
Sanharó (IPA)	114	-36,5664	-8,3639	APAC / IPA
Sanharó (CPRM)	836043	-36,5603	-8,3656	ANA / CPRM

Posto Pluviométrico	Código*	Coordenadas Geográficas		Órgão Responsável
		Longitude	Latitude	
São Benedito do Sul (IPA)	188	-35,9389	-8,6689	APAC / IPA
São Bento do Una – PCD	486	-36,4600	-8,5281	ANA / CPRM
São Bento do Una (IPA)	21	-36,4594	-8,5272	APAC / IPA
São Caetano (IPA)	122	-36,1375	-8,3283	APAC / IPA
São J. da Coroa Grande	110	-35,1497	-8,8956	APAC
Tacaimbó (IPA)	438	-36,3050	-8,3167	APAC / IPA
Tamandaré (IPA)	510	-35,3153	-8,7653	APAC / IPA
Venturosa (IPA)	152	-36,8806	-8,5747	APAC / IPA

*Código proveniente da plataforma de obtenção dos dados, ANA/CPRM ou APAC.

Fonte: O autor, (2017)

Constatou-se que para alguns municípios existem postos com poucos anos de operação ou extintos e operados por diversas instituições como SUDENE, CPRM, HIDROMET, IPA, APAC, entre outras. Sendo assim, foi feita a análise de consistência para verificação de erros grosseiros em cada série e, nos municípios com mais de um posto, foi feita compilação de dados em uma série unificada utilizando-se da redundância de dados para eventual preenchimento de falhas. A série unificada foi utilizada para simplificar a inserção dos postos pluviométricos e o cálculo da chuva ponderada nas sub-bacias do modelo hidrológico.

Todos os postos fluviométricos são de responsabilidade da ANA, operados pela CPRM. Conforme a Tabela 9, foram utilizadas séries históricas de oito postos, destacando-se o fato de serem incluídos os dados dos postos Belém de Maria que não haviam sido utilizados na primeira versão do MAVEN.

Tabela 9 - Postos fluviométricos utilizados na modelagem hidrológica.

Posto Fluviométrico	Área Drenagem (Km²)	Código*	Coordenadas Geográficas		Órgão Responsável
			Longitude	Latitude	
Barreiros	6.564	39590000	-36.2331	-8.4839	ANA-CPRM
Belém de Maria	357	39541000	-35.9153	-8.4975	ANA-CPRM
Cachoeirinha	1.207	39530000	-35.8414	-8.6247	ANA-CPRM
Capivara	2.611	39540000	-35.7233	-8.6786	ANA-CPRM
Catende	736	39550000	-35.5769	-8.6794	ANA-CPRM
Eng. Florescente	180	39570000	-35.4897	-8.7478	ANA-CPRM
Jacuípe	756	39580000	-35.4469	-8.8411	ANA-CPRM
Palmares	4.919	39560000	-35.2050	-8.7992	ANA-CPRM

*Código proveniente da plataforma HIDROWEB da ANA

Fonte: O autor, (2017)

3.3. Dados cartográficos

A base de dados cartográficos utilizada consiste de Modelo de Digital do Terreno – MDT obtido através dos dados SRTM, refinados pelo INPE através do projeto TOPODATA. Estes dados foram utilizados por Ribeiro Neto, Cirilo & Dantas (2011) [38] na definição das sub-bacias hidrográficas para elaboração do modelo hidrológico HEC-HMS.

Os dados provenientes do recobrimento aerofotogramétrico e perfilamento a laser realizado em 2011 pelo instituto LACTEC [76], descritos no item 2.6 do Capítulo 2, foram utilizados para definição das seções transversais do modelo hidrodinâmico unidimensional HEC-RAS.

A base de dados disponibilizada mais recentemente através do programa PE-3D foi utilizada para prolongamento de algumas das seções transversais aos rios e simulação hidrodinâmica bidimensional, permitindo também ajustar a geometria da calha do rio Una no município de Palmares, onde foram realizados serviços de adequação da calha e dragagem.

Adicionalmente, foram utilizados dados vetoriais disponibilizados por diversas instituições como ANA, APAC, CPRM e IBGE. Estes dados serviram como base de orientação para localização de estações pluviométricas e fluviométricas, sedes municipais, rios, bacias hidrográficas e etc.

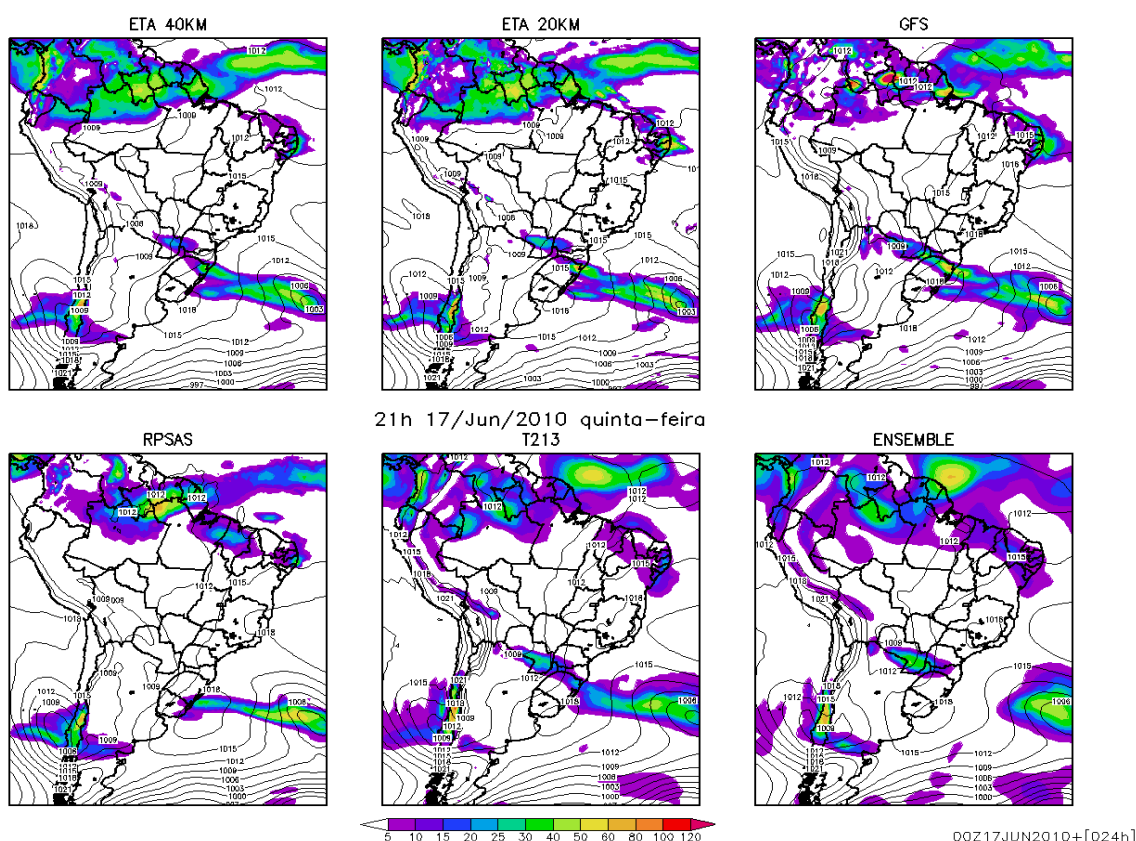
3.4. Análise comparativa entre dados de previsão meteorológica e precipitação medida em postos pluviométricos

Visando expandir as aplicações de dados numéricos de previsão meteorológica, foi realizada uma análise entre os dados de previsão e a precipitação que de fato ocorreu na bacia do rio Una. Segundo LAMEPE (2010) [22], foi emitido alerta ao Estado de Pernambuco sobre a ocorrência de evento de chuvas intensas para os dias 15, 16 e 17 de junho de 2010.

A nota técnica “Previsão do Tempo e Monitoramento das Chuvas em Pernambuco e as imagens de satélite (15, 16 e 17/06/2010)”, conforme a Figura 42, apresentou resultados de modelos de previsão numérica ETA (40 e 20 Km), GFS, RPSAS (*Regional Physical-space Analysis System*), T213 e ENSEMBLE de precipitação acumulada. Considerando os dados apresentados na referida nota técnica, foi solicitado ao INPE as simulações feitas para estas datas, o que permitiu a realização de duas análises.

Figura 42 – Simulação dos modelos de previsão numérica ETA (40 e 20 Km), GFS, RPSAS (*Regional Physical-space Analysis System*), T213 e ENSEMBLE de precipitação acumulada para 21h do dia 17 de Junho de 2010.

Precipitacao Acumulada para 21h 17/Jun/2010 quinta-feira



Fonte: LAMEPE, (2010) [22]

3.4.1. Análise dos dados de previsão numérica do modelo ETA 40 km

Esta análise foi realizada a partir dos dados gerados através do modelo ETA 40 km, sendo fornecido pelo INPE as simulações dos dias 16 e 17 de junho de 2010. Para

cada simulação diária do ETA 40 km é feito um prognóstico para 7 dias, sendo geradas matrizes de dados com resolução espacial de 40 km, apresentadas em arquivos nas extensões “.gmp” compostos de 230 camadas de informações.

Arquivos na extensão “.gmp” podem ser visualizados como imagem através de programas computacionais de geoprocessamento. Para realizar operações matemáticas com este tipo de dado, foram utilizadas ferramentas de álgebra de mapas.

Neste trabalho foi analisada apenas a informação de precipitação total, obtida a partir da camada 09, apresentada em kg/m²/dia, para cada 6h. Para se chegar a unidade usual de precipitação acumulada diária, foi necessário somar os dados gerados para 0h, 6h, 12h e 24h, multiplicando-se o resultado final por 1.000.

A etapa de análise dos dados buscou observar combinações de períodos sequencias de 5 dias que resultassem a maior precipitação acumulada. Os resultados obtidos foram comparados com a espacialização dos dados de chuva medidos nos postos pluviométricos.

3.4.2. Análise dos dados de previsão numérica do modelo APAC 9 km

Além dos modelos numéricos de previsão simulados diariamente pelo INPE, a Agência Pernambucana de Águas e Clima – APAC realiza simulações mais detalhadas em escala regional. A partir dos dados de mesoescala do modelo *Weather Research and Forecasting* – WRF, a APAC configura um modelo de previsão que fornece uma matriz de dados com resolução espacial de 9 km e resolução temporal a cada hora.

Cada ponto da grade de resultados do modelo de previsão possui diversas outras informações meteorológicas. No entanto, foi utilizada apenas a informação de interesse, no caso a precipitação prevista. O modelo de previsão WRF, configurado pela APAC e a seguir sendo referido como APAC 9 km, fornece os dados de precipitação horária acumulada para 7 dias a frente, sendo utilizados os dados para 5 dias, mantendo assim o mesmo período das análises do ETA 40 km.

Desse modo, foram encontrados os valores de precipitação horária subtraindo-se cada valor acumulado pelo valor previsto para a hora seguinte. Em seguida foram somadas as precipitações para as 24h de cada dia e feita a espacialização dos dados através do método do vizinho mais próximo.

3.4.3. Análise da chuva medida em postos pluviométricos

Na análise da chuva medida em postos pluviométricos foram utilizados todos os postos pluviométricos apresentados na Tabela 8 que possuíam dados entre os dias 16 e 20 de junho de 2010, sendo estes os dias em que ocorreram as maiores precipitações no evento extremo ocorrido em 2010.

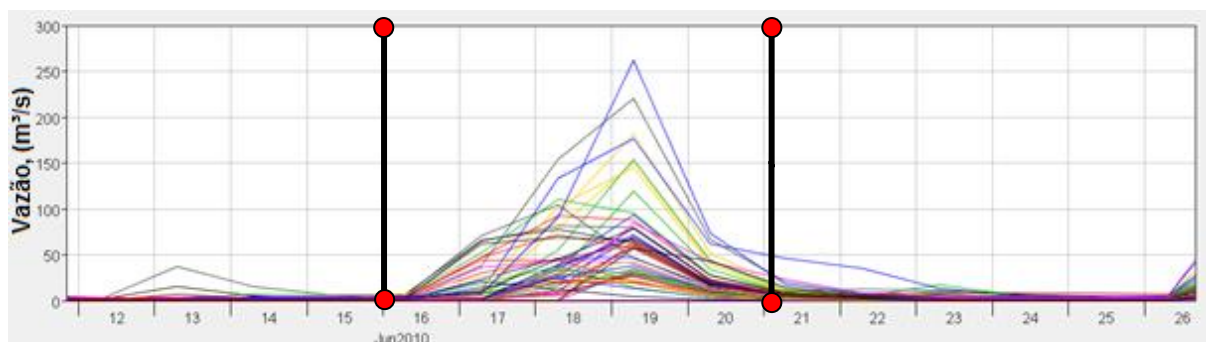
Os dados destes três dias foram somados e agrupados em tabela com nome do posto, coordenadas e chuva acumulado em três dias. Em seguida foi realizada a espacialização dos dados através de ferramentas de interpolação geoespacial. Neste caso foi utilizado o método do vizinho mais próximo, "*Natural Neighborhood*".

3.5. Aperfeiçoamento do modelo hidrológico da bacia do rio Una

O modelo hidrológico utilizado no sistema MAVEN foi desenvolvido incorporando a ferramenta HEC-HMS 3.5. Toda geometria do modelo foi mantida, sendo utilizada a discretização da bacia apresentada na Figura 43. Para este trabalho foram feitas investigações e alterações nas séries das estações hidrológicas para estendê-las até 2014, no método de cálculo da vazão de base e nos coeficientes de calibração do modelo.

As informações apresentadas a seguir possuem ênfase nos métodos utilizados que vieram a alterar o sistema existente. Detalhes metodológicos do desenvolvimento do modelo hidrológico podem ser vistos em Ribeiro Neto, Cirilo & Dantas (2011) [38] e Dantas (2012) [39].

Figura 44 – Vazões geradas pelas sub-bacias do modelo HEC-HMS da bacia do rio Una para o evento de chuva de 2010.



Fonte: O autor, (2017)

Uma vez definido um período, calculou-se a vazão média de cada elemento e dividindo-se o resultado pela respectiva área obteve-se a vazão específica de cada sub-bacia, conforme mostrado na Equação 1. Foi adicionado um campo de atributo ao arquivo vetorial das sub-bacias e feita a representação gráfica da vazão específica em escala de cores, permitindo assim a visualização da distribuição de vazão e uniformidade do modelo HEC-HMS.

$$q_{esp} = \frac{\overline{Q_{sub}}}{A_{sub}} \quad \text{Eq. 1}$$

Onde:

q_{esp} - vazão específica de uma sub-bacia, ($\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$)

$\overline{Q_{sub}}$ - vazão média no período observado, (m^3/s)

A - área da sub-bacia, (km^2)

3.5.2. Configuração dos métodos de cálculo do balanço hídrico no modelo hidrológico HEC-HMS

O modelo hidrológico HEC-HMS possui diversas metodologias de cálculo de vazões. As configurações iniciais do modelo foram feitas partindo-se dos parâmetros já utilizados no Sistema MAVEN. Para cada elemento do balanço hídrico calculado no modelo hidrológico foram utilizados os seguintes métodos de cálculo:

3.3.3.1. Interceptação da vegetação – *Canopy*

Os parâmetros do modelo associados à influência da vegetação na geração dos deflúvios são definidos através da opção “*Canopy*”, relacionada à cobertura vegetal. Neste componente são considerados os efeitos da interceptação das copas das árvores e a fração da precipitação interceptada que chega ao solo ou é perdida por evapotranspiração (USACE, 2013) [106].

O método de interceptação utilizado foi o “*Simple Canopy*”. Este método considera que toda precipitação é interceptada até a capacidade de retenção por interceptação ser completamente preenchida.

3.3.3.2. Preenchimento da superfície – *Surface*

O componente do modelo hidrológico HEC-HMS que considera as perdas relacionadas ao enchimento de pequenos pontos de acumulação de água como lagos, buracos e depressões é o definido na opção “*Surface*”.

O método utilizado neste trabalho foi o “*Simple Surface*”. Este método considera que toda a precipitação que chega ao solo é armazenada até que a capacidade de armazenamento seja preenchida. O escoamento superficial só ocorrerá quando a precipitação for suficiente para preencher toda a capacidade de armazenamento da superfície (USACE, 2013) [106].

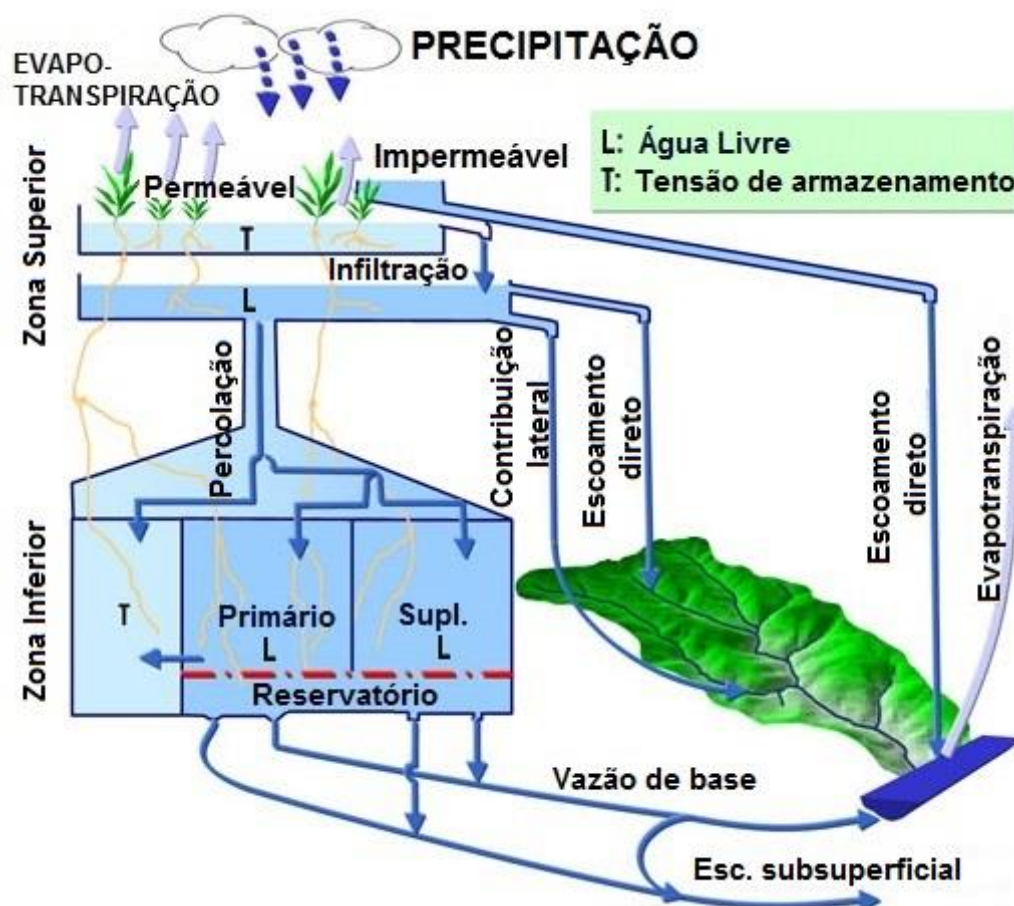
O volume acumulado na superfície irá infiltrar continuamente, havendo escoamento apenas quando a intensidade de precipitação for maior que a taxa de infiltração no solo (USACE, 2013) [106].

3.3.3.3. Parâmetros de perdas – *Loss*

A definição do método de cálculo das perdas de água no solo é de grande importância para o resultado das simulações hidrológicas. Um dos métodos mais utilizados é o

“*Soil Moisture Accounting – SMA*”. O SMA utilizada três camadas para representar a dinâmica do movimento de água no solo, conforme esquematizado na Figura 45.

Figura 45 – Balanço hídrico esquemático utilizado na metodologia “*Soil Moisture Accounting – SMA*”.



Fonte: Adaptado de CHRS, (2016)

No método SMA, as condições iniciais de umidade no solo (*Soil*) e armazenamento na camada subterrânea (*Groundwater 1 e 2*) devem ser informadas em percentual. A taxa de infiltração máxima (*Maximum Infiltration*) também é definida como sendo o limite superior da infiltração da água armazenada na superfície (*Simple Surface*). Nas áreas da bacia definidas como impermeáveis (*Impervious*), a precipitação irá gerar escoamento superficial direto (USACE, 2013) [106].

O armazenamento do solo (*Soil Storage*) representa a quantidade total de precipitação retida na camada de solo. A tensão de armazenamento (*Tension Storage*) está relacionada com o armazenamento do solo e representa a quantidade de água

armazenada no solo que não infiltra sob os efeitos da gravidade. O campo percolação (*Percolation*) representa a taxa de percolação máxima da camada superior de solo para a camada inferior do armazenamento subterrâneo. A percolação só irá ocorrer de uma camada para a outra quando o armazenamento do solo exceder a tensão de armazenamento (USACE, 2013) [106].

A camada inferior do método SMA está relacionada às perdas referentes ao armazenamento de água no subsolo. No HEC-HMS, este armazenamento pode ser feito em dois reservatórios (*Groundwater 1 e 2*) e a capacidade de cada um destes reservatórios deve ser definida em milímetros de precipitação. As taxas de percolação dos reservatórios subterrâneos 1 e 2 (*GW Percolation 1 e 2*) é representada em mm/h e definem respectivamente a taxa de transferência da precipitação armazenada no reservatório 1 para o reservatório 2 e do reservatório 2 para fora do sistema do balanço hídrico. Os termos “*GW 1 e GW 2 Coefficient*” determinam o tempo até que a precipitação armazenada nos reservatórios 1 e 2 tornem-se contribuição lateral de vazão de base (USACE, 2013) [106].

3.3.3.4. Método de transformação chuva-vazão – *Transform*

Uma vez feito o balanço hídrico, o modelo hidrológico transforma o excedente de precipitação em vazão. Entre os métodos disponíveis adotou-se o *Soil Conservation Service - SCS*, que é baseado no conceito de hidrograma unitário. Para cada milímetro de precipitação calcula-se a vazão através da Equação 2.

$$q_p = \frac{C \times A}{t_p} \quad \text{Eq. 2}$$

Onde:

q_p - vazão de pico, (m³/s)

C - constante de conversão de unidades, (2,08 no SI)

A - área da bacia, (km²)

t_p - tempo de pico, (h)

Sendo o tempo de crescimento (t_p), definido como o intervalo entre o centro de gravidade do hietograma e o instante que a vazão atinge seu valor máximo, correspondente a vazão de pico. O tempo de pico pode ser definido através da Equação 3.

$$t_p = \frac{t_r}{2} + 0,6t_c \quad \text{Eq. 3}$$

Onde:

t_p - tempo de pico, (h)

t_r - tempo de duração da chuva, (h)

t_c - tempo de concentração, (h)

Considerando que a área da sub-bacia já é conhecida na fase de pré-processamento do modelo hidrológico, o único termo a ser definido antes de calcular a vazão através do método SCS é o tempo de concentração. Para calcular o tempo de concentração de cada sub-bacia foi utilizada a equação de Kirpich, conforme descrito na Equação 4.

$$t_c = 57 \left(\frac{L^3}{H} \right)^{0,385} \quad \text{Eq. 4}$$

Onde:

t_c - tempo de concentração, (min)

L - comprimento do rio através do caminho mais longo, (km)

H - diferença entre cotas do ponto mais distante e o exutório de uma sub-bacia, (m/m)

O comprimento do caminho mais longo de cada sub-bacia, e suas respectivas cotas do deste ponto mais distante e do exutório foram calculadas através de ferramentas de geoprocessamento. O método SCS do modelo HEC-HMS requer apenas como

dado de entrada o tempo correspondente a 60% do tempo de concentração, definido como *LagTime*.

3.3.3.5. Vazão de base – *Baseflow*

A vazão de base está associada ao fluxo de água mantido após o término dos eventos de chuva. Os modelos hidrológicos utilizados por Ribeiro Neto, Cirilo & Dantas (2011) [38]; Dantas, (2012) [39]; Almeida (2013) [21]; Silva (2015) [40] utilizam o método do reservatório linear (*linear reservoir*) como sendo o método de cálculo da vazão de base no modelo HEC-HMS.

Considerando que, na versão do MAVEN 1.0, o modelo HEC-HMS foi calibrado observando apenas eventos de grandes vazões e que o método do reservatório linear é mais complexo de ser ajustado, optou-se por utilizar o método de recessão (*recession*). Este método possui apenas dois parâmetros a serem ajustados por sub-bacia, a constante de recessão (*recession constant*) e ganho de vazão de base (*ratio*).

A constante de recessão define a duração de tempo em que a vazão de base armazenada nos reservatórios subterrâneos irá alimentar o fluxo do rio após um evento de chuva. O ganho de vazão de base (*ratio*) define quando a recessão de um hidrograma cessa e a vazão de base começa a alimentar o fluxo de água, logo este parâmetro define como será o amortecimento do hidrograma de um evento de cheia específico. Por exemplo, quando o parâmetro de ganho de vazão de base é definido como 0,2 se quer dizer que a vazão do rio será mantida apenas pela vazão de base quando a vazão de um evento for igual a 20% da sua vazão de pico (USACE, 2013) [106].

3.3.3.6. Propagação da vazão na bacia – *Routing*

Após o cálculo das vazões, de maneira independente para cada sub-bacia, o modelo hidrológico deve realizar a propagação de vazão ao longo dos canais dos rios. Com base nos princípios de conservação de massa e conservação de momento, o método *Muskingum-Cunge*, inserido na plataforma HEC-HMS realiza o cálculo da propagação

de onda de maneira simplificada, uma vez que o método mais preciso seria através dos modelos hidrodinâmicos que resolvem as equações de *Saint-Venant*. Registra-se, porém, que é prática usual na modelagem hidrológico-hidrodinâmica utilizar as equações de *Saint-Venant* somente nos trechos dos cursos d'água principais, simplificando o processo nas sub-bacias.

O método de *Muskingum-Cunge* aproxima o canal principal de uma sub-bacia por um prisma de seção e declividade constantes. Ao considerar que a onda de cheia se propaga ao longo do prisma, utilizam-se as Equação 5 e 6 para encontrar a vazão no exutório de cada sub-bacia.

$$K = \frac{\Delta x}{c} \quad \text{Eq. 5}$$

Onde:

K - tempo de propagação da onda no canal do rio, (s)

Δx - extensão do trecho do rio, (m)

c - celeridade de propagação da onda de cheia, (m/s)

$$X = \frac{1}{2} \times \left(1 - \frac{Q}{B \times c \times S \times \Delta x} \right) \quad \text{Eq. 6}$$

Onde:

X - fator de ponderação ($0 \leq X \leq 0,5$)

Q - vazão no exutório de cada sub-bacia, (m³/s)

B - largura média do canal do rio, (m)

c - celeridade de propagação da onda de cheia, (m/s)

S - declividade média do trecho, (m/m)

Δx - extensão do trecho do rio, (m)

Para simulação no HEC-HMS devem ser definidos os parâmetros de comprimento, declividade, coeficiente de Manning, formato do canal e largura da base. O

comprimento e a declividade são obtidos na fase de processamento da geometria do modelo hidrológico. A seção do canal foi definida como trapezoidal adotando uma largura média para a base de 10 m e uma declividade dos taludes 1:1 (H:V).

Os parâmetros fixos e valores dos parâmetros calibráveis utilizados na configuração final do modelo HEC-HMS são apresentados no Anexo I.

3.5.3. Verificação da precisão do modelo hidrológico

Uma vez que as características geométricas, os métodos de cálculo e os parâmetros iniciais do modelo hidrológico forem definidos, pode ser feita a simulação de um determinado período. Na simulação inicial deste trabalho foram utilizados os parâmetros definidos na versão do MAVEN 1.0 (RIBEIRO NETO, CIRILO & DANTAS, 2011 [38]; DANTAS, 2012 [39]; SILVA 2015 [40]), exceto para o método de vazão de base, uma vez que o mesmo foi alterado. Os parâmetros iniciais do método de recessão foram utilizados com base nos arquivos de exemplos disponibilizados através da instalação do HEC-HMS 4.0.

Usualmente, os parâmetros de calibração de um modelo hidrológico são ajustados para um evento específico e em seguida é feita a validação do modelo testando-se os mesmos parâmetros para simular outros eventos. Neste trabalho foi utilizado o período entre os dias 25 de janeiro a 11 de fevereiro de 2004 (18 dias) para calibração e os períodos entre os dias 16 de junho a 03 de julho de 2010 e 28 de abril a 11 de maio de 2011, ambos com 18 dias.

Para verificação da precisão dos dados de saída, foi utilizada a Equação 7 para o cálculo do coeficiente de Nash-Sutcliffe (NASH & SUTCLIFFE, 1970) [107]. Segundo Collischonn (2001) [90], o coeficiente de Nash-Sutcliffe é fortemente influenciado por erros nas vazões máximas, variando de $-\infty$ a 1, sendo considerado adequado e bom os resultados obtidos que possuem R^2 maior que 0,75 e aceitável quando os valores do R^2 estiverem entre 0,75 e 0,36.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{i,obs} - Q_{i,cal})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{i,obs} - \overline{Q_{obs}})^2} \quad \text{Eq. 7}$$

Onde:

R^2 - Coeficiente de Nash-Sutcliffe

$Q_{i,obs}$ - Vazão observada no tempo i, (m³/s)

$Q_{i,cal}$ - Vazão calculada pelo modelo no tempo i, (m³/s)

$\overline{Q_{obs}}$ - Vazão observada média no período simulado, (m³/s)

Deparando-se com a dificuldade de obter os resultados desejados para as etapas de calibração e validação, também foi realizada uma simulação contínua para um grande intervalo de tempo compreendido entre 01 de janeiro de 2004 até 31 de dezembro de 2014.

A partir da simulação contínua, foi observado o comportamento do modelo em situações que representassem períodos com chuvas de várias intensidades em cada sub-bacia. No período de 2004 a 2014 foram calculados os coeficientes de *Nash-Sutcliffe* para a série de vazões geradas em cada ano.

3.6. Modelagem hidrodinâmica unidimensional da bacia do rio Una

O Sistema MAVEN 1.0 possui um modelo hidrodinâmico desenvolvido sobre a plataforma do programa computacional HEC-RAS versão 4.1. Para as simulações hidrodinâmicas deste trabalho foi utilizado o HEC-RAS 5.0.3 que se destaca pela opção de simulações bidimensionais do escoamento.

É natural que trabalhos de qualquer natureza venham a ter necessidade de atualizações. No entanto, para o caso do modelo hidrodinâmico do MAVEN 1.0, o que motivou a realização de ajustes no modelo hidrodinâmico foi a necessidade de incluir no sistema o conjunto de barragens para controle de cheias que está sendo construído pelo Governo do Estado de Pernambuco.

O regime de escoamento não-permanente permite realizar a propagação da vazão de maneira a representar com mais detalhes a geometria dos rios e cursos d'água. Esse detalhamento é possível a partir das Equações de *Saint-Venant*. Tais equações foram desenvolvidas a partir dos princípios de conservação de massa e energia, conforme descrito, respectivamente, nas Equações 8 e 9.

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q_L \quad \text{Eq. 8}$$

$$\underbrace{\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\beta Q^2}{A} \right)}_{\text{Energia Cinética}} + \underbrace{gA \frac{\partial h}{\partial x}}_{\text{Energia de Pressão}} + \underbrace{gA(S_f - S_0)}_{\text{Energia Potencial Gravitacional}} = 0 \quad \text{Eq. 9}$$

Onde:

Q - vazão, (m³/s)

x - distância na direção do fluxo no canal, (m)

A - área da seção transversal, (m²)

t - tempo, (s)

q_L - contribuição de vazão lateral, (m³/s)

β - coeficiente de distribuição de velocidade

g - aceleração da gravidade, (m²/s)

h - altura da lâmina d'água, (m)

S_0 - declividade do leito do rio, (m/m)

S_f - inclinação da linha de energia (Equação de Manning), (m/m)

$$S_f = \frac{n^2 v |v|}{R^{4/3}} \quad \text{Eq. 10}$$

Onde:

n - coeficiente de rugosidade de Manning

v - velocidade, (m/s)

R - raio hidráulico, (m)

As Equações 8, 9 e 10 são válidas para o escoamento não-permanente unidimensional, ou seja, a altura da lâmina d'água e a velocidade só variam no sentido longitudinal do escoamento. As condições que permitem utilizá-las devem garantir os seguintes pressupostos:

- Para uma altura de lâmina d'água específica, a velocidade é uniforme na seção transversal do canal
- O eixo longitudinal do canal é aproximadamente uma linha reta
- A declividade do canal é suave e as acelerações verticais não são consideradas
- A distribuição de pressões é hidrostática, o fluido é incompressível e com densidade constante.

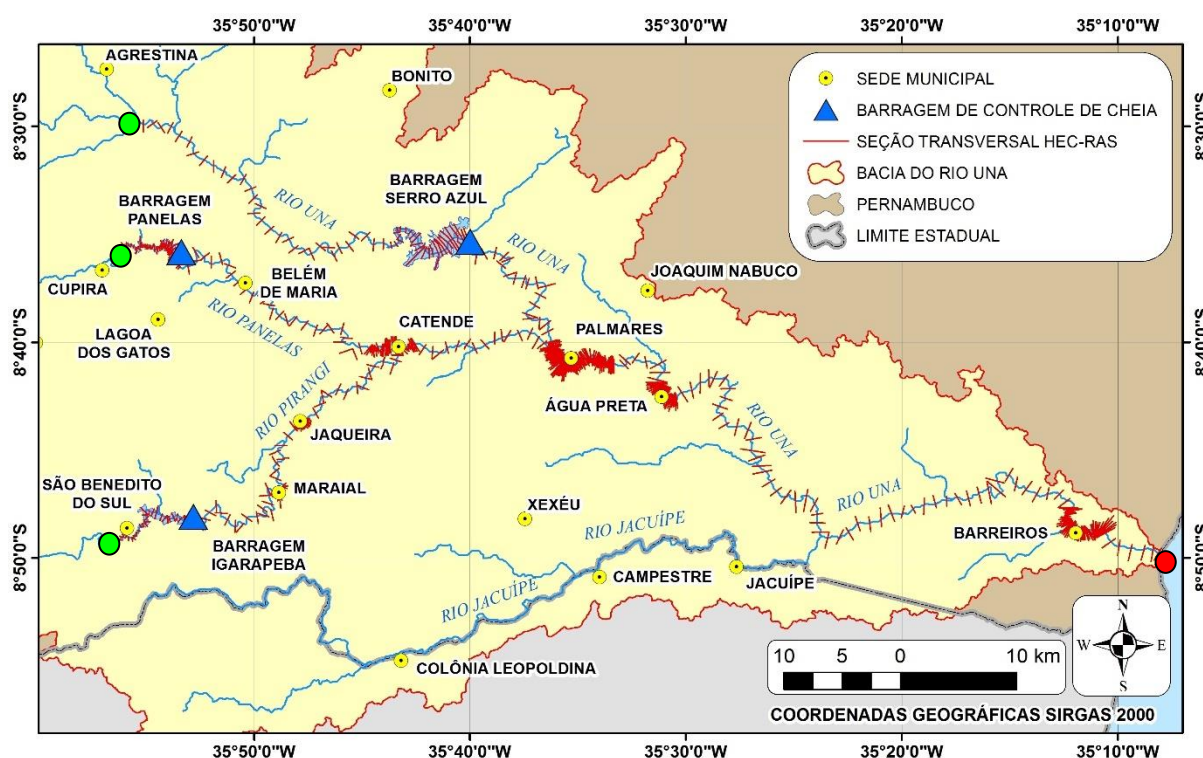
As equações de *Saint-Venant* podem ser simplificadas de algumas formas dependendo do problema estudado: nesses casos algum dos termos referentes a energia cinética, energia de pressão ou energia gravitacional pode ser simplificado ou eliminado.

3.6.1. Definição da nova geometria e pré-processamento das seções

A versão do modelo hidrodinâmico do MAVEN 1.0 possui seções transversais a cada 1km para os rios Una, Pirangi e Panelas, sendo estes importantes contribuintes para a formação de cheias na bacia. Os municípios de São Benedito do Sul, Catende, Palmares, Água Preta e Barreiros receberam maior detalhamento com seções transversais a cada 100 m. Estas seções foram definidas a partir de Modelo Digital Terreno – MDT obtido a partir do mapeamento realizado pelo Instituto LACTEC em 2011 (RIBEIRO NETO, CIRILO & DANTAS, 2011) [38].

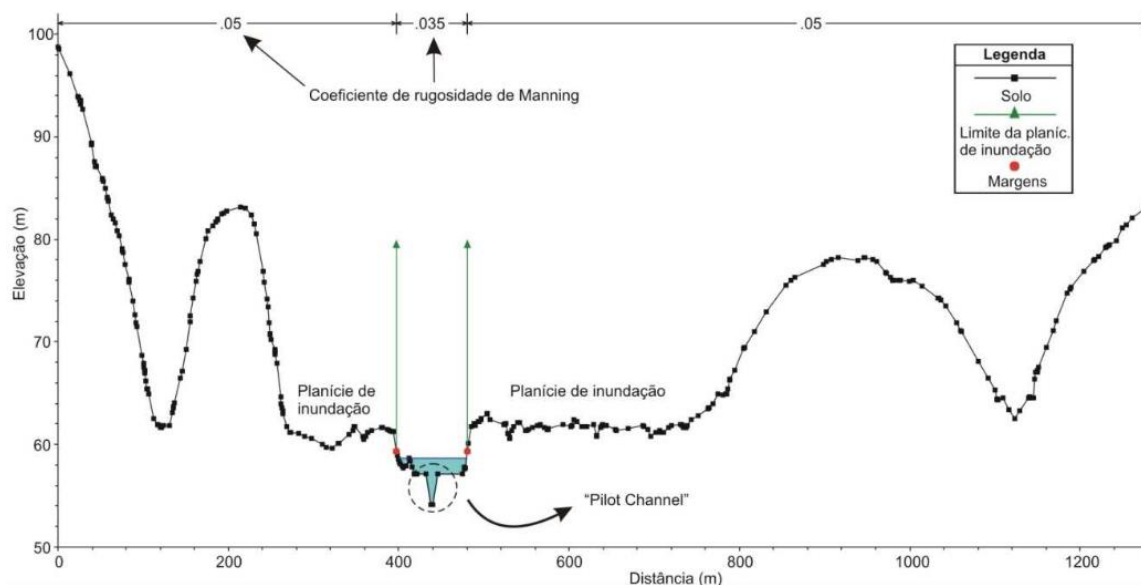
A Figura 46 apresenta a localização de municípios, estações fluviométricas utilizadas, trecho dos rios modelados e a localização das barragens para controle de cheias. A Figura 47 mostra uma seção típica utilizada para a modelagem hidrodinâmica do rio Una.

Figura 46 – Localização das seções transversais do modelo hidrodinâmico, municípios e barragens para controle de cheias da bacia do Una.



Fonte: O autor, (2017)

Figura 47 – Seção típica do modelo hidrodinâmico HEC-RAS da bacia do Una.

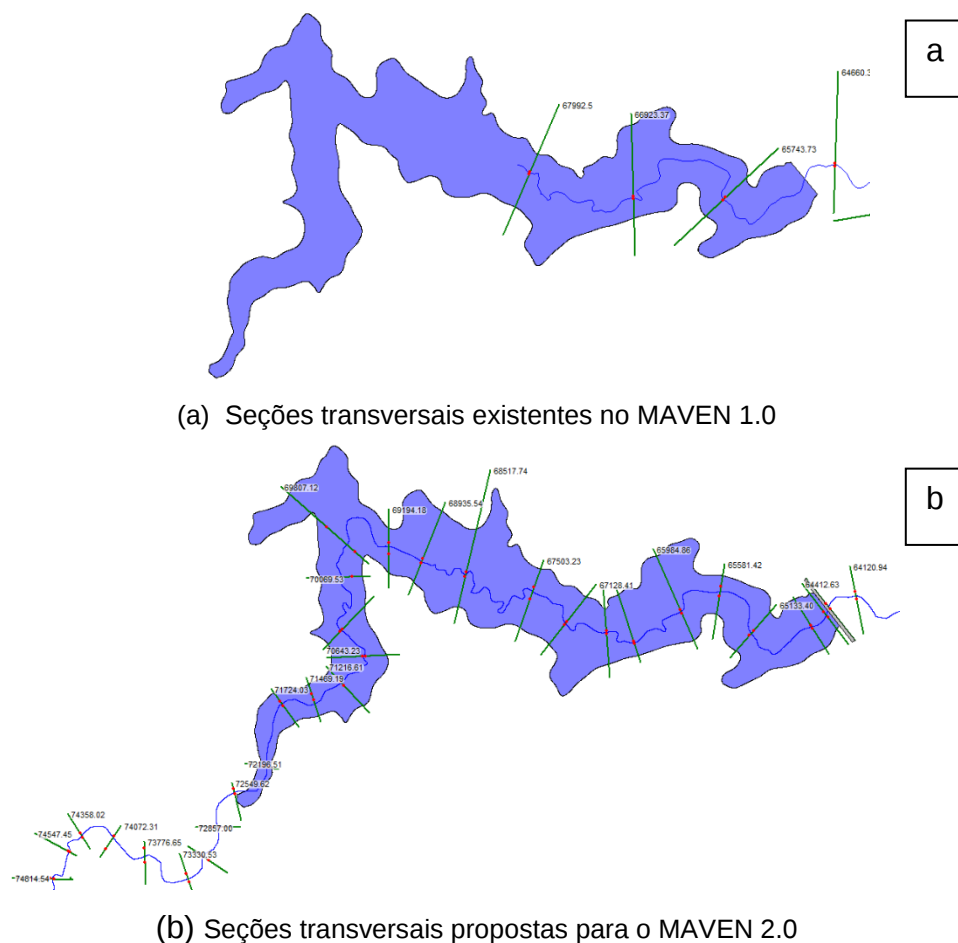


Fonte: Ribeiro Neto, Cirilo & Dantas, (2011) [38].

Considerando a inclusão de três barragens para controle de cheias, foi necessário adicionar novas seções transversais ao modelo existente. Estas seções foram posicionadas de maneira a atender condições de localização do barramento e

cobertura das áreas a serem inundadas. A Figura 48a mostra que o início do trecho modelado no rio Pirangi não cobre toda a região da barragem Igarapeba, sendo assim, foi necessário incluir as seções conforme apresentado na Figura 48a.

Figura 48 – Seções transversais do HEC-RAS ao longo da barragem Igarapeba (em construção).

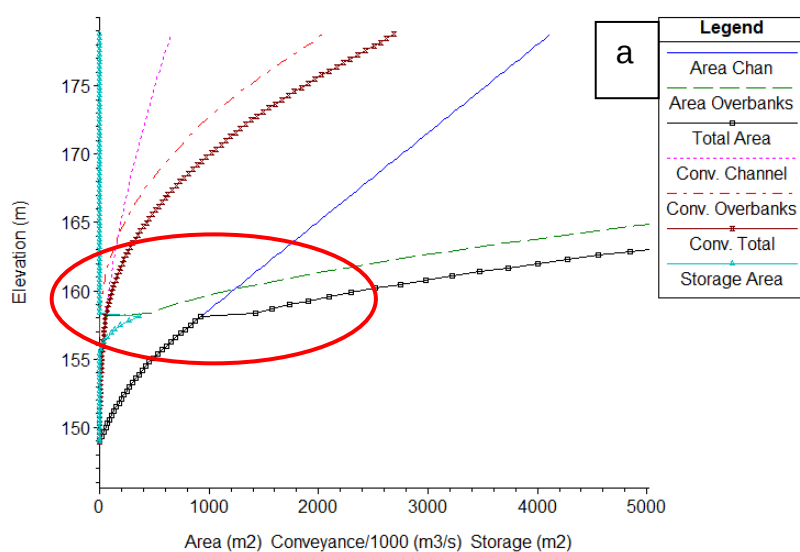


Fonte: O autor, (2017)

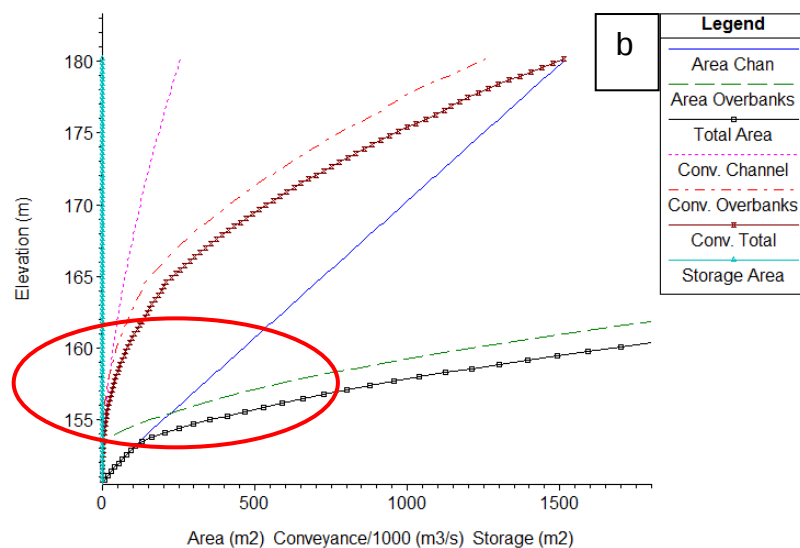
Para inserir as novas seções, foi utilizada a extensão HEC-GeoRAS, disponibilizada gratuitamente e específica para as definições geométricas do modelo hidrodinâmico HEC-RAS. Um novo trecho de rio é possível de ser adicionado desde que tenha outro nome e se sobreponha ao segmento de rio existente. Como consequência, a nova geometria fica com dois segmentos de rio unidos por uma junção fictícia. Como alternativa de tornar o trecho de rio contínuo novamente, removeu-se a junção abrindo a opção de unificar os trechos.

Após definição da nova geometria, foi iniciada a etapa de pré-processamento que consiste na verificação de possíveis situações que venham a causar instabilidade no modelo. Na etapa de pré-processamento do HEC-RAS, calcula-se para cada seção transversal curvas dos parâmetros hidráulicos que são essenciais para que não haja instabilidades nas simulações, sendo assim deve-se atentar para análise destas curvas para garantir que em nenhuma delas ocorram descontinuidades, conforme Figuras 49a e 49b.

Figura 49 – Curvas de parâmetros hidráulicos para seção transversal do HEC-RAS.



(a) Curvas com descontinuidades que podem gerar instabilidades nas simulações.



(b) Curvas sem descontinuidades.

Fonte: O autor, (2017)

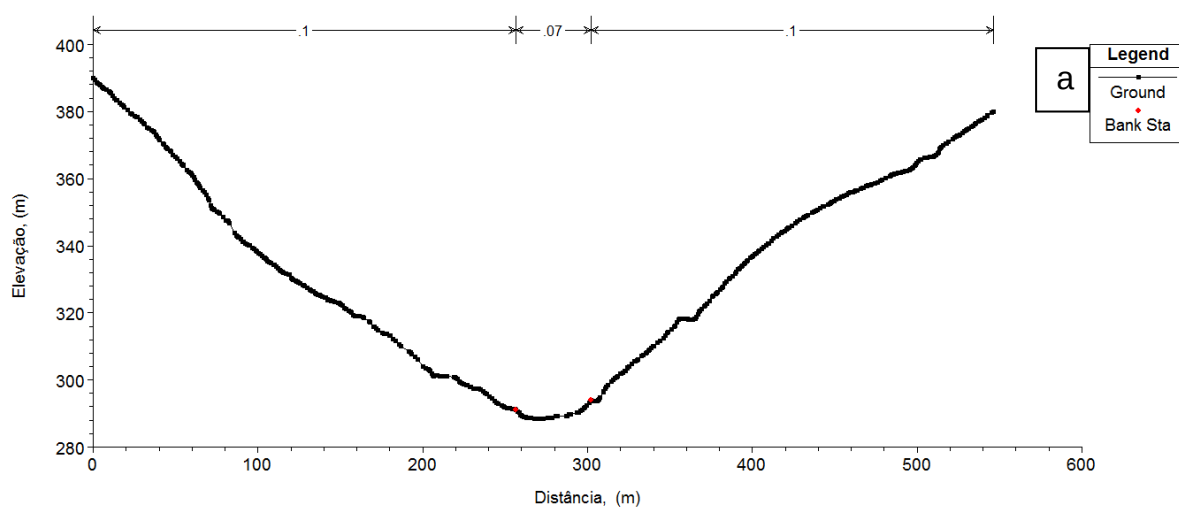
Entre os fatores que podem gerar descontinuidades nas curvas, pode-se citar a localização equivocada dos pontos que definem as margens (*bank station*), grandes diferenças entre as cotas das margens direita e esquerda ou grandes variações do coeficiente de *Manning* em uma mesma seção.

3.6.2. Simulação de reservatórios para controle de cheias

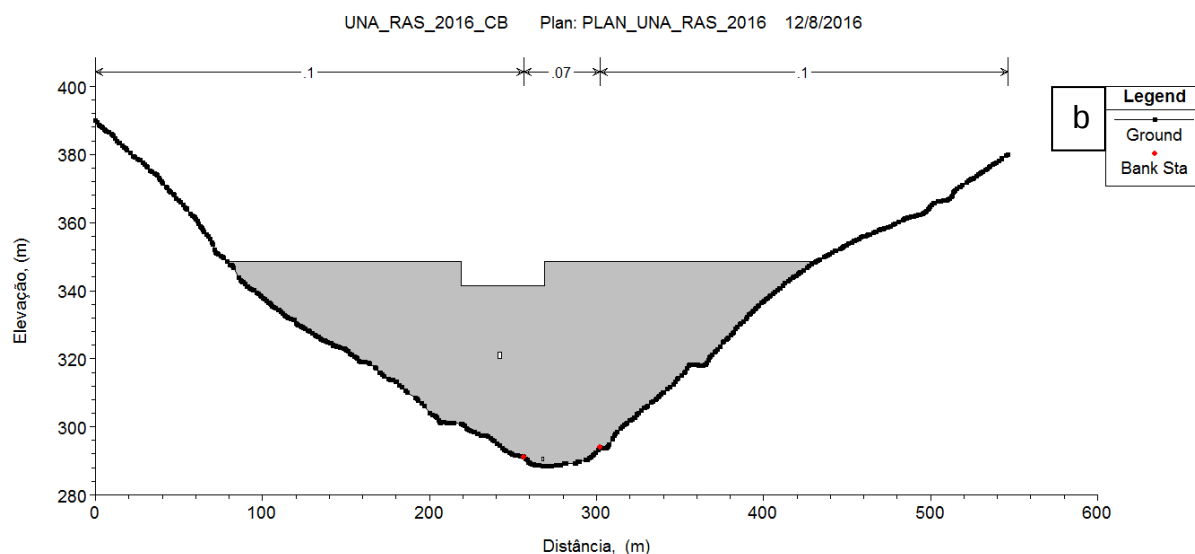
Neste trabalho foram incluídas três barragens no modelo hidrodinâmico desenvolvido no HEC-RAS 5.0.3 para a bacia do rio Una. Essas barragens possuem como finalidade principal o controle de cheias, sendo importante a modelagem para auxiliar a operação dos reservatórios em situações de eventos externos.

No HEC-RAS, a inclusão de uma barragem pode ser feita através da caixa de ferramentas de estruturas em linha (*Inline Structure*). Na inclusão de uma barragem é recomendado que haja uma seção transversal próxima à localização do eixo para que o perfil longitudinal da barragem seja bem representado. Como exemplo, as Figuras 50a e 50b apresentam, respectivamente, uma seção transversal próxima ao eixo da barragem Igarapeba e a mesma seção com a geometria da estrutura em linha utilizada para simular a barragem.

Figura 50 – Seções transversais do modelo hidrodinâmico com e sem barragem.



(a) Seção transversal do modelo hidrodinâmico sem barragem.



(b) Seção transversal do modelo hidrodinâmico com barragem.

Fonte: O autor, (2017)

Os dados necessários para definição das características geométricas da barragem incluem a distância (*Distance*) entre o eixo da barragem e a seção transversal imediatamente a montante, a largura do coroamento da barragem (*Width*), o coeficiente do vertedouro tipo ogiva (*Weir Coef.*) calculado automaticamente através da opção “Cd”.

O coeficiente (Cd) é calculado com base na altura do canal de aproximação do vertedouro (*Spillway Approach Height*) e da lâmina d’água máxima de projeto (*Design Energy Head*) que pode haver durante o vertimento. Por fim, a geometria é definida por meio de pares de coordenadas em função da distância e elevação da seção transversal, de modo que seja desenhado o perfil longitudinal da barragem com a seção vertedoura de projeto.

A definição das características geométricas é específica para cada barragem, levando em conta o máximo de atributos que definam a barragem assim como a mesma foi ou será construída. Uma vez definida a seção transversal mais próxima do local da barragem, deve-se preencher os campos de informações conforme a Figura 51.

Figura 51 – Dados de entrada para definição da geometria de barragem no HEC-RAS.

Fonte: O autor, (2017)

Na Tabela 10 são apresentadas as dimensões dos dispositivos de descarga, como descarga de fundo, galeria livre e vertedouro das barragens simuladas. Todas as informações geométricas dos reservatórios foram extraídas dos projetos básicos das barragens, exceto as dimensões das descargas de fundo, que foram ampliadas de modo a reduzir instabilidades no início das simulações.

Tabela 10 – Dimensões dos dispositivos de descargas das barragens simuladas.

Barragem	Descarga de Fundo*		Descarga Livre		Vertedouro Reduzido		Vertedouro	
	Altura (m)	Largura (m)	Altura (m)	Largura (m)	Altura (m)	Largura (m)	Altura (m)	Largura (m)
Igarapeba	1,0	1,0	2,0	2,0	-	-	7,0	50,0
Panelas	1,5	1,5	-	-	4,0	5,0	5,0	110,0
Serro Azul	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	25,0	5,0	385,0

*Dimensões adaptadas do projeto básico

Fonte: O autor, (2017)

Após a definição da geometria do barramento, foram incluídos os dispositivos de descargas. Além dos vertedouros, as barragens Serro Azul e Igarapeba possuem (ou possuirá, no caso da última, não concluída) dois dispositivos de descarga: uma

descarga de fundo controlada por comporta e uma descarga livre de maneira a garantir o volume para controle de cheias. A barragem Pannels não possui galeria livre.

Conforme mostrado na Figura 52, a edição de comportas e dispositivos de descargas (*Inline Gate Editor*) demanda a definição da altura (*Height*), largura (*Width*), referência altimétrica (*Invert*) e posicionamento horizontal (*Centerline Station*) da comporta. Na sequência são definidos os parâmetros hidráulicos dos dispositivos de descargas, sendo definidas comportas de topo fechado que podem ter vazão de descarga calculadas na condição de escoamento livre através da Equação 11 para vertedouro de parede espessa ou, na condição de escoamento forçado, através da Equação 12 para orifícios.

Figura 52 – Parâmetros de configuração dos dispositivos de descarga.

Fonte: O autor, (2017)

$$Q = 1,84 \times L \times H^{\frac{3}{2}}$$

Eq. 11

Onde:

Q - vazão de descarga, (m³/s)

L - largura da galeria ou vertedouro, (m)

H - altura da lâmina d'água, (m)

$$Q = Cd \times A \times \sqrt{2gh}$$

Eq. 12

Onde:

Q - vazão de descarga, (m³/s)

Cd - coeficiente de descarga

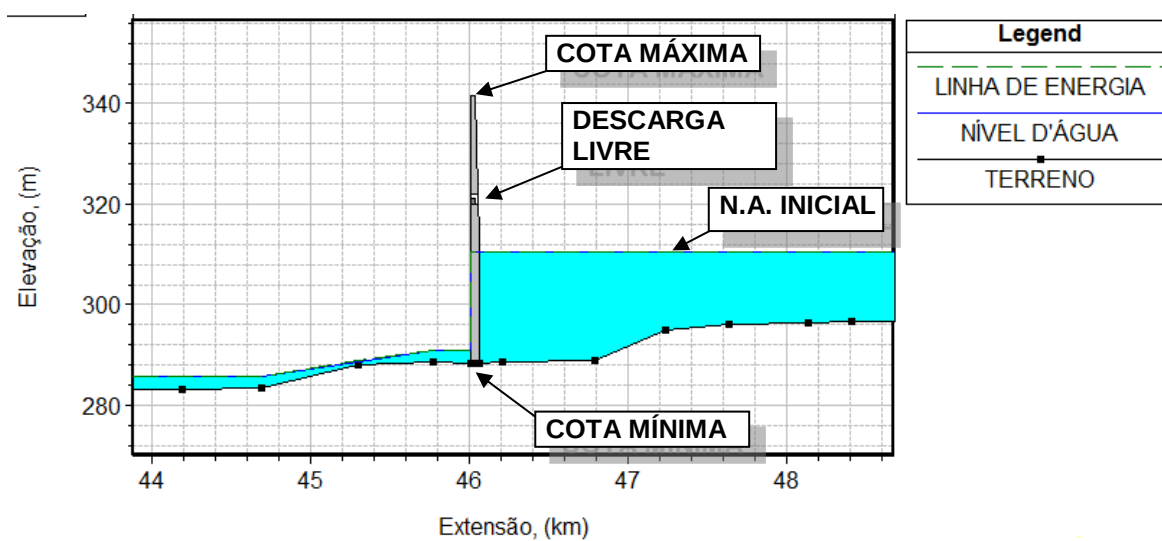
A - área de seção transversal, (m²)

g - aceleração da gravidade, (m/s²)

h - carga hidráulica, (m)

A Figura 53 apresenta a barragem Igarapeba inserida no modelo hidrodinâmico HEC-RAS. Pode ser observado, num trecho do perfil longitudinal do rio Pirangi, a localização da descarga livre, cotas máximas e mínimas para a barragem de mais de 50 metros de altura.

Figura 53 – Barragem Igarapeba no modelo hidrodinâmico HEC-RAS.



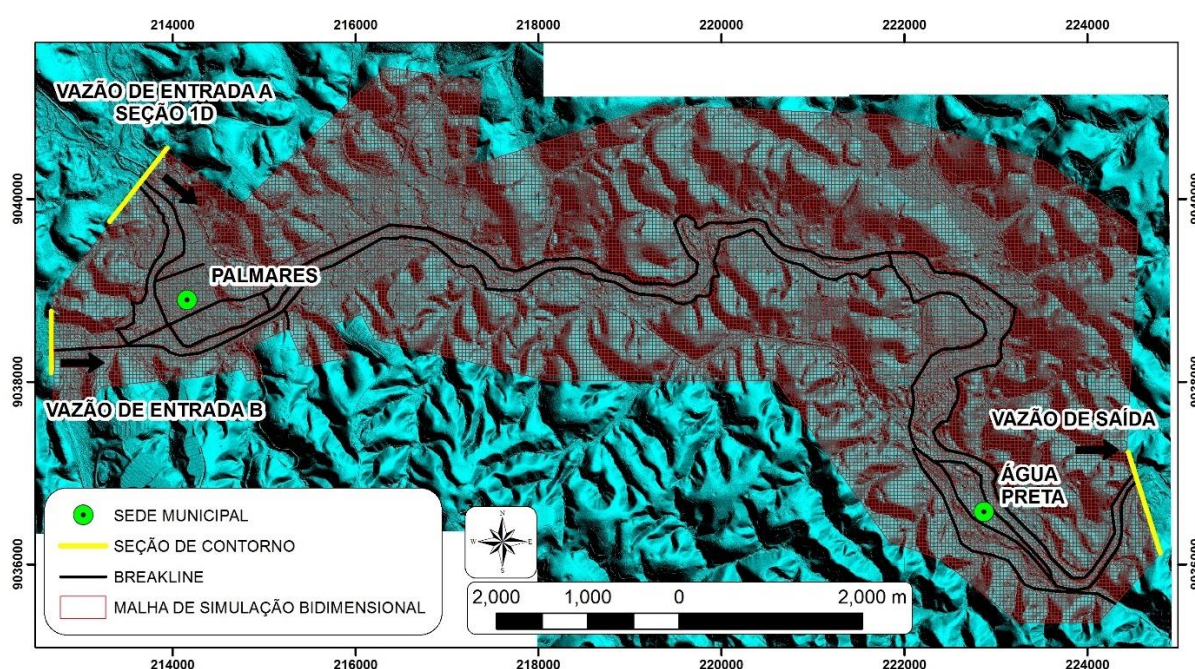
Fonte: O autor, (2017)

3.7. Modelagem hidrodinâmica bidimensional de áreas urbanas

O HEC-RAS, a partir da versão 5.0, inseriu ferramentas para modelagem hidrodinâmica bidimensional. O programa resolve as Equações de *Saint-Venant* em sua forma bidimensional através de um algoritmo de Volume Finito Implícito. Segundo USACE (2016) [95], este método permite a solução de problemas computacionais complexos em menos tempo que os métodos explícitos, onde se obtém maior estabilidade e robustez no processamento de problemas hidrodinâmicos bidimensionais.

Neste trabalho utilizou-se a ferramenta de simulação hidrodinâmica 2D como etapa de pós-processamento dos resultados do HEC-RAS unidimensional. A simulação bidimensional foi realizada em uma etapa isolada da simulação unidimensional. Uma vez que se obteve os hidrogramas das seções transversais unidimensionais, foi escolhido o período de 17 a 20 de junho de 2010 para simulação 2D. A escolha desse período visa a comparação da mancha de inundação com e sem a inclusão das barragens. Na Figura 54 é apresentada a região onde foi realizada a simulação bidimensional das áreas urbanas de Palmares e Água Preta.

Figura 54 – Esquema de simulação bidimensional nas áreas urbanas de Água Preta e Palmares-PE.



Fonte: O autor, (2017)

O município de Barreiros foi simulado isoladamente devido a distância entre as outras duas áreas urbanas simuladas.

Na Figura 55 é apresentada a malha de células adotadas no processamento bidimensional, o Modelo Digital do Terreno da mesma área, obtido através do mapeamento Pernambuco Tridimensional, que considera a realização de serviços de readequação da calha do rio e dragagem, concluídos após o mapeamento do Instituto LACTEC, realizado em 2012, conforme detalhe comparativo mostrado na Figura 56.

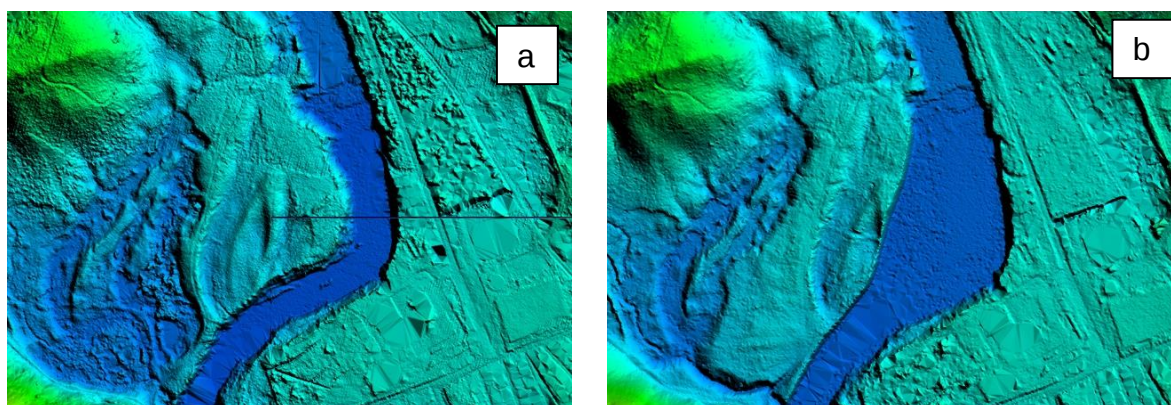
Figura 55 – Detalhes da malha de células para modelagem bidimensional em Palmares-PE.



Fonte: O autor, (2017)

Na etapa de definição das características geométricas do HEC-RAS 2D foi gerado sobre o terreno uma malha regular de células quadradas com 40 m de lado na maior parte da área. A discretização da malha bidimensional foi adotada com base nos arquivos de exemplos disponíveis no HEC-RAS 5.1.3. Células com outras formas geométricas foram criadas a partir da delimitação de linhas de quebra (*breaklines*), tais células foram inseridas para delimitação de estruturas especiais como margens dos rios, estradas e pontes.

Figura 56 – Comparativo do Modelo Digital do Terreno antes e depois dos serviços de readequação da calha do rio Una, em Palmares.



(a) MDT antes dos serviços de readequação da calha do rio

(b) MDT depois dos serviços de readequação da calha do rio

Fonte: O autor, (2017)

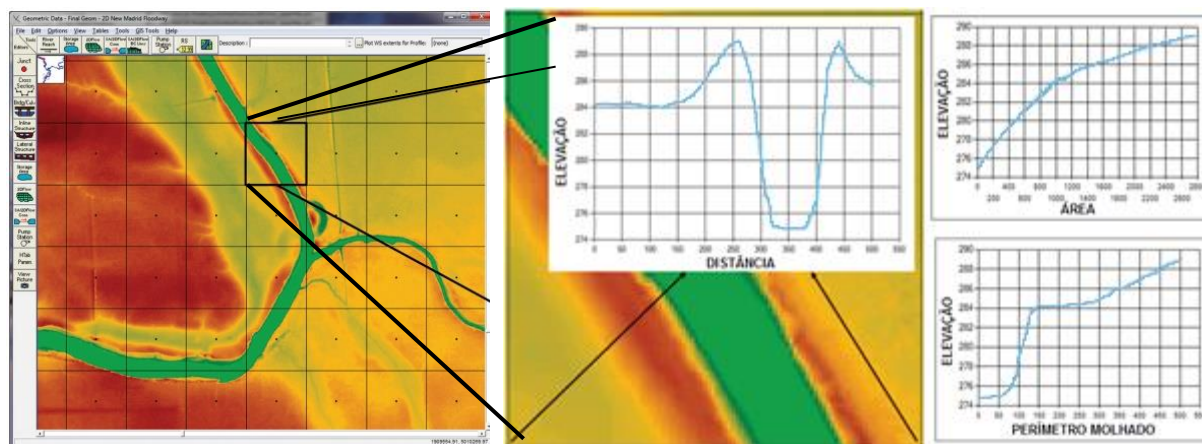
Na sequência podem ser definidas as condições de contorno que permitem incluir as vazões de entrada (*Inflow*) e o método de cálculo das vazões de saída (*Outflow*). A vazão de entrada A foi obtida do modelo unidimensional, a partir da seção transversal imediatamente a montante da área urbana do município de Palmares. A vazão de entrada B é originada de um pequeno afluente, e foi obtida do resultado de uma sub-bacia do modelo HEC-HMS. O cálculo da vazão de saída foi realizado em função da profundidade normal (*Normal Depth*) que calcula a descarga segundo a Fórmula de Manning, sendo necessário apenas informar a declividade de Manning (*Friction Slope*) obtida segundo a Equação 10.

A vazão de entrada foi obtida da seção imediatamente a montante da área urbana do município simulado. No entanto, os sensores utilizados para o perfilamento a laser do

PE3D não fornecem informações abaixo da superfície de água: logo, para a simulação hidrodinâmica bidimensional, deve-se utilizar algum artifício para corrigir a falta de batimetria da calha do rio. Neste trabalho, a solução adotada consistiu na identificação da vazão média do rio em Palmares no dia do mapeamento a laser, considerada como uma vazão de base (Q_{MDT}). Considerando que o MDT utilizado possui essa vazão preenchendo a calha do rio durante toda a simulação, foi subtraído a vazão de base (Q_{MDT}) do hidrograma de entrada.

A etapa de pré-processamento do HEC-RAS 2D consiste na obtenção de perfil do terreno nas bordas das células, tabelas e curvas que relacionam a elevação com área, perímetro molhado e volume, conforme exemplificado na Figura 57. O perfil do terreno nas bordas é utilizado para transferência de vazão entre as células de modo que as mesmas funcionam como “vertedouros” e cada célula funciona como um “reservatório”.

Figura 57 – Exemplo de perfil do terreno na borda, curva área x elevação e curva perímetro molhado x elevação para uma célula do HEC-RAS 2D.



Fonte: Adaptado de USACE, (2016).

O passo de tempo utilizado para as simulações foi de 1 minuto, enquanto os resultados foram calculados para intervalos de 30 minutos. Todo o pós-processamento das simulações bidimensionais foi realizado na aplicação *RAS Mapper*, aperfeiçoada no HEC-RAS 5.0.3.

As simulações bidimensionais também se fundamentam a partir dos princípios de conservação de massa e energia, sendo as Equações de *Saint-Venant*. Na forma bidimensional apresentadas conforme descrito, respectivamente, nas Equações 13, 14 e 15.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + u \frac{\partial h}{\partial x} + h \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} + h \frac{\partial v}{\partial y} = q_L \quad \text{Eq. 13}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial x} = g(S_{0x} - S_{fx}) \quad \text{Eq. 14}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial y} = g(S_{0y} - S_{fy}) \quad \text{Eq. 15}$$

Onde:

t - tempo, (s)

x - variável relativa à direção do escoamento na direção x , (m)

y - variável relativa à direção do escoamento na direção y , (m)

u - velocidade média do escoamento na direção x , (m/s)

v - velocidade média do escoamento na direção y , (m/s)

q_L - contribuição de vazão lateral, (m³/s)

g - aceleração da gravidade, (m²/s)

h - altura da lâmina d'água, (m)

S_{0x} - declividade do leito do rio na direção x , (m/m)

S_{fx} - inclinação da linha de energia (Equação de Manning) na direção x , (m/m)

S_{0y} - declividade do leito do rio na direção y , (m/m)

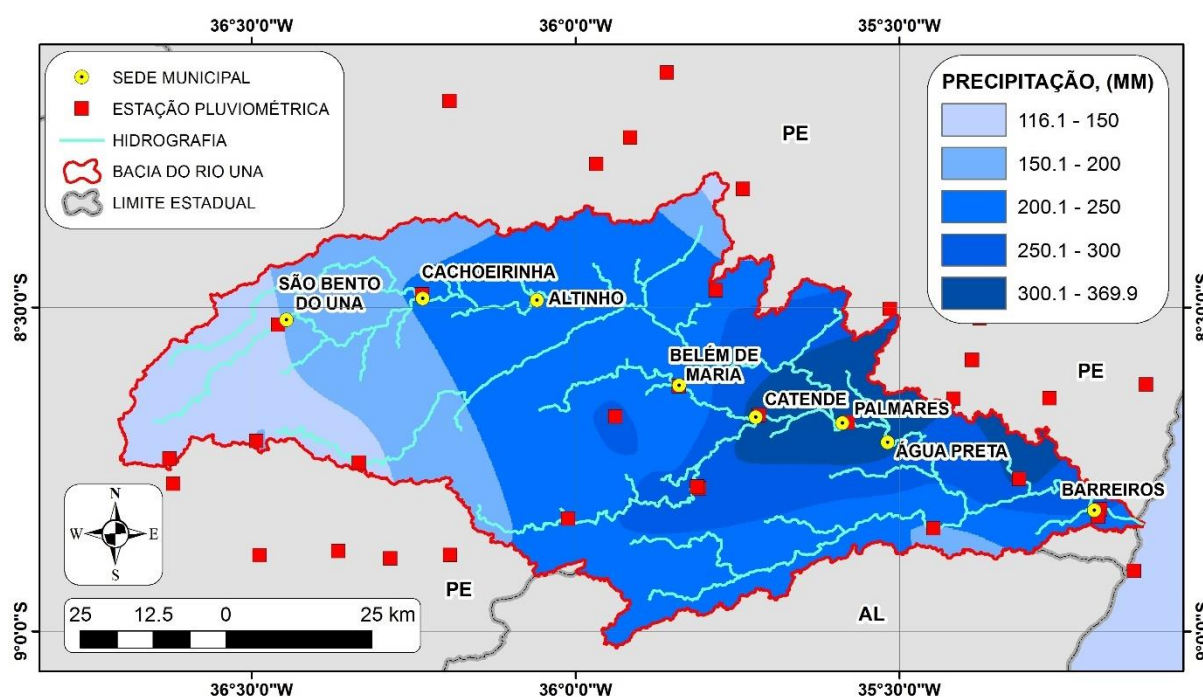
S_{fy} - inclinação da linha de energia (Equação de Manning) na direção y , (m/m)

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Análise comparativa entre dados de previsão meteorológica e precipitação medida em postos pluviométricos

A distribuição da chuva feita com os dados dos postos pluviométricos da região do Una, para o período de 16 a 20 de junho de 2010, mostra que toda área de contribuição da bacia recebeu precipitações intensas. Neste período de 5 dias, a precipitação média em toda a bacia foi de 223 mm, que varia de 116 a 370 mm conforme distribuição espacial mostrada na Figura 58.

Figura 58 – Distribuição da chuva medida no período de 16 a 20 de junho de 2010.



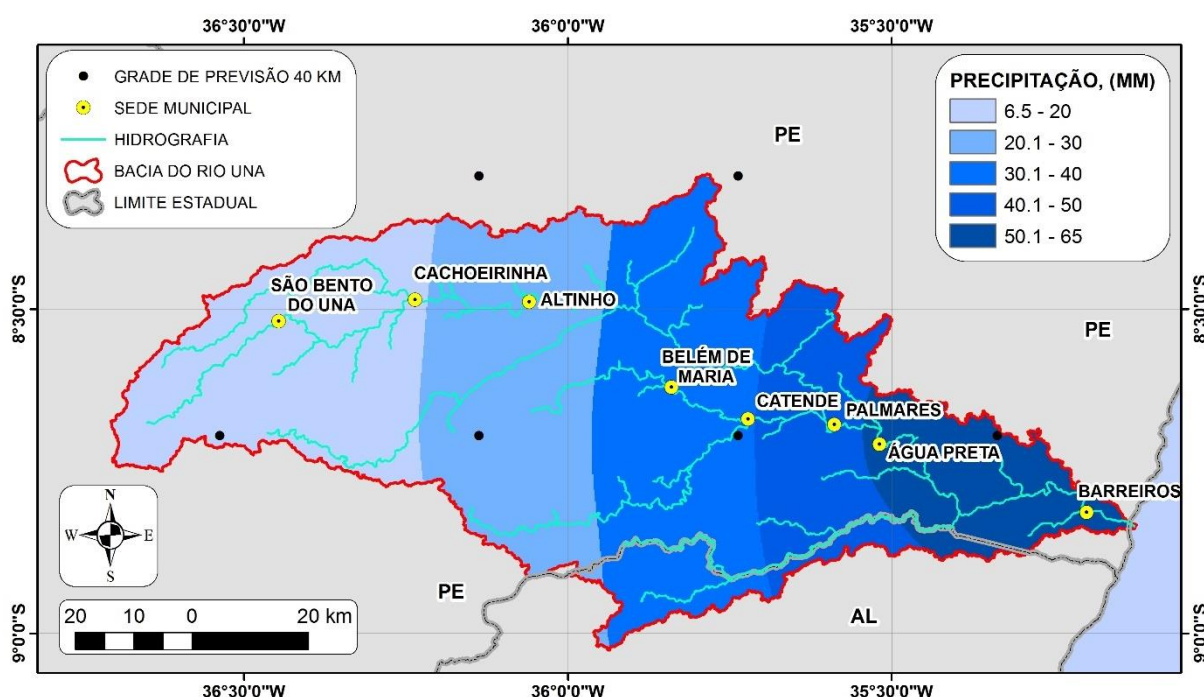
Fonte: O autor, (2017)

Percebe-se que a distribuição da chuva não é uniforme ao longo da bacia, sendo que as menores precipitações ocorreram na região Agreste do Estado, entre os municípios de São Bento do Una e Cachoeirinha. Em cerca de 50% da área da bacia ocorreram precipitações entre 150 e 200 mm, compreendendo a maior contribuição dos rios Panelas e Jacuípe. As maiores precipitações, na faixa de 300 a 350 mm,

concentraram-se na porção nordeste da bacia, nas proximidades dos municípios de Catende, Palmares e Água Preta.

Observando a distribuição de chuva com os dados de previsão numérica do modelo ETA 40 Km apresentado na Figura 59, percebe-se que o padrão da chuva na bacia hidrográfica é mantido; no entanto ressalta-se que o modelo não conseguiu reproduzir a intensidade da precipitação ocorrida.

Figura 59 – Distribuição da chuva prevista no modelo ETA 40 km no período de 16 a 20 de junho de 2010.



Fonte: O autor, (2017)

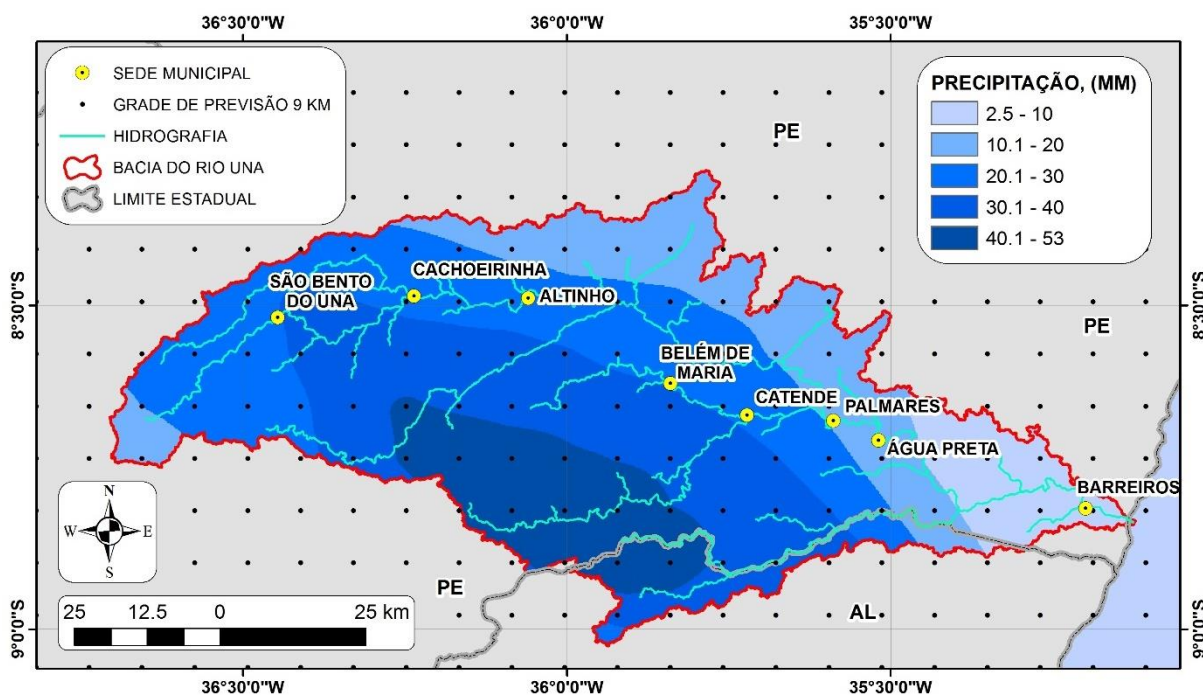
A precipitação média acumulada na bacia do Una, prevista com o modelo ETA 40 Km, foi de 31 mm, variando entre 6,5 mm de mínima e 65 mm de máxima. Os valores de precipitação média acumulada no período de 5 dias e precipitação máxima, ficaram cerca de 6 vezes inferiores às precipitações medidas em estações hidrológicas. Observando outros eventos, não foram verificados padrões que permitissem corrigir a quantidade de chuva prevista.

O modelo de previsão da APAC pode ser considerado uma alternativa adicional ao ETA 40 Km, pois utiliza os mesmos dados de entrada dos modelos climáticos de

mesoescala que o ETA 40 Km utiliza. No entanto, as simulações são feitas com refinamento espacial e temporal, reduzindo a malha de previsão para 9 Km e a resolução temporal para 1 h. Destaca-se que o melhoramento de resolução do Modelo APAC 9 Km é feito por interpolações e reamostragem, o que não necessariamente implica em ganhos de qualidade, visto que alguns parâmetros não recebem ganhos de escala.

De acordo com a distribuição de chuva apresentada na Figura 60, pode-se observar que a previsão do modelo APAC 9 Km resultou numa chuva média de 27,6 mm, variando de 2,5 mm de mínima a 53 mm de precipitação acumulada máxima em 5 dias. Mesmo com resultados mais discrepantes que os resultados do ETA 40 Km, quando comparado aos valores medidos nas estações hidrológicas, pode-se dizer que para o evento observado, a precisão dos dois modelos foi equivalente quanto à precipitação total na bacia. A diferença percentual entre a precipitação média dos modelos ETA 40 Km e APAC 9 Km é de apenas 10%.

Figura 60 – Distribuição da chuva prevista no modelo APAC 9 km no período de 16 a 20 de junho de 2010.



Fonte: O autor, (2017)

De maneira geral, a comparação entre a chuva medida nos postos pluviométricos e os modelos de previsão ETA 40 Km e APAC 9 Km demonstram que ambos os modelos realizaram previsão de chuva para o evento extremo de 2010 com intensidades muito abaixo das ocorridas.

Os resultados numéricos dos modelos de previsão disponibilizados para este trabalho sempre subestimaram a chuva real. No entanto, conforme descrito no item 3.3, outros modelos de previsão encontram-se disponíveis, podendo nestes haver melhor representação da precipitação média ocorrida.

Outro aspecto a ser considerado, além da precipitação média, é a imprecisão da distribuição espacial da chuva prevista nos modelos. Quando analisada a localização da região com maior precipitação prevista no modelo ETA 40 Km, verifica-se que estas áreas se situam nos municípios de Água Preta e Barreiros, e não mais em Palmares e Catende, conforme Figura 59. Esta diferença se dá por um deslocamento do ponto de maior intensidade de precipitação em relação aos dados medidos em pluviômetros. Este deslocamento é de aproximadamente 35 Km.

Analisando os resultados da Figura 60, percebe-se que, devido ao refinamento da resolução espacial, obteve-se uma distribuição de precipitação mais variável na área da bacia, permitindo uma representação dos resultados mais próxima do que ocorre na realidade. No entanto, a distribuição da chuva do modelo APAC 9 Km também deslocou o ponto de maior intensidade de precipitação por cerca de 49 Km.

Diante das análises realizadas, observa-se que os dados numéricos dos modelos de previsão não atenderam a precisão desejada para utilização em simulações hidrológicas, por não representar satisfatoriamente a chuva de uma região quanto aos aspectos quantitativos e posicionais.

Erros na intensidade da chuva prevista podem até serem corrigidos se forem estudados eventos suficientes para identificação de padrões. No entanto, os erros posicionais da distribuição da chuva podem mudar drasticamente a distribuição de vazões devido à irregularidade da rede de drenagem de cada bacia e sub-bacia hidrográfica.

Ainda assim, espera-se que novas fontes de dados de previsão possam ser incorporadas às funcionalidades do sistema MAVEN. A mais nova ferramenta de previsão a ser estudada deverá ser o radar meteorológico, já em operação pela APAC. Os dados do radar meteorológico trazem perspectivas completamente inovadoras sobre as previsões de chuva, pois entre os ganhos de qualidade destacam-se a precisão posicional e quantitativa. Por outro lado, a antecedência da previsão passa a ser de poucas horas, o que dificulta o uso dos dados na modelagem em tempo real.

4.2. Aperfeiçoamento do modelo hidrológico da bacia do rio Una

4.2.1. Análise comparativa entre a distribuição de chuva na bacia do rio Una e a vazão gerada através de modelo HEC-HMS

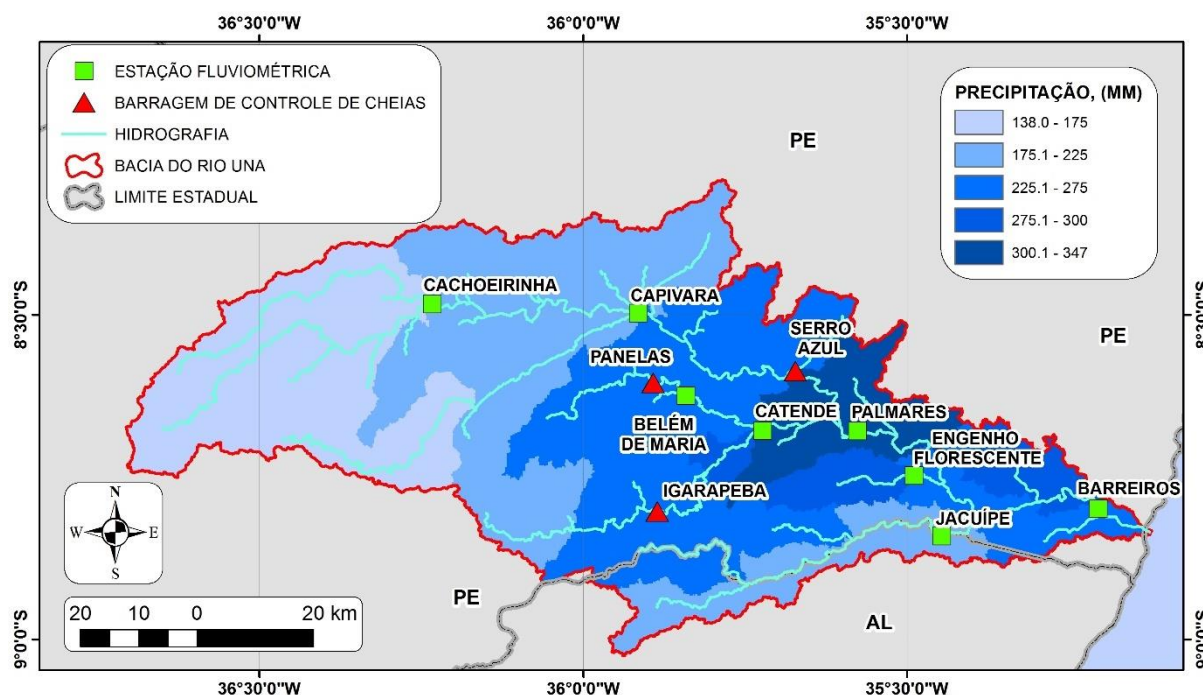
Em um modelo hidrológico semidistribuído como o HEC-HMS, utilizado no sistema MAVEN, é comum não existirem postos fluviométricos suficientes para controle das vazões geradas por cada sub-bacia. Sendo assim, entende-se que a definição dos coeficientes de calibração é aceitável ou boa, quando um conjunto de sub-bacias consegue reproduzir satisfatoriamente a vazão no mesmo ponto de um posto fluviométrico.

Em análise mais detalhada das vazões geradas por cada sub-bacia, pode-se identificar que na etapa de calibração ocorrem compensações de deflúvios. Nesse caso, uma sub-bacia pode estar gerando menos vazão, enquanto outra sub-bacia próxima pode gerar mais vazão, quando observada a precipitação ocorrida, e ainda assim, para um evento hidrológico específico, pode haver uma boa representação da vazão observada em um posto fluviométrico.

A Figura 61 traz a representação da chuva média de cada sub-bacia do modelo hidrológico HEC-HMS. Esta figura serve de referência para analisar a distribuição das

vazões do modelo hidrológico onde, através das vazões específicas, buscou-se seguir o mesmo padrão de espacialização.

Figura 61 – Precipitação média por sub-bacia no período de 16 a 20 de junho de 2010.

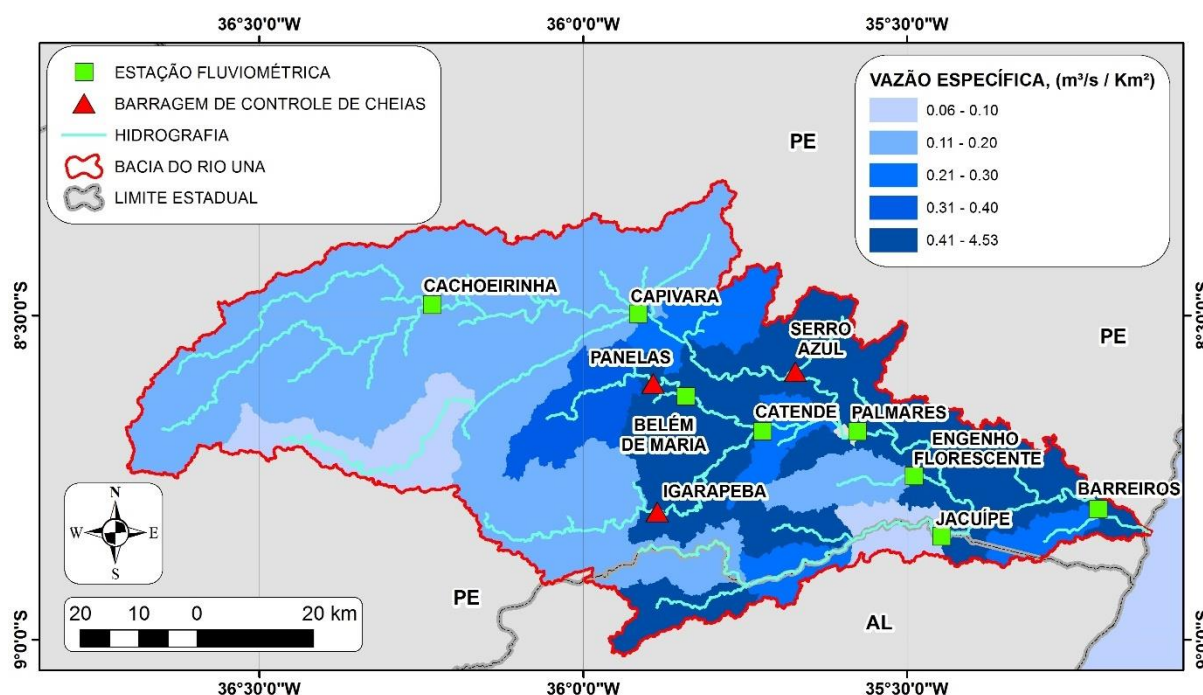


Fonte: O autor, (2017)

A Figura 62 apresenta a variação da vazão específica de cada sub-bacia do sistema MAVEN 1.0, onde foram identificadas variações de 0,06 a 4,53 m³/s / Km² na bacia, com média e desvio padrão de 0,46 e 0,66 m³/s / Km². Quando feita a comparação entre as Figuras 61 e 62, observa-se que a distribuição das vazões específicas do sistema MAVEN 1.0 não segue a mesma distribuição da chuva para o evento de 2010.

Na Figura 62, a maior parte da região a montante do posto fluviométrico Capivara possui vazão específica na ordem de 0,1 a 0,2 m³/s / Km², enquanto na Figura 61 percebe-se haver duas regiões distintas em função da chuva ocorrida. De maneira geral, a representação utilizada demonstra que a região controlada pelos postos de Belém de Maria e Catende, pode estar gerando mais vazão do que o esperado. Além disso, a área controlada pelo posto Jacuípe possui grande variação das vazões específicas entre as sub-bacias.

Figura 62 – Vazão específica na bacia do Una gerada pelo modelo hidrológico do sistema MAVEN 1.0.

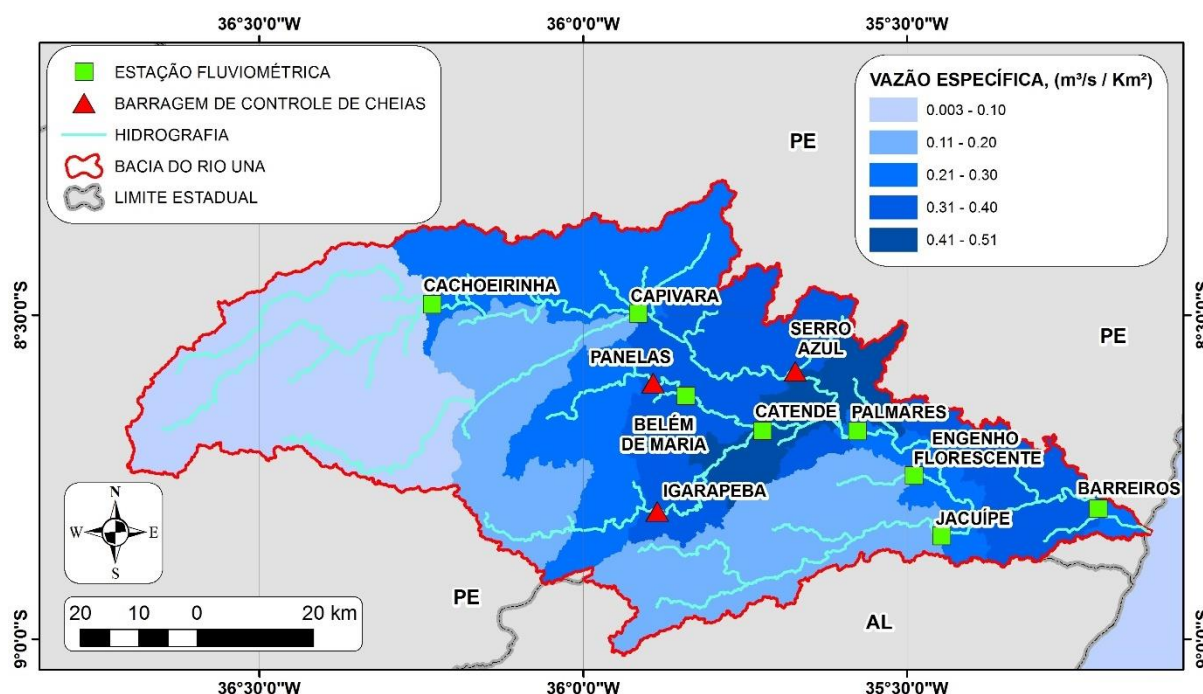


Fonte: O autor, (2017)

A Figura 63 representa a distribuição de vazão específica para o mesmo evento de chuva ocorrido em 2010, representado nas Figuras 61 e 62. No entanto, durante a etapa de calibração do MAVEN 2.0, buscou-se aproximar o padrão de distribuição da vazão ao representado na Figura 61. Para isso, destaca-se que os parâmetros de calibração das sub-bacias foram inicialmente alterados em grupos, conforme a localização dos postos fluviométricos. Na sequência foram ajustados os coeficientes de algumas sub-bacias individualmente, após serem observadas eventuais discrepâncias.

Considerando os resultados apresentados, percebe-se que a distribuição de vazão gerada a partir da atualização do modelo hidrológico da bacia do Una está variando entre 0,03 a 0,51 $\text{m}^3/\text{s} / \text{Km}^2$, com média e desvio padrão de 0,25 e 0,12 $\text{m}^3/\text{s} / \text{Km}^2$, respectivamente. Tais resultados demonstram maior homogeneidade na geração de vazão do modelo, quando comparados os desvios padrões de 0,66 e 0,12 $\text{m}^3/\text{s} / \text{Km}^2$, entre as versões antiga e recente dos modelos hidrológicos.

Figura 63 – Vazão específica na bacia do Una gerada pelo modelo hidrológico do Sistema MAVEN 2.0.



Fonte: O autor, (2017)

Destaca-se a importância da avaliação qualitativa da distribuição da vazão na bacia para a inclusão das barragens nas simulações. Considerando que as barragens podem ser inseridas a qualquer distância dos postos fluviométricos, em pontos onde não se verifica a precisão do modelo, é relevante analisar a distribuição de vazão em cada sub-bacia, uma vez que essas vazões intermediárias serão as vazões afluentes aos reservatórios.

4.2.2. Resultados de calibração para o modelo hidrológico da bacia do rio Una

A etapa de calibração do modelo hidrológico foi claramente a parte mais exaustiva do presente trabalho. No entanto, destaca-se que essa fase de incansáveis tentativas torna a sensibilidade e o sentido investigativo do hidrólogo mais aguçados, e desse modo o que poderia ser visto apenas como obtenção de resultados, transforma-se em experiência profissional.

Entre as alternativas de calibração testadas para aperfeiçoamento dos resultados, comenta-se o fato de que a quantidade de parâmetros a serem testados permite infinitas combinações. Considerando que a variação de alguns parâmetros se dá entre intervalos teóricos ou aceitáveis, é relativamente mais fácil obter bons resultados de calibração para um evento hidrológico específico.

No entanto, ao utilizar os mesmos parâmetros para reproduzir outros eventos hidrológicos, percebe-se que os resultados podem não ser satisfatórios. Um modelo hidrológico pode ser calibrado para uma finalidade específica, ou para representar uma condição específica de evento hidrológico. Neste trabalho utilizou-se como premissa que os melhores parâmetros de calibração para um modelo hidrológico podem representar satisfatoriamente qualquer evento hidrológico, desde que garantida a coerência dos dados fisiográficos e da precipitação.

As Tabelas 11 e 12 apresentam os valores dos coeficientes de *Nash-Sutcliffe*, no período de 25 de janeiro a 11 de fevereiro de 2004, para os oito postos fluviométricos utilizados na calibração do modelo hidrológico do sistema MAVEN 1.0 e 2.0. As referidas tabelas ainda apresentam as diferenças percentuais entre as vazões máximas e os volumes dos deflúvios estimados e observados, onde os valores negativos indicam que os resultados estimados estão abaixo dos resultados observados.

Tabela 11 – Coeficientes de Nash-Sutcliffe para o período de 25/01 a 11/02/04, utilizado na calibração do modelo hidrológico do Sistema MAVEN 1.0.

Posto Fluviométrico	R² MAVEN 1.0	ΔQmáx, (%)	ΔVolume (%)
A - Cachoeirinha	0,14	-66,8	-29,0
B - Capivara	0,82	-4,8	47,5
C - Catende	0,73	-18,2	3,0
D - Belém de Maria	0,89	13,6	-14,6
E - Palmares	0,77	24,1	35,2
F - Engenho Florescente	0,58	-26,5	-13,2
G - Jacuípe	0,71	-17,0	-13,1
H - Barreiros	0,20	3,7	43,5
Média	0.61	11.49	7.41
Desvio Padrão	0.28	28.11	30.14

Fonte: O autor, (2017)

Tabela 12 – Coeficientes de Nash-Sutcliffe para o período de 25/01 a 11/02/04, utilizado na calibração do modelo hidrológico do Sistema MAVEN 2.0.

Posto Fluviométrico	R² MAVEN 2.0	ΔQmáx, (%)	ΔVolume (%)
A - Cachoeirinha	0,21	-67,8	-41,3
B - Capivara	0,91	-26,3	-11,4
C - Catende	0,72	-15,3	-12,5
D - Belém de Maria	0,78	-15,2	-39,7
E - Palmares	0,80	2,4	30,9
F - Engenho Florescente	0,53	1,9	32,0
G - Jacuípe	0,85	-7,0	25,9
H - Barreiros	0,40	-5,4	52,3
Média	0.65	-16.59	4.53
Desvio Padrão	0.25	22.80	35.43

Fonte: O autor, (2017)

A Figura 64 apresenta os hidrogramas para os postos fluviométricos utilizados na calibração da versão atualizada do modelo hidrológico HEC-HMS. Na fase de calibração, os valores de R² variaram entre 0,21 a 0,91 para os postos de Cachoeirinha e Capivara, respectivamente. Os valores do posto de Cachoeirinha em geral subestimam a vazão observada, cabendo registrar que esta é a região da cabeceira do rio e também a mais seca da bacia. Devido às vazões exageradamente altas nas simulações desta área, observou-se que calibração para geração de vazões mais baixas, nessa região, deixa o modelo mais estável.

Ainda considerando os resultados das Tabelas 11 e 12, observa-se que segundo Collischonn (2001) [90], os resultados gerados para os postos de Catende, Engenho Florescente e Barreiros são considerados aceitáveis, enquanto a qualidade da vazão gerada nos postos Capivara, Belém de Maria, Palmares e Jacuípe pode ser considerada boa.

A validação do modelo se deu através dos eventos com os maiores registros de vazão na bacia do Una, sendo utilizados os eventos extremos ocorridos em 2000, 2010 e 2011, conforme ilustrado nas Figuras 65, 66 e 67. Mesmo sabendo que alguns dos postos não possuem dados disponíveis em alguns desses eventos, destaca-se a importância da observação dos dados registrados em eventos extremos ao longo da bacia.

Entre os resultados obtidos na validação, destaca-se os valores de R^2 iguais a 0,65, 0,58 e 0,95, respectivamente em Catende, Palmares e Jacuípe, nas simulações de 2000. Os valores de R^2 em Cachoeirinha e Engenho Florescente iguais a 0,75 e 0,77 no evento de 2010 e 0,70 em Belém de Maria no evento de 2011, mostrando que foi possível encontrar bons resultados em toda extensão da bacia do rio Una.

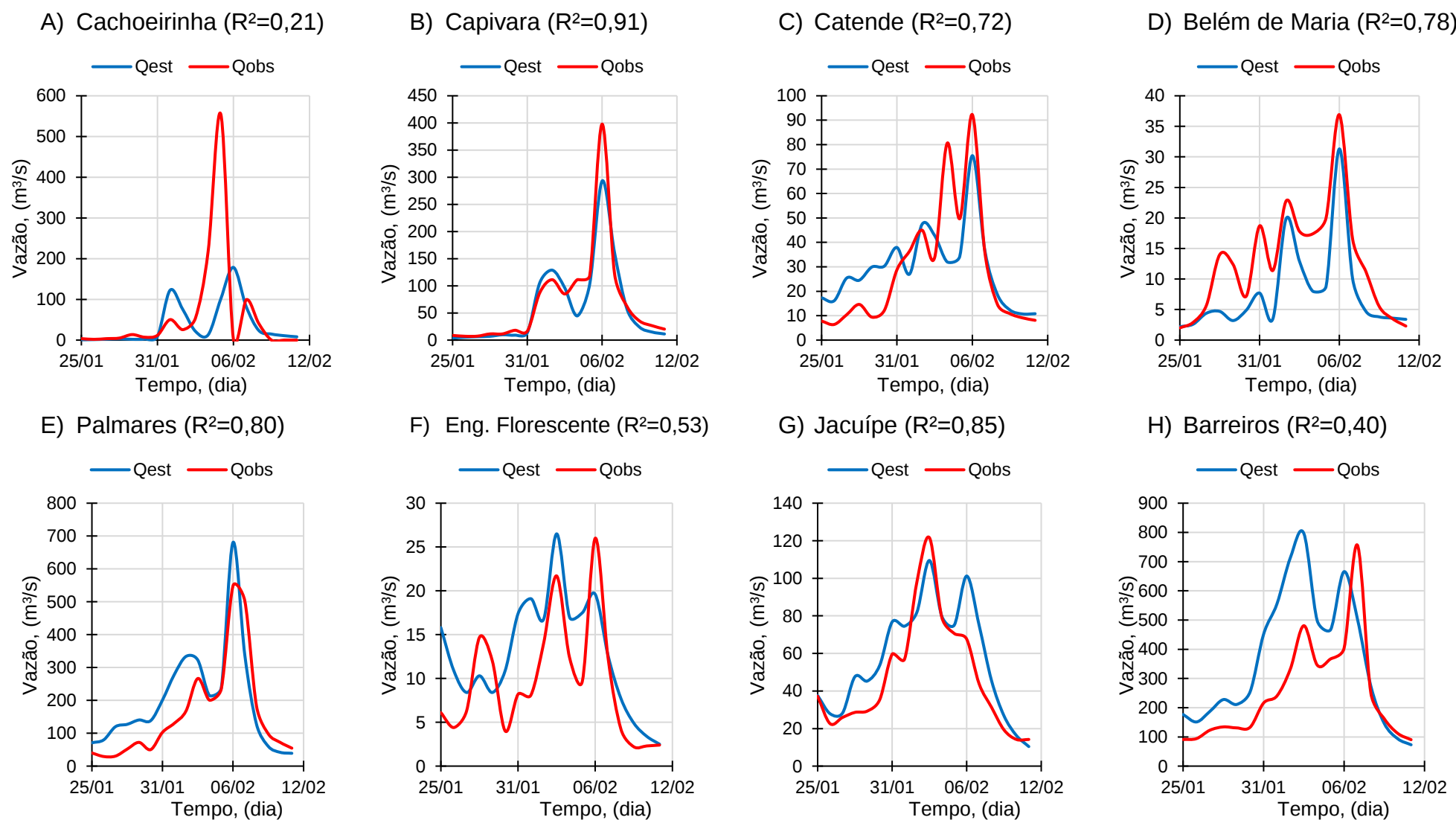
Considerando os resultados apresentados nas Tabelas 11 e 12, pode-se observar apenas uma melhoria discreta entre a média dos coeficientes de *Nash Sutcliffe* das duas versões do modelo hidrológico. No entanto, ganhos de qualidade são evidenciados também através de simulações de períodos anuais através dos resultados apresentados nas Tabelas 13 e 14, onde é apresentada uma comparação dos coeficientes de *Nash Sutcliffe* para as vazões geradas entre 2004 e 2014.

Observam-se nas Tabelas 13 e 14 que a atualização do modelo hidrológico trouxe ganhos globais na geração de vazões na bacia do Una, onde em todos os períodos observados houve aumento relevante nos valores dos coeficientes de *Nash Sutcliffe*. É possível afirmar que nos postos de Cachoeirinha, Capivara, Belém de Maria, Engenho Florescente e Jacuípe, onde a qualidade dos dados de vazões geradas é considerada aceitável, pode-se utilizar esta versão do modelo hidrológico para outras aplicações além de estudos de cheias, como estudos de regularização de vazões nos rios e reservatórios.

Objetivamente, pode-se associar que as principais melhorias no modelo hidrológico se devem à alteração do método de cálculo da vazão de base, à calibração individual de algumas sub-bacias específicas a partir da análise da distribuição de vazão e também à calibração com base na análise dos hidrogramas estimados para longos períodos e não apenas eventos específicos.

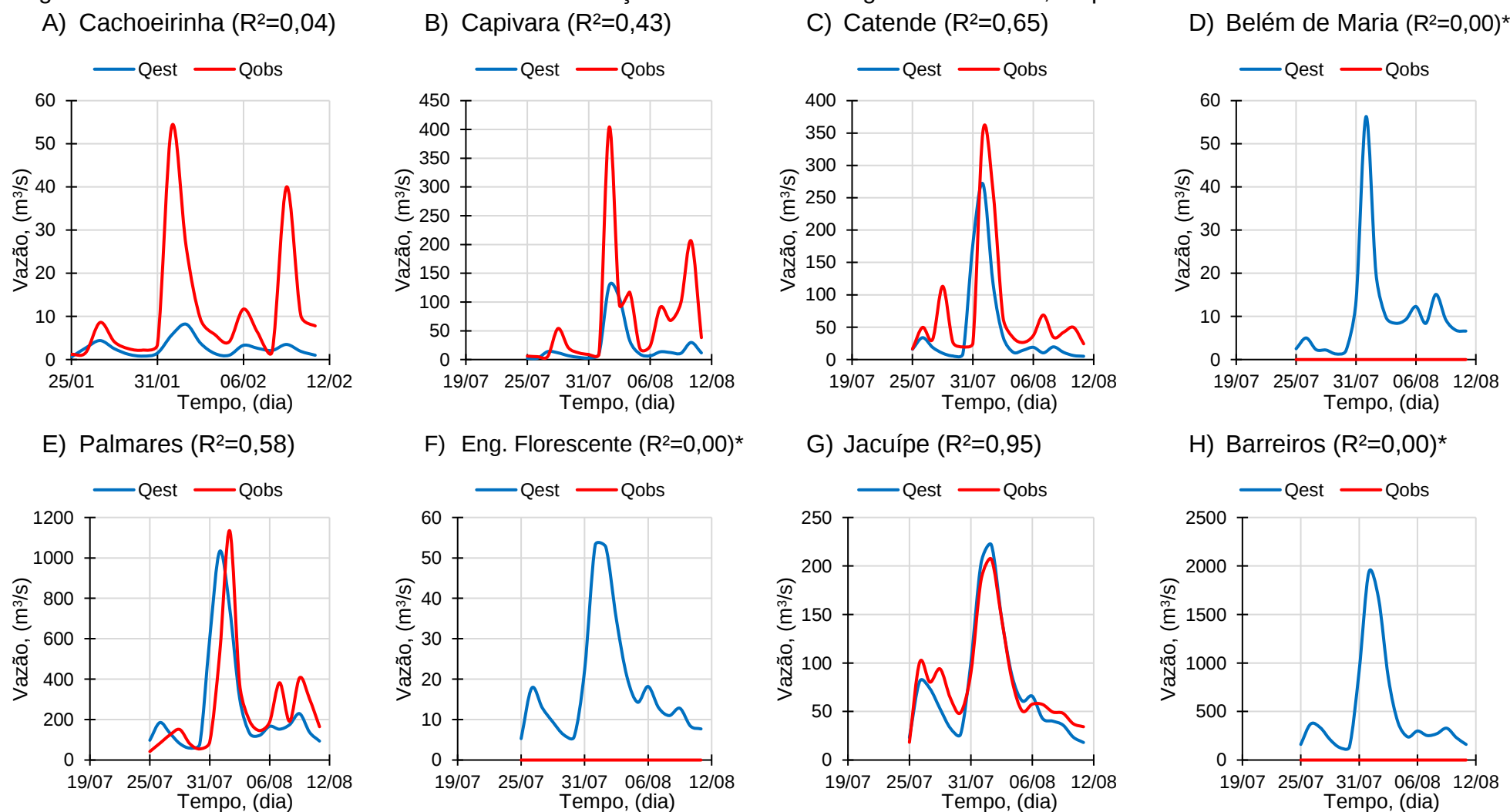
O cálculo da vazão de base foi realizado por meio do método de recessão, “*recession*”. Tal método foi escolhido devido à simplicidade dos parâmetros em relação a outros métodos, sendo também facilmente observada nos resultados a sensibilidade ao variar os coeficientes de calibração. Atribui-se ao método de recessão as melhorias obtidas nas áreas de clima semiárido e regime fluvial intermitente, como a região a montante dos postos Cachoeirinha e Capivara.

Figura 64 – Vazões estimadas e observadas na calibração do modelo hidrológico MAVEN 2.0, no período de 25/01 a 11/02/04.



Fonte: O autor, (2017)

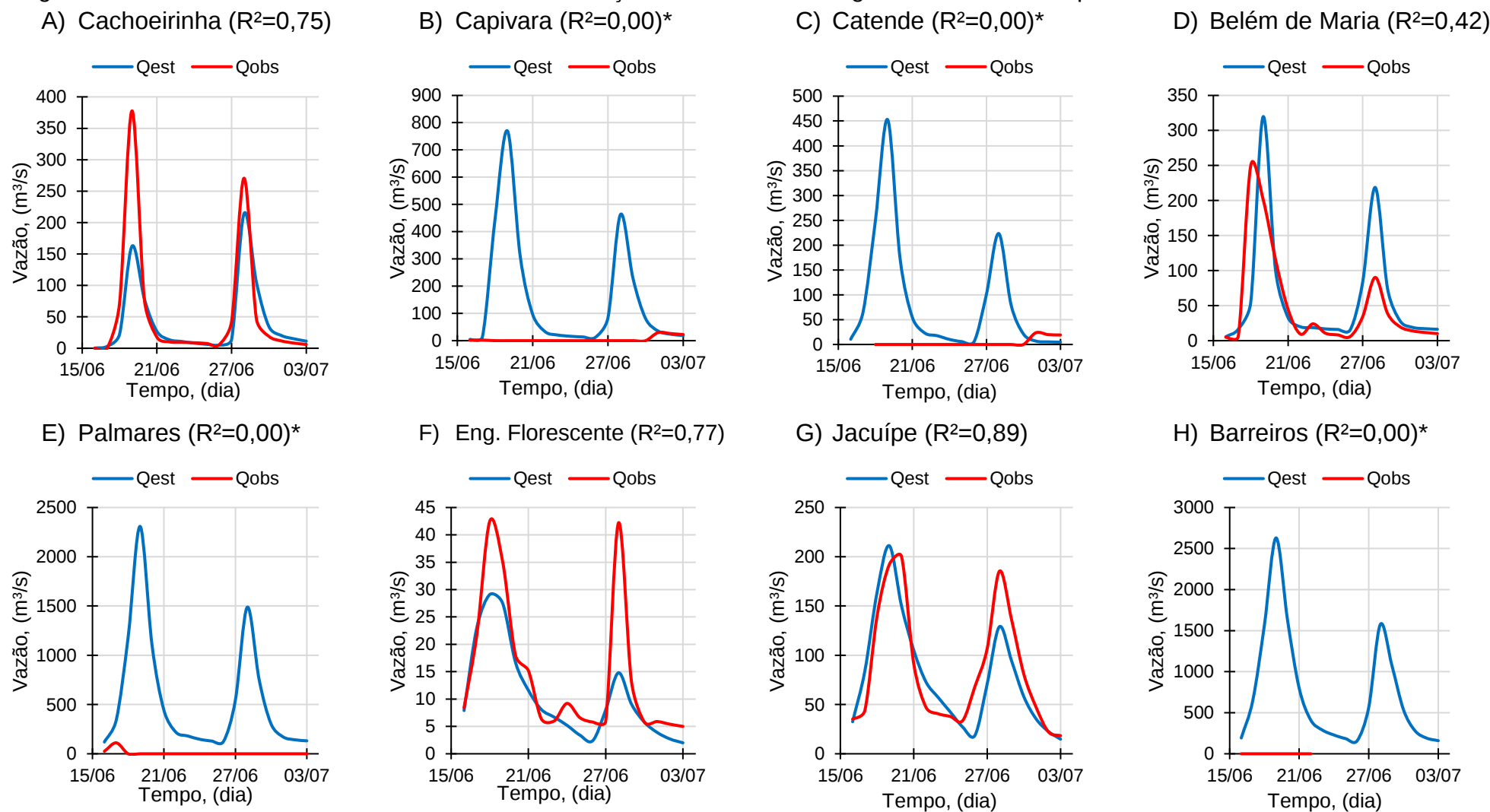
Figura 65 – Vazões estimadas e observadas na calibração do modelo hidrológico MAVEN 2.0, no período de 16/06 a 03/07/00.



* Evento sem dados observados no posto fluviométrico.

Fonte: O autor, (2017)

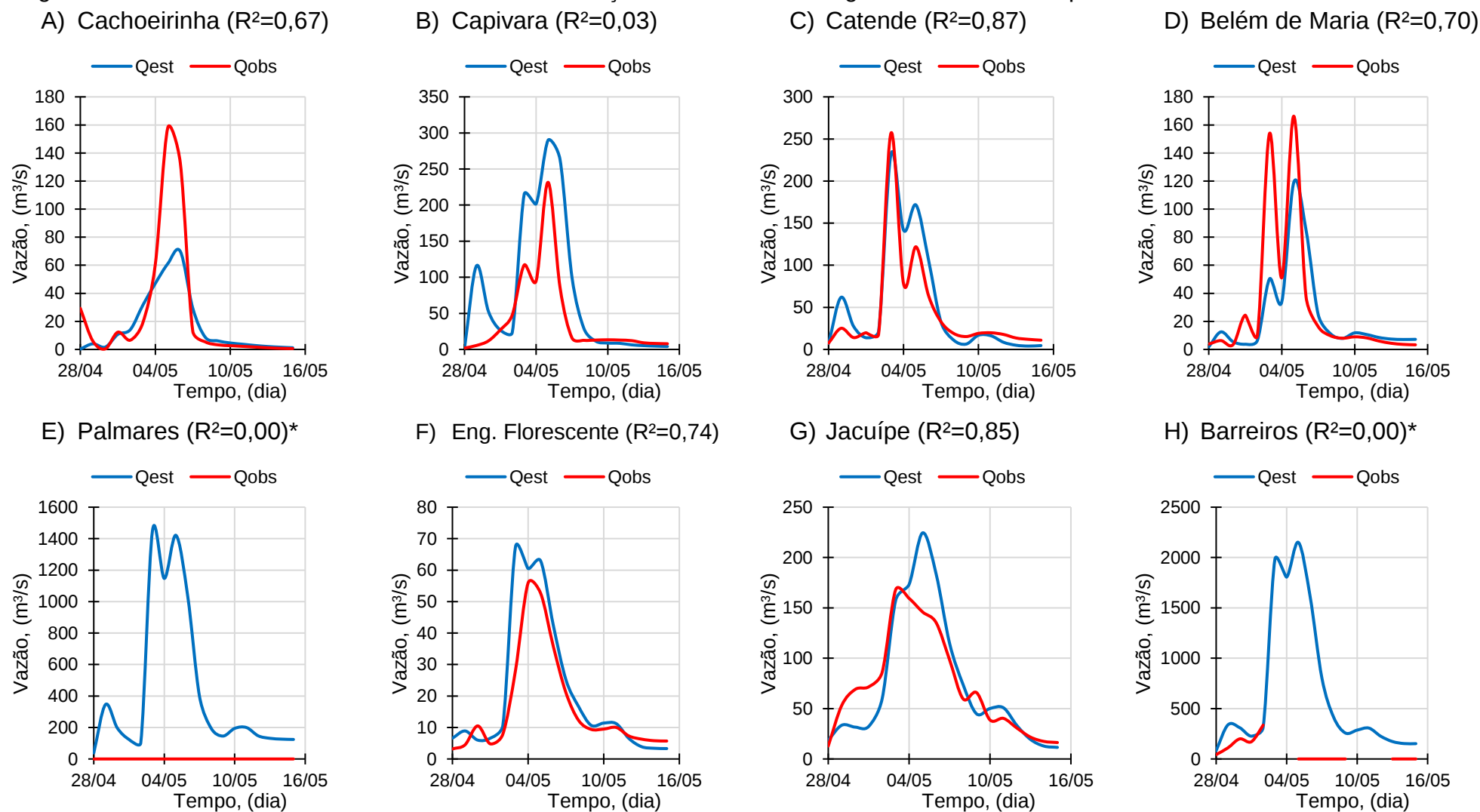
Figura 66 – Vazões estimadas e observadas na calibração do modelo hidrológico MAVEN 2.0, no período de 16/06 a 03/07/10.



* Evento sem dados observados no posto fluviométrico.

Fonte: O autor, (2017)

Figura 67 – Vazões estimadas e observadas na calibração do modelo hidrológico MAVEN 2.0, no período de 28/04 a 15/05/11.



Fonte: O autor, (2017)

Tabela 13 – Coeficientes de Nash Sutcliffe para versão do MAVEN 1.0 em períodos anuais de 2004 a 2014.

Período	Cachoeirinha	Capivara	Catende	Belém de Maria	Palmares	Engenho Florescente	Jacuípe	Barreiros	Média	Desvio Padrão
2004	0.02	-0.47	0.4	-0.1	0.03	0.31	0.46	0.25	0.11	0.31
2005	-45.21	-16.53	0.5	0.61	-0.46	0.57	0.47	0.1	-7.49	16.34
2006	-30.72	-16.06	0.58	0.31	0.18	0.44	0.57	0.37	-5.54	11.69
2007	-5.52	-6.25	0.59	-0.83	-0.34	0.25	0.37	-0.01	-1.47	2.77
2008	-70.36	-67.74	-1.22	-0.2	-3.15	0.42	0.56	-1.14	-17.85	31.63
2009	-10.15	-20.41	0.61	-0.14	-1.39	-0.36	0.46	-1.2	-4.07	7.47
2010	-1.99	*	*	0.21	*	0.04	0.09	*	-0.41	1.05
2011	-2.83	-7.2	0.61	0.89	0.51	-5.93	-1.57	-2.41	-2.24	3.04
2012	-0.5	0.4	0.29	-2.67	0.47	0.54	0.83	0.71	0.01	1.15
2013	-6.87	-11.72	0.45	-3.65	-1.1	-1.12	0.02	-0.67	-3.08	4.23
2014	-8.64	-7.11	0.47	-34.99	-0.62	0.33	0.74	-0.04	-6.23	12.19
R² Médio	-16.62	-15.31	0.33	-3.69	-0.59	-0.41	0.27	-0.40		
Desvio Padrão	22.73	21.44	0.54	10.47	4.07	1.9	0.66	0.99		

Fonte: O autor, (2017)

Tabela 14 – Coeficientes de Nash Sutcliffe para versão do MAVEN 2.0 em períodos anuais de 2004 a 2014.

Período	Cachoeirinha	Capivara	Catende	Belém de Maria	Palmares	Engenho Florescente	Jacuípe	Barreiros	R ² Médio	Desvio Padrão
2004	0.21	0.85	0.49	0.67	0.58	0.49	0.63	0.52	0.56	0.18
2005	0.45	0.60	0.46	0.66	0.73	0.51	0.69	0.69	0.60	0.11
2006	0.93	0.88	0.48	0.43	0.69	0.42	0.66	0.46	0.62	0.21
2007	0.91	0.75	0.52	0.58	-0.14	0.33	0.56	-0.01	0.44	0.36
2008	-0.83	-0.54	-1.65	0.33	-0.19	0.45	0.59	0.02	-0.23	0.75
2009	0.25	0.24	0.39	0.40	-0.10	0.50	0.62	-0.47	0.23	0.35
2010	0.74	*	*	0.40	*	0.64	0.84	*	0.66	0.19
2011	0.61	0.22	0.73	0.70	0.37	0.64	0.78	-0.34	0.46	0.38
2012	0.00	0.99	0.66	0.46	0.60	0.28	0.78	0.67	0.56	0.31
2013	0.91	0.92	0.09	-0.05	-0.02	0.05	0.52	-0.11	0.29	0.43
2014	0.89	0.90	0.50	-0.18	0.06	0.09	0.70	0.28	0.40	0.40
R² Médio	0.46	0.58	0.27	0.40	0.26	0.40	0.67	0.17		
Desvio Padrão	0.54	0.48	0.69	0.28	0.37	0.20	0.10	0.41		

* Período não considerado devido à ausência prolongada de dados observados no posto fluviométrico

Fonte: O autor, (2017)

A análise da distribuição de vazão demonstrou que os parâmetros fisiográficos exercem influência significativa em algumas sub-bacias, o que para melhorias dos resultados requer ajuste individual nos coeficientes de calibração de algumas áreas.

A simulação hidrológica contínua de períodos anuais, embora tenha um custo de processamento computacional maior, permite observar o comportamento de um modelo hidrológico em diversos eventos de chuva. Na etapa de calibração, foi possível perceber que as especificidades dos eventos hidrológicos podem evidenciar a necessidade de ajustes de alguns parâmetros.

Exemplificando, chega-se ao entendimento que nos eventos hidrológicos pode haver chuvas com intensidades diferentes ao longa da bacia, ou seja, os coeficientes de calibração adotados são expostos a precipitações variáveis ao longo do tempo. Quanto maior o número de eventos testados e observados na calibração, melhor será a percepção de falhas e discrepância nas vazões geradas.

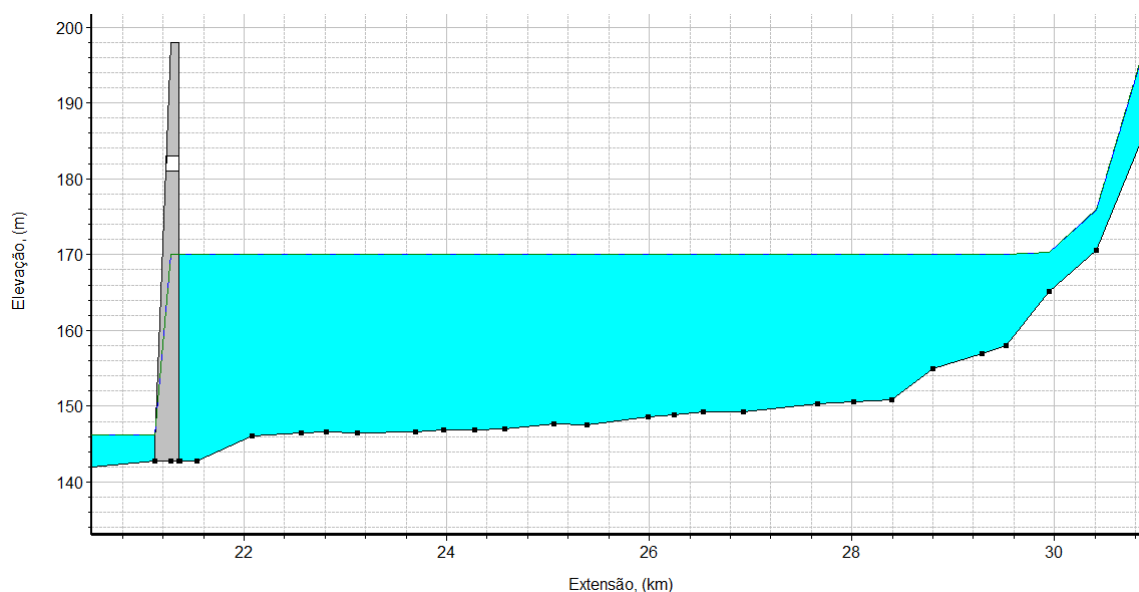
De modo geral, evidencia-se que houve melhorias significativas na qualidade do modelo hidrológico, havendo aumento da estabilidade e confiabilidade das vazões geradas, melhoria na distribuição de vazão na bacia e diminuição de vazões extremas geradas com baixas precipitações.

4.3. Modelagem hidrodinâmica de barragens para controle de cheias na bacia do rio Una

A construção de barragens para controle de cheias na bacia do rio Una foi o maior investimento para prevenção de enchentes que o Estado de Pernambuco, com o apoio da União, deve realizar com a conclusão das obras. Cada barragem foi projetada separadamente, e nos projetos, foram considerados os dispositivos de amortecimento de cheias e descargas de vazão necessários para laminar vazões com tempo de recorrência de até 10.000 anos. No entanto, a modelagem hidrodinâmica permite simular diversos cenários e visualizar o comportamento hidráulico dos eventos de cheia de forma integrada.

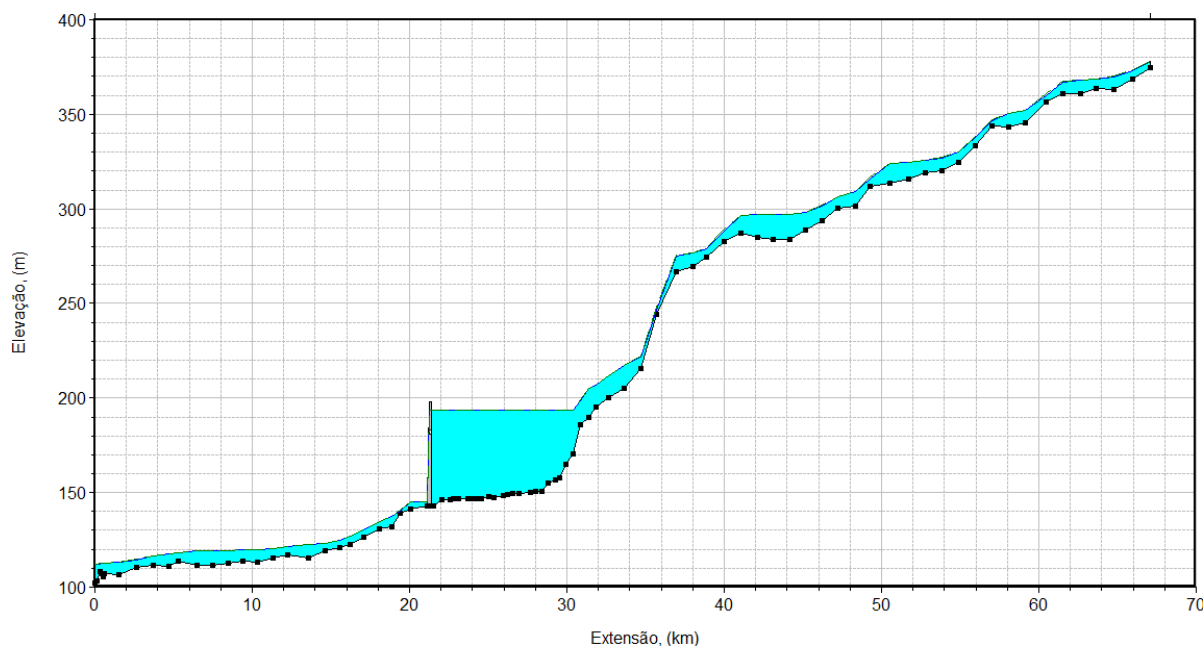
Quanto às atualizações do modelo hidrodinâmico unidimensional, destaca-se a inserção de seções transversais para cobertura da bacia hidráulica das barragens e inclusão das barragens Igarapeba, Panelas e Serro Azul no modelo HEC-RAS 5.0.3. Na Figura 68 pode ser visto um trecho no perfil longitudinal do rio Una e barragem Serro Azul na sua condição inicial de operação, enquanto a Figura 69 apresenta um trecho do rio Una entre a estação fluviométrica Capivara e a confluência do rio Pirangi, no instante de maior volume armazenado no reservatório.

Figura 68 – Trecho do perfil longitudinal do rio Una e barragem Serro Azul em sua condição inicial de operação.



Fonte: O autor, (2017)

Figura 69 – Trecho do perfil longitudinal do rio Una e barragem Serro Azul em nível máximo de acumulação durante a simulação do evento de chuva de 2010.



Fonte: O autor, (2017)

Na modelagem hidrodinâmica pode haver instabilidades de causas diversas, sendo as simulações de períodos secos ou com vazões baixas, trechos de grandes declividades, espaçamento entre seções transversais ou os valores do coeficiente de Manning algumas das possíveis causas de simulações instáveis. Considerando que este é um trabalho de continuidade de estudos, obteve-se a maior parte dessas variáveis bem definidas para a modelagem do rio Una, segundo trabalhos de Ribeiro Neto, Cirilo & Dantas (2011) [38]; Dantas, (2012) [39]; Almeida (2013) [21]; Silva (2015) [40]; Ribeiro Neto et al. (2015) [110].

Ainda assim, a inclusão das barragens traz um novo cenário em relação à estabilidade global do modelo hidrodinâmico. De maneira geral, as simulações com barragens tendem a ser mais estáveis por haver perda de energia e consequente diminuição das velocidades. No entanto, cabe ressaltar que nas seções logo a jusante dos reservatórios, podem ocorrer instabilidades devido às baixas vazões de descarga ou variação brusca entre a descarga da barragem e vazão de contribuição lateral dos rios afluentes.

No caso das baixas vazões na saída dos reservatórios, a solução adotada foi manter os dispositivos de descarga de fundo sempre abertos de maneira a funcionarem como descarga livre. Para a barragem Serro Azul, a seção logo a jusante do reservatório recebe a contribuição do rio Camevô, o que aparentemente gera inconsistência quando é calculada a vazão de descarga através da equação de orifício. Como solução, a contribuição do rio Camevô foi inserida na seção transversal mais a jusante.

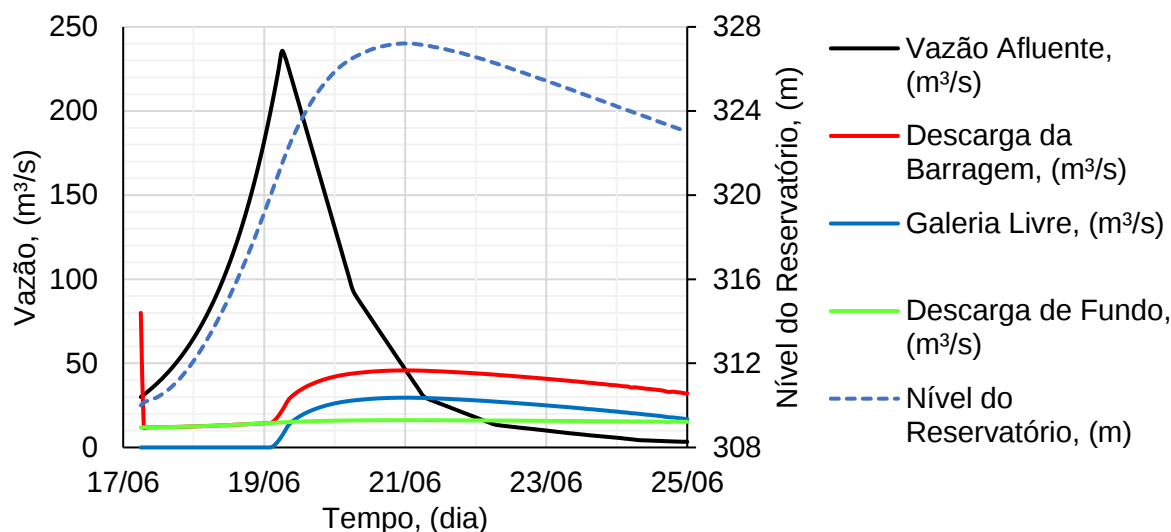
Após a simulação hidrodinâmica nos reservatórios, são gerados resultados da variação de nível do rio e vazão para cada seção transversal do modelo. Para o caso das seções onde as barragens foram inseridas, pode-se visualizar a variação de nível do reservatório e as vazões de cada dispositivo de descarga como descargas de fundo, galerias livres e vertedouros. A descarga da barragem é considerada como sendo o somatório das descargas destes dispositivos.

As Figuras 70, 71 e 72 apresentam resultados para a simulação das três barragens de controle de cheias na bacia do Una, considerando as vazões afluentes e descargas de cada reservatório. O resumo de descargas da barragem Igarapeba é apresentado na Figura 70. A condição de contorno com a vazão inicial foi adotada em $80 \text{ m}^3/\text{s}$ para esta simulação, onde pode ser visto que esta é a vazão inicial num primeiro instante, e já no instante de tempo seguinte, a vazão é estabilizada em aproximadamente $10 \text{ m}^3/\text{s}$.

Para a barragem Igarapeba, a vazão máxima afluente foi de $235,5 \text{ m}^3/\text{s}$, enquanto que a vazão de descarga máxima foi de $45,8 \text{ m}^3/\text{s}$, resultando num amortecimento da vazão de pico de 80,6%. Até às 4h do dia 19 de junho, a descarga da barragem era apenas referente à descarga de fundo, onde a partir desse instante começa a contribuição da vazão proveniente da galeria livre.

Na simulação da barragem Igarapeba, o nível de acumulação de água não chegou até o vertedouro, não havendo também contribuição das descargas dos vertedouros para nenhuma das outras barragens simuladas. No início da simulação a barragem estava apenas com 8,3% de sua capacidade, chegando até 38,3% do volume de armazenamento.

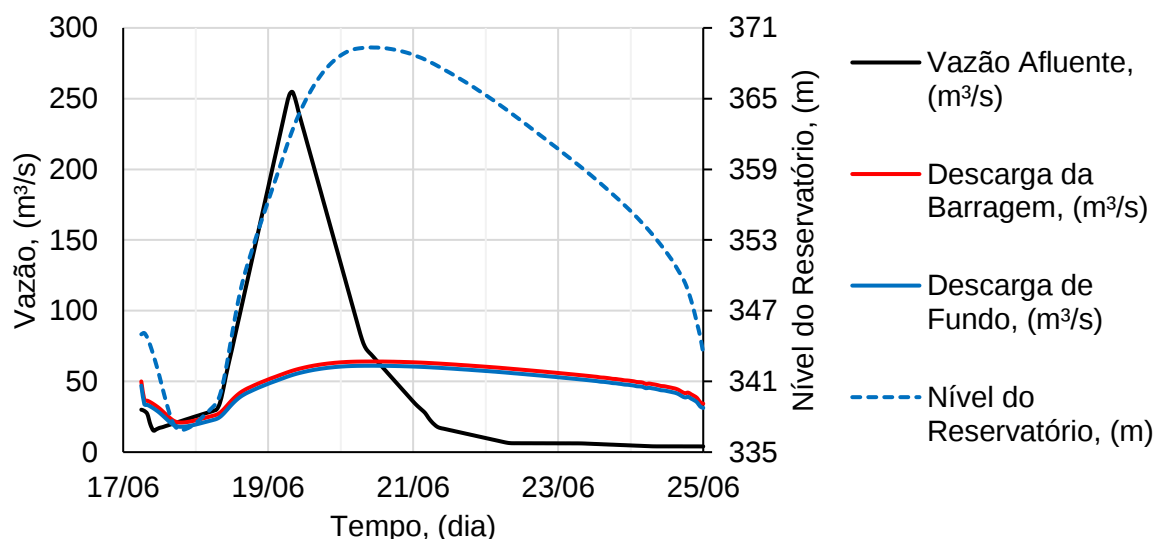
Figura 70 – Resumo de descargas da barragem Igarapeba na cheia de 2010.



Fonte: O autor, (2017)

A Figura 71 mostra a simulação da barragem Panelas: a vazão afluente máxima foi de 254,8 m³/s, enquanto que a vazão máxima a jusante do reservatório foi de 64,1 m³/s, havendo redução de 74,8% da vazão de pico quando comparado ao hidrograma sem barragem. Neste reservatório não existe galeria livre, sendo a descarga da barragem igual à descarga de fundo do reservatório. O volume de água afluente ao reservatório é da ordem de 35 hm³, sendo que durante a simulação o armazenamento máximo foi de 12,9 hm³, o que corresponde a 45,8% da capacidade máxima da barragem.

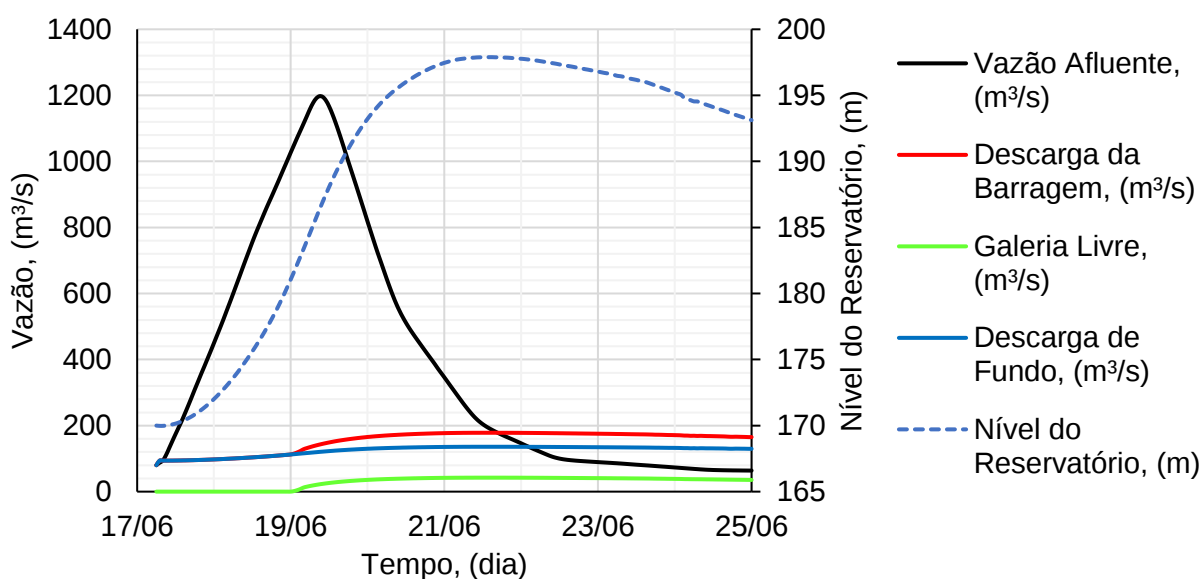
Figura 71 – Resumo de descargas da barragem Panelas na cheia de 2010.



Fonte: O autor, (2017)

Por ter localização geográfica e volume de armazenamento de maior relevância, Serro Azul é a barragem mais importante do sistema de controle de cheias da bacia do rio Una. O resumo de descargas da barragem Serro Azul pode ser visto na Figura 72, onde pode-se verificar que a vazão máxima afluente simulada no evento seria de 1.197,5 m³/s, vindo a ter uma descarga máxima efluente de 178,3 m³/s, o que representa uma redução da vazão de pico de 85,1%.

Figura 72 – Resumo de descargas da barragem Serro Azul na cheia de 2010.



Fonte: O autor, (2017)

Considerando que o volume da barragem Serro Azul no início da simulação foi de 63,4 hm³ e às 2h do dia 21 de junho o volume armazenado seria 247,5 hm³, o que corresponde a 81,5% da capacidade do reservatório, ressalta-se a importância do monitoramento dos eventos extremos de maneira a garantir a perfeita operação do sistema de controle de cheias.

A Tabela 15 apresenta para cada barragem o resumo dos volumes de acumulação máxima, volumes no início e no instante de maior acumulação durante as simulações, em milhões de metros cúbicos e em percentual. A Tabela 16 apresenta as vazões máximas afluentes de cada barragem, a vazão máxima de descarga no evento simulado e o percentual de redução da vazão.

Tabela 15 – Volume acumulado nas barragens durante simulação da cheia de 2010.

Barragem Simulada	V _{máx} (hm ³)	V _{inicial} (hm ³)	V _{inicial} (%)	V _{final} (hm ³)	V _{final} (%)
Igarapeba	87,7	7,3	8,3	33,6	38,3
Panelas	28,2	1,2	4,2	12,9	45,8
Serro Azul	303,0	63,4	20,9	247,0	81,5

Fonte: O autor, (2017)

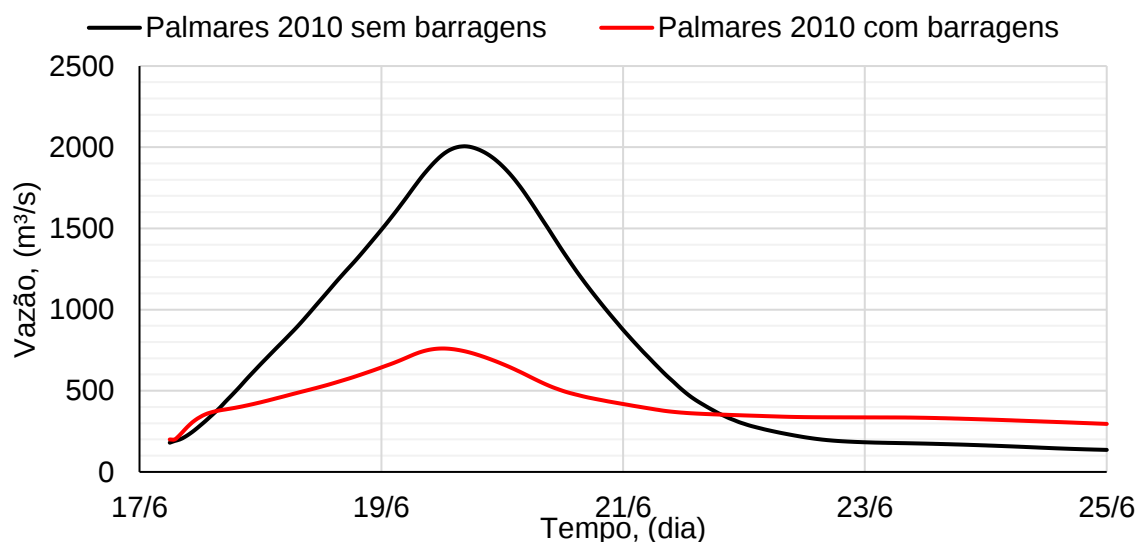
Tabela 16 – Amortecimento de cheia para configuração das barragens simuladas.

Barragem Simulada	Q _{afluente,máx} (m ³ /s)	Q _{descarga,máx} (m ³ /s)	Amortecimento (%)
Igarapeba	235,5	45,8	80,6
Panelas	254,8	64,1	74,8
Serro Azul	1.197,5	178,3	85,1

Fonte: O autor, (2017)

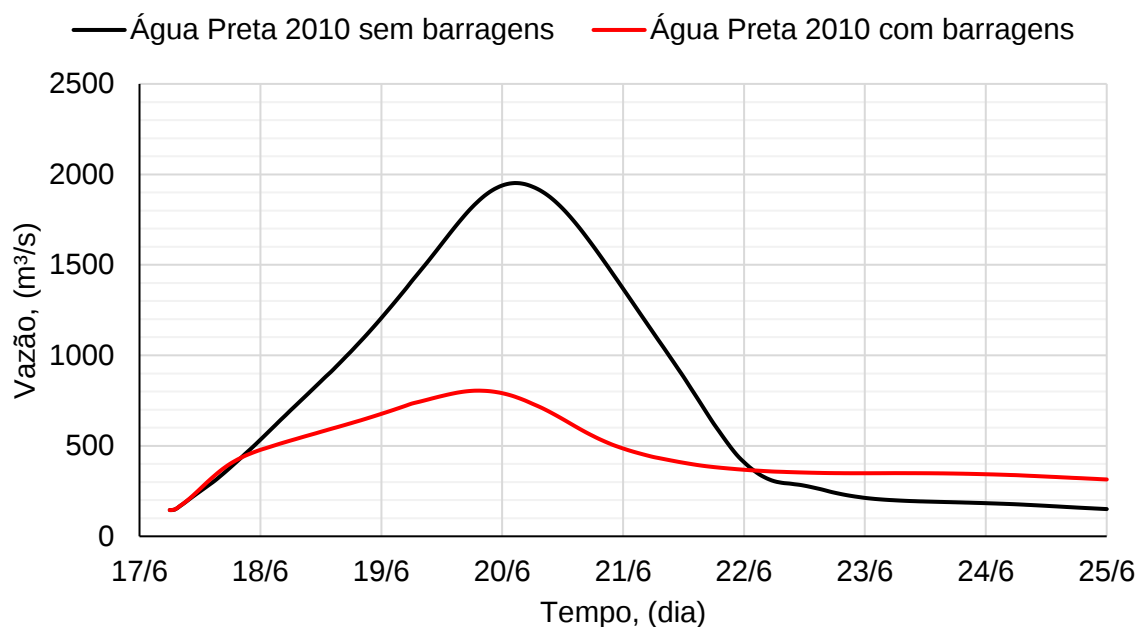
O efeito das barragens é propagado por todos os trechos de rios a jusante dos reservatórios e a redução da vazão nas cidades atingidas por enchentes, o principal objetivo da implantação do conjunto de barragens para controle de cheias. O modelo hidrodinâmico permite identificar e comparar os hidrogramas afluentes nas áreas urbanas afetadas, com e sem os efeitos das barragens. As Figuras 73, 74 e 75 apresentam, respectivamente, os comparativos dos hidrogramas imediatamente a montante das áreas urbanas dos municípios de Palmares, Água Preta e Barreiros.

Figura 73 – Hidrogramas a montante da área urbana de Palmares para simulação de 2010 com e sem os efeitos das barragens de controle de cheias.



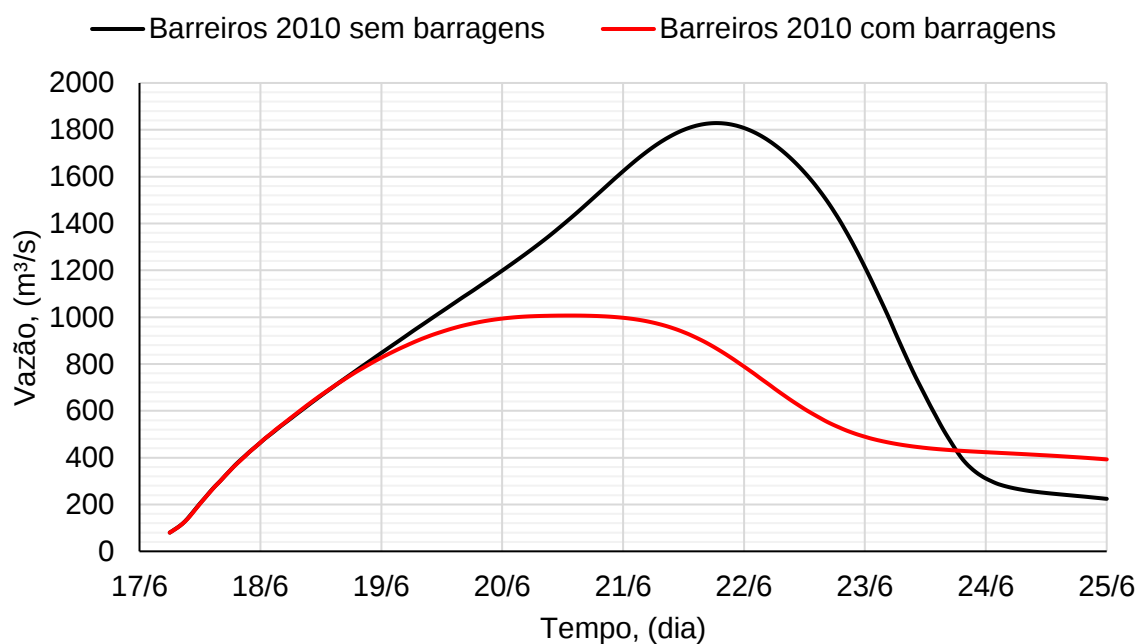
Fonte: O autor, (2017)

Figura 74 – Hidrogramas a montante da área urbana de Água Preta para simulação de 2010 com e sem os efeitos das barragens de controle de cheias.



Fonte: O autor, (2017)

Figura 75 – Hidrogramas a montante da área urbana de Água Preta para simulação de 2010 com e sem os efeitos das barragens de controle de cheias.



Fonte: O autor, (2017)

De modo geral percebe-se que a redução de vazão imediatamente a jusante dos reservatórios foi significativamente propagada até as cidades. Assim como apresentado na Tabela 17, a maior redução de vazão ocorreu no município de Palmares, onde na simulação com barragens foi estimada uma vazão de pico 62% menor que a situação sem barragens. O município de Água Preta está a uma distância de apenas 15 quilômetros de Palmares, havendo sido encontrados resultados bem próximos nas duas cidades. Por outro lado, em Barreiros, foi estimado que com as barragens a vazão máxima seria de 1.006 m³/s, representando uma redução de 45% da vazão de pico.

Tabela 17 – Amortecimento das cheias de 2010 nas áreas urbanas dos municípios de Palmares, Água Preta e Barreiros após construção de barragens.

Município	Q _{máx} , sem barragem (m ³ /s)	Q _{máx} , com barragem (m ³ /s)	Amortecimento da vazão de pico (%)
Palmares	2.005	759	62
Água Preta	1.952	761	61
Barreiros	1.828	1.006	45

Fonte: O autor, (2017)

Mesmo sendo observada redução significativa nas cidades, ainda não é possível garantir que os problemas com enchentes estejam resolvidos. A explicação se deve à extensa área a jusante das barragens, onde a contribuição em marcha do escoamento se mantém durante os eventos extremos. No caso de Barreiros, a cidade mais distante, há o agravante da contribuição do rio Jacuípe.

Para tal verificação, optou-se por realizar simulações hidrodinâmicas bidimensionais para visualização espacial no terreno das vazões estimadas para o evento de 2010 com e sem barragens.

4.4. Modelagem hidrodinâmica bidimensional em áreas urbanas

Atualmente o Estado de Pernambuco possui seu relevo conhecido em detalhes por meio dos produtos cartográficos obtidos através do Programa Pernambuco Tridimensional – PE3D. Com a nova base de dados disponíveis no PE3D e a inovação dos programas computacionais para modelagem e simulações hidráulicas, é possível utilizar esses dados de excelente qualidade, provendo novos recursos e técnicas que até então não podiam ser utilizadas.

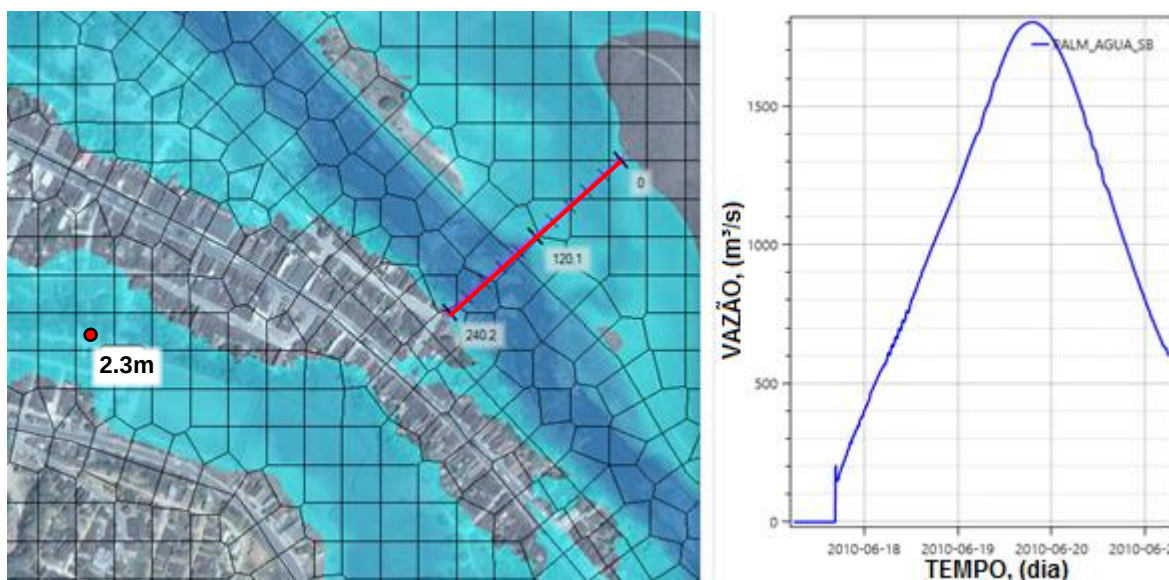
A modelagem hidrodinâmica bidimensional, até então, não faz parte do Modelo Avançado de Prevenção de Enchentes – MAVEN. No entanto, com base nos resultados apresentados a seguir, este método também poderá fazer parte das funcionalidades do sistema.

Quanto ao tempo de simulação, destaca-se que o processamento das simulações do escoamento bidimensional é extremamente maior que na situação unidimensional, sendo que para as áreas estudadas o tempo de processamento foi da ordem de 20 minutos, variando significativamente em função das dimensões das células e do período simulado.

Em relação à estabilidade do modelo, coloca-se que o processo bidimensional, embora mais sofisticado quanto ao detalhamento do terreno e método de cálculo, é um processo mais simples e rápido de ser realizado. Nas simulações bidimensionais realizadas neste trabalho, não foram identificadas instabilidades que impedissem a geração dos resultados.

Quanto aos resultados, a partir das simulações realizadas é possível identificar facilmente a vazão de qualquer seção desenhada na malha de células, o limite e a profundidade das áreas inundadas, a velocidade e a direção das linhas de fluxo. Tais resultados podem ser visualizados em forma de gráficos, tabelas ou mapas de inundação, conforme ilustrado nas Figuras 76, 77 e 78.

Figura 76 – Malha de células da simulação bidimensional, gráfico de vazão de seção transversal e profundidade de um ponto na área urbana de Água Preta.



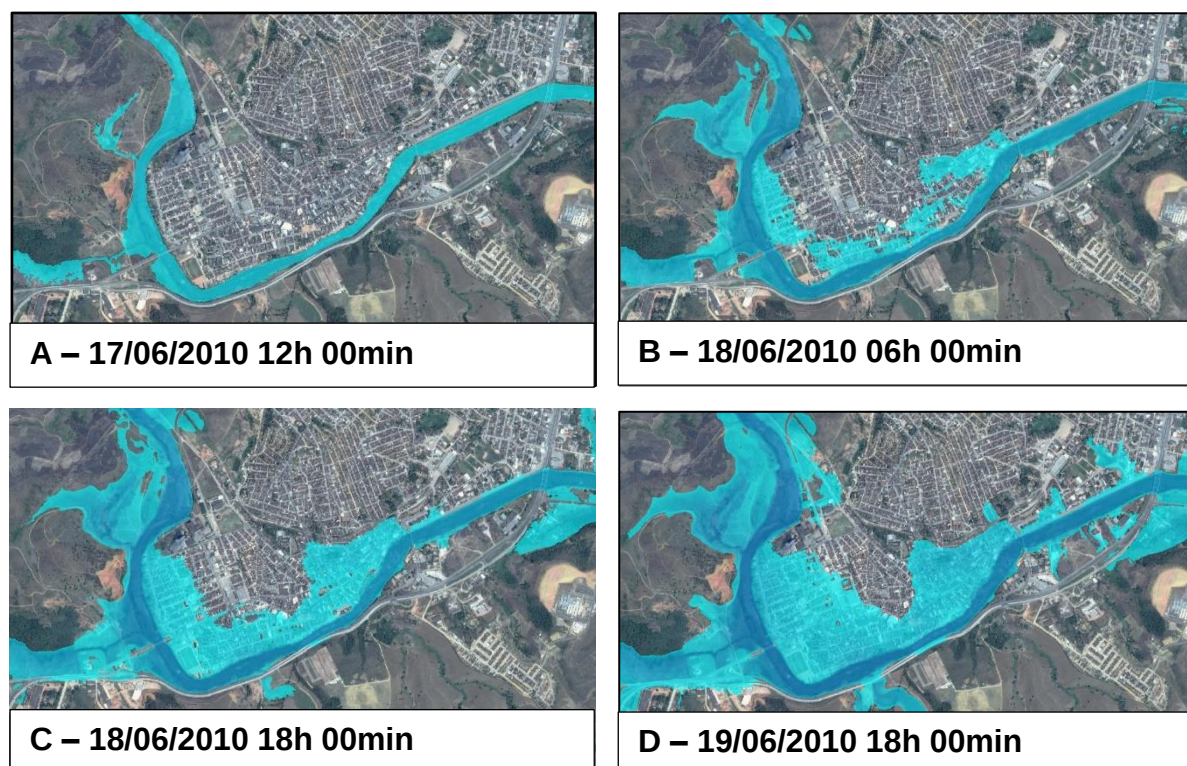
Fonte: O autor, (2017)

A Figura 77 apresenta cenários de inundação da área urbana de Palmares em quatro instantes de tempo. A variação destes cenários também pode ser visualizada em formato de vídeo, o que permite acompanhar a expansão da inundação a cada passo de simulação, sendo um recurso visual que traz clareza a qualquer espectador que pretenda acompanhar o efeito ocorrido.

Já na Figura 78 é apresentado um mapa com linhas de direção, sentido e variação espacial da velocidade da água. O mapa de velocidade é também uma ferramenta adicional que pode revelar detalhes das inundações (nos pontos A, B e C pode-se observar regiões com maior velocidade). Presume-se que no ponto A e B ocorram estreitamentos naturais do terreno, enquanto no ponto C a redução de seção de escoamento ocorre devido à existência de uma ponte. Adicionalmente, alerta-se para a área onde se localiza o ponto B, onde existe inundação de áreas urbanas e ocorrência de velocidades mais altas.

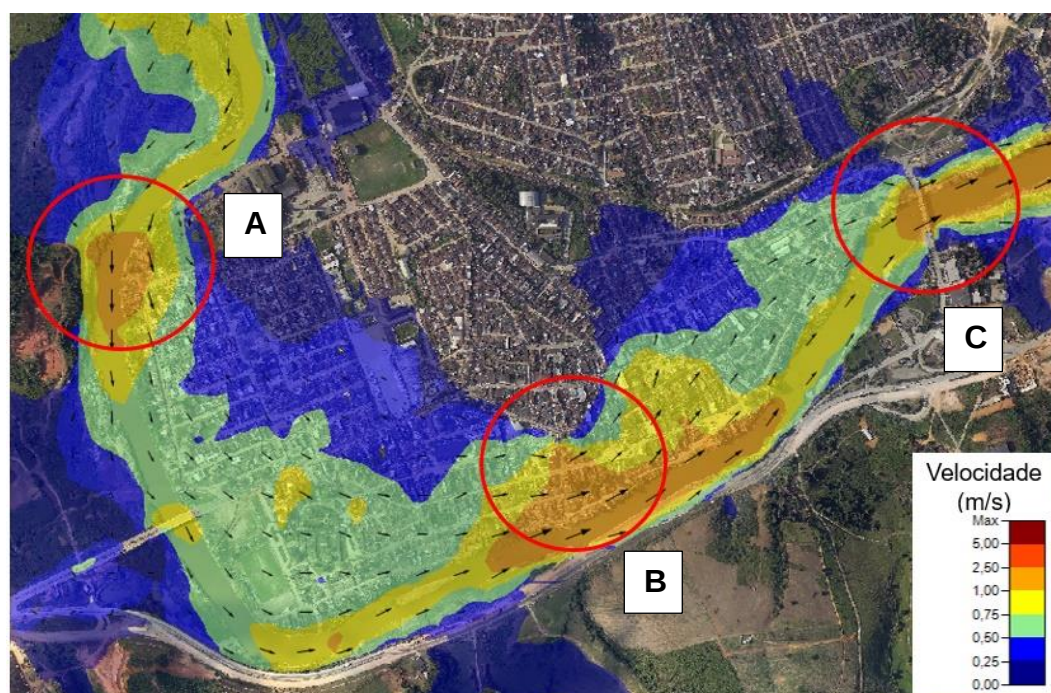
Na sequência, as Figuras 79 a 84 apresentam mapas de inundação gerados a partir da vazão máxima das simulações com e sem barragens para Palmares, Água Preta e Barreiros.

Figura 77 – Resultados da simulação hidrodinâmica bidimensional para o evento de 2010 sem barragens, na área urbana de Palmares.



Fonte: O autor, (2017)

Figura 78 – Variação da direção e intensidade da velocidade ao longo da área urbana de Palmares.



Fonte: O autor, (2017)

A Figura 79 apresenta a área de inundação estimada pela vazão máxima no evento de 2010, em Palmares. Destaca-se a grande proporção de cidade que foi atingida, havendo diversas residências completamente submersas pela água. Observa-se ainda que as rodovias e pontes de acesso à cidade foram submersas, impossibilitando a mobilidade durante, e até mesmo após, o evento, uma vez que algumas pontes foram destruídas.

A Figura 80 apresenta o cenário para o mesmo evento de 2010 considerando o efeito das barragens de controle de cheias. Destaca-se no ponto A, próximo de onde foram realizados os serviços de readequação da calha do rio Una, não foram identificados transbordamentos da calha, sendo possível identificar como positivo o trabalho realizado.

Próximo aos pontos B e D, observa-se que a calha do rio transborda a montante das pontes existentes, onde se faz um alerta para o detalhamento destas estruturas no modelo de modo a garantir as condições reais de campo ou para o fato de que a construção das pontes tenha criado um estreitamento na seção do rio. O ponto C deve ser visto como uma das áreas de Palmares mais propensas à ocorrência de inundações, sendo essa área a primeira região afetada quando ocorrem transbordamentos da calha do rio.

A Figura 81 apresenta a simulação na área urbana de Água Preta durante a vazão máxima do evento de 2010, sem as barragens. Neste município destaca-se que existem vários pontos onde facilmente ocorrem alagamentos. Em parte dessas áreas não existem edificações, mas em 2010, o nível avançou até inundar várias residências.

A Figura 82 apresenta a simulação na área urbana de Água Preta durante a vazão máxima do evento de 2010, com as barragens. Analisando este mapa de inundação, percebe-se que no trecho localizado entre os pontos A e B deixaram de ocorrer inundações.

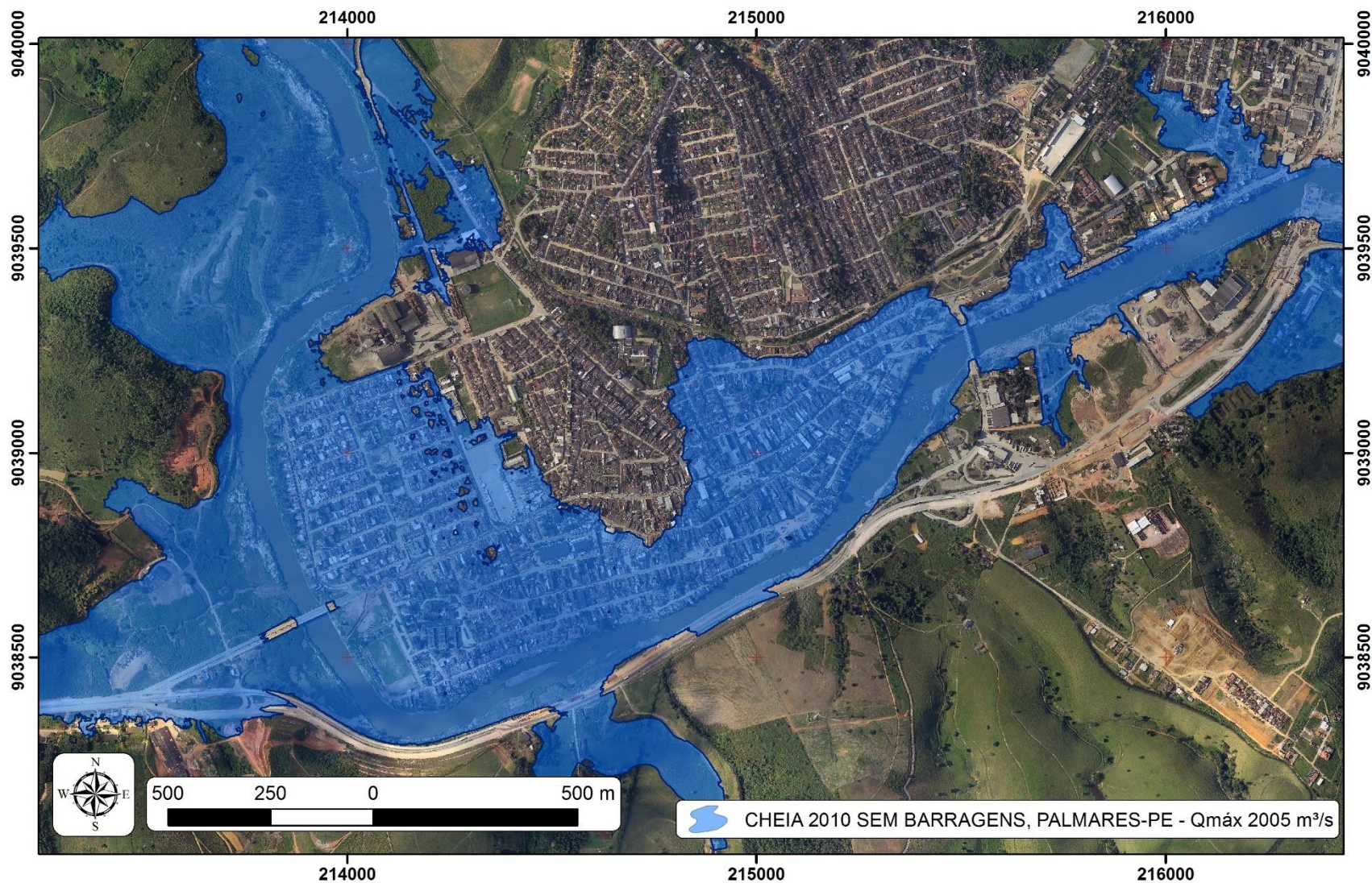
Em Água Preta, a partir do ponto B, ocorrem inundações nas margens esquerda e direita do rio. Na margem esquerda não foi identificada nenhuma edificação, enquanto nas áreas da margem direita, próximo aos pontos B e C, ainda existe a possibilidade de alguma casa ser atingida caso um evento de intensidade semelhante à ocorrida em 2010 se repita. De modo geral, o município de Água Preta encontra-se livre de inundações na maior parte de sua área, devendo haver rigoroso planejamento territorial de modo a evitar ocupações das áreas de risco.

O cenário de inundação do município de Barreiros, para o evento de 2010 sem barragens, pode ser visto na Figura 83. A simulação retrata a situação catastrófica acontecida, onde quarteirões residenciais são completamente submersos pelas águas do rio Una. Em Barreiros ocorreu que algumas áreas da cidade ficaram ilhadas, e novamente se faz menção à existência de uma estrada e uma ponte que tiveram os eixos elevados o suficiente para não serem inundadas, mas provocaram estreitamento da calha do rio.

Por fim, no caso do cenário do município de Barreiros, considerando os efeitos das barragens de controle de cheias, conforme pode ser visto na Figura 84, observa-se que as áreas localizadas entre os pontos A e B deixariam de sofrer inundações. No entanto, o trecho entre os pontos B e D voltariam a ter inundações, embora em proporções bem menores que a situação sem barragens.

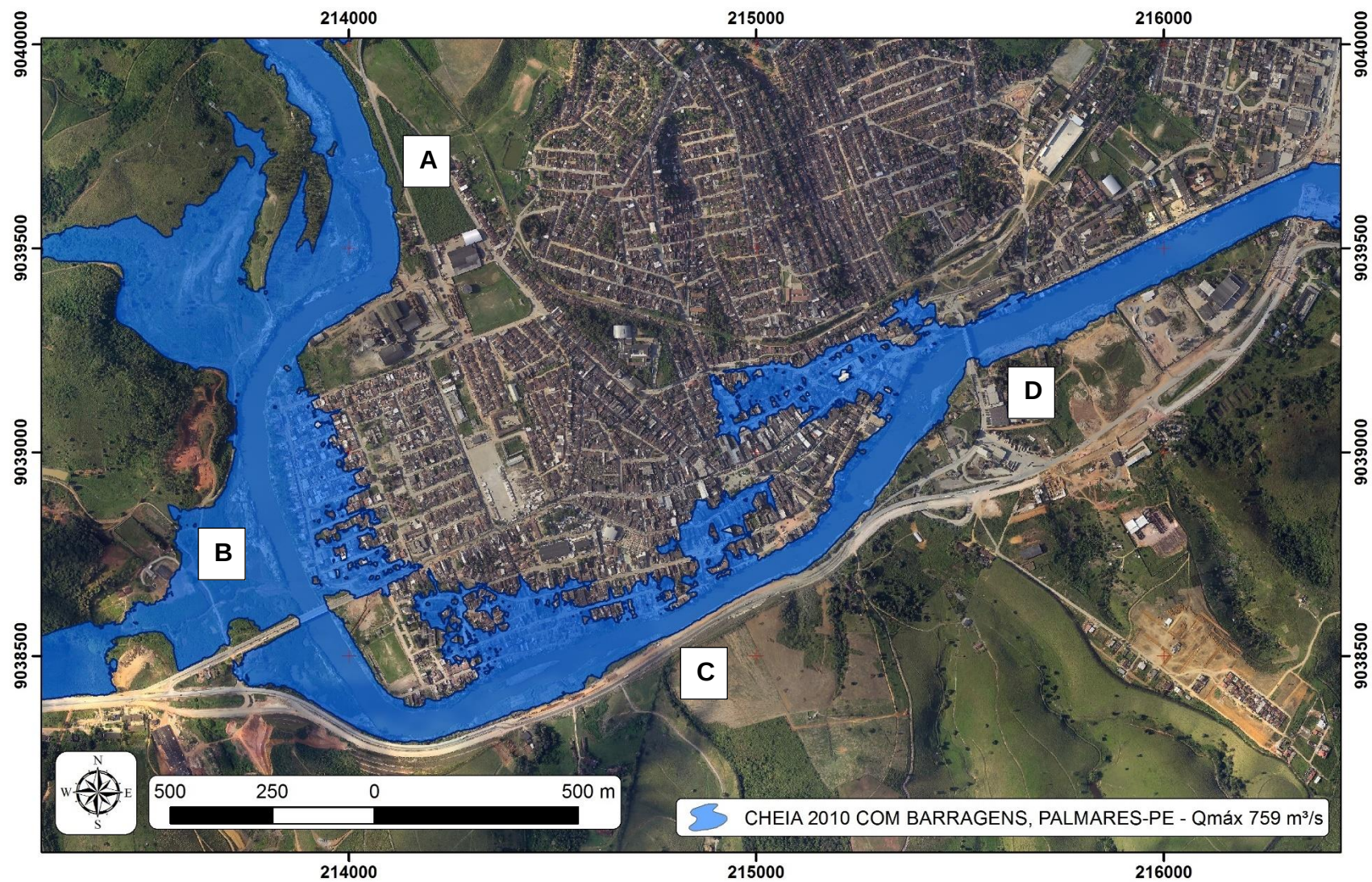
Percebe-se que a contribuição do afluente da margem direita do rio causa transbordamento, havendo também uma pequena ponte próxima ao ponto B, que no Modelo Digital do Terreno é representada com uma seção muito estreita. De modo a assegurar que as inundações no trecho BC realmente ocorrerão como foi simulado, deveria haver visita de campo para constatação de informações do terreno neste ponto.

Figura 79 – Mapa de inundação de área urbana de Palmares-PE, cheia de 2010 sem barragens.



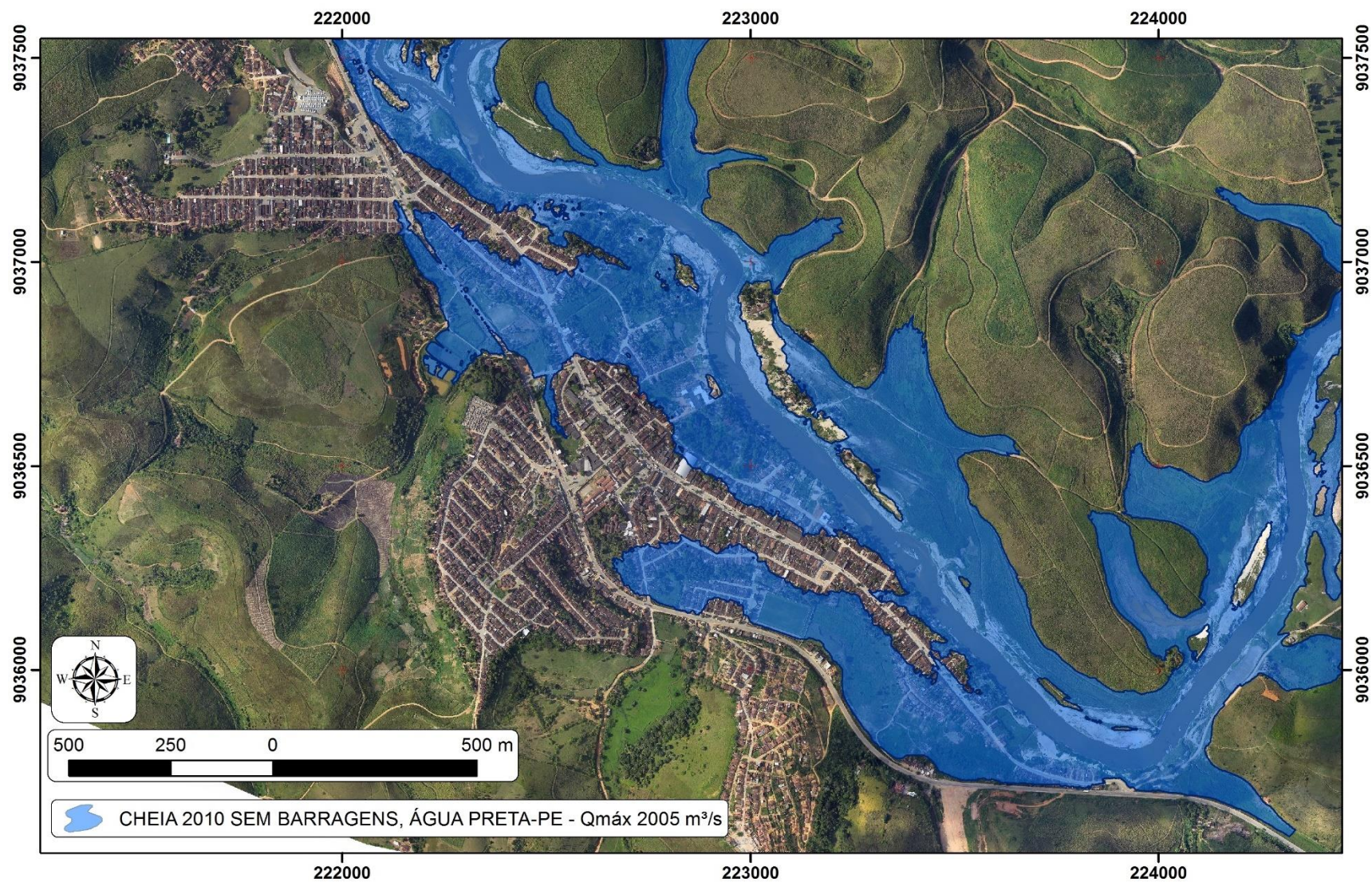
Fonte: O autor, (2017)

Figura 80 – Mapa de inundação de área urbana de Palmares-PE, cheia de 2010 com barragens.



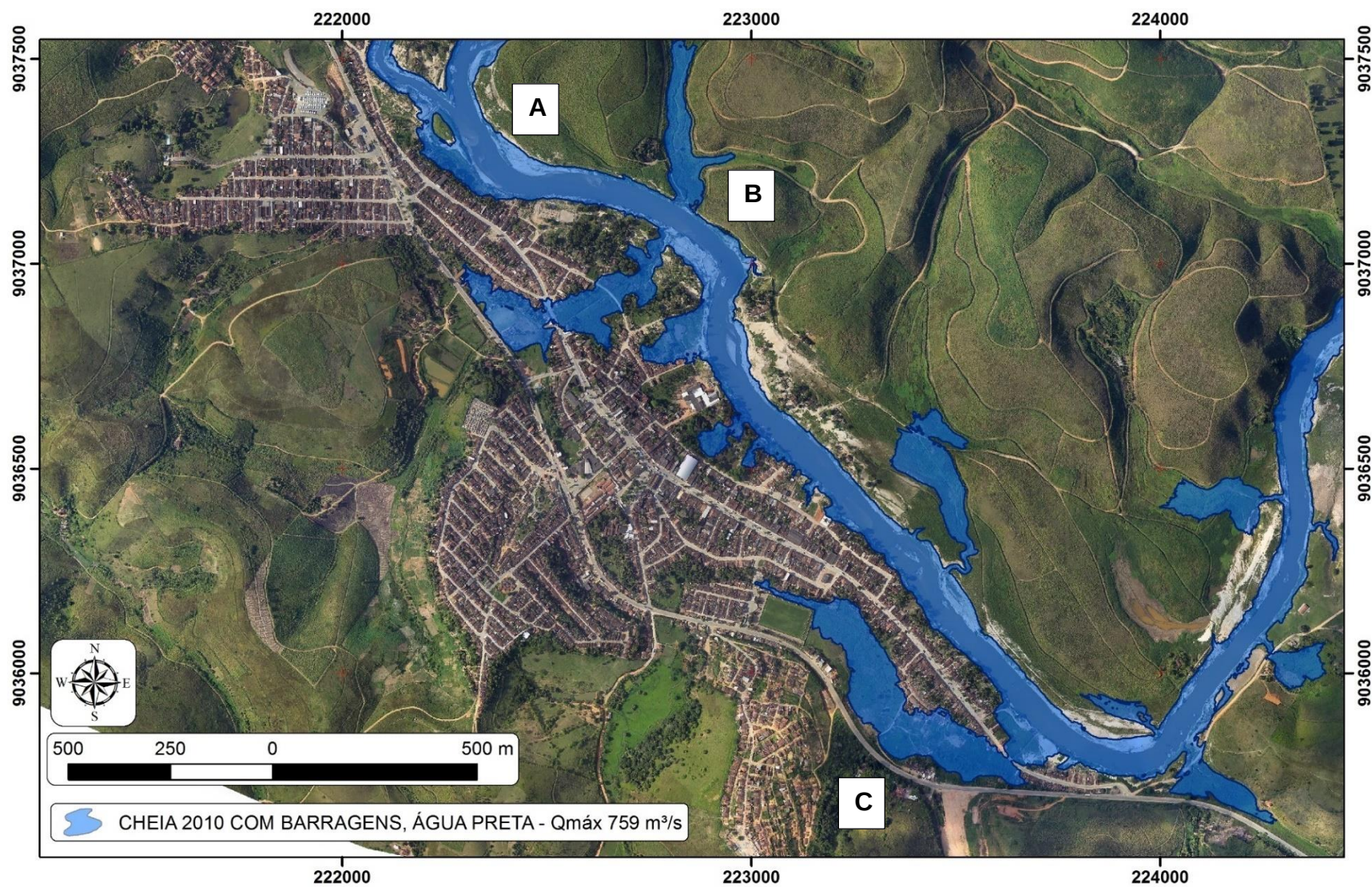
Fonte: O autor, (2017)

Figura 81 – Mapa de inundação de área urbana de Água Preta-PE, cheia de 2010 sem barragens.



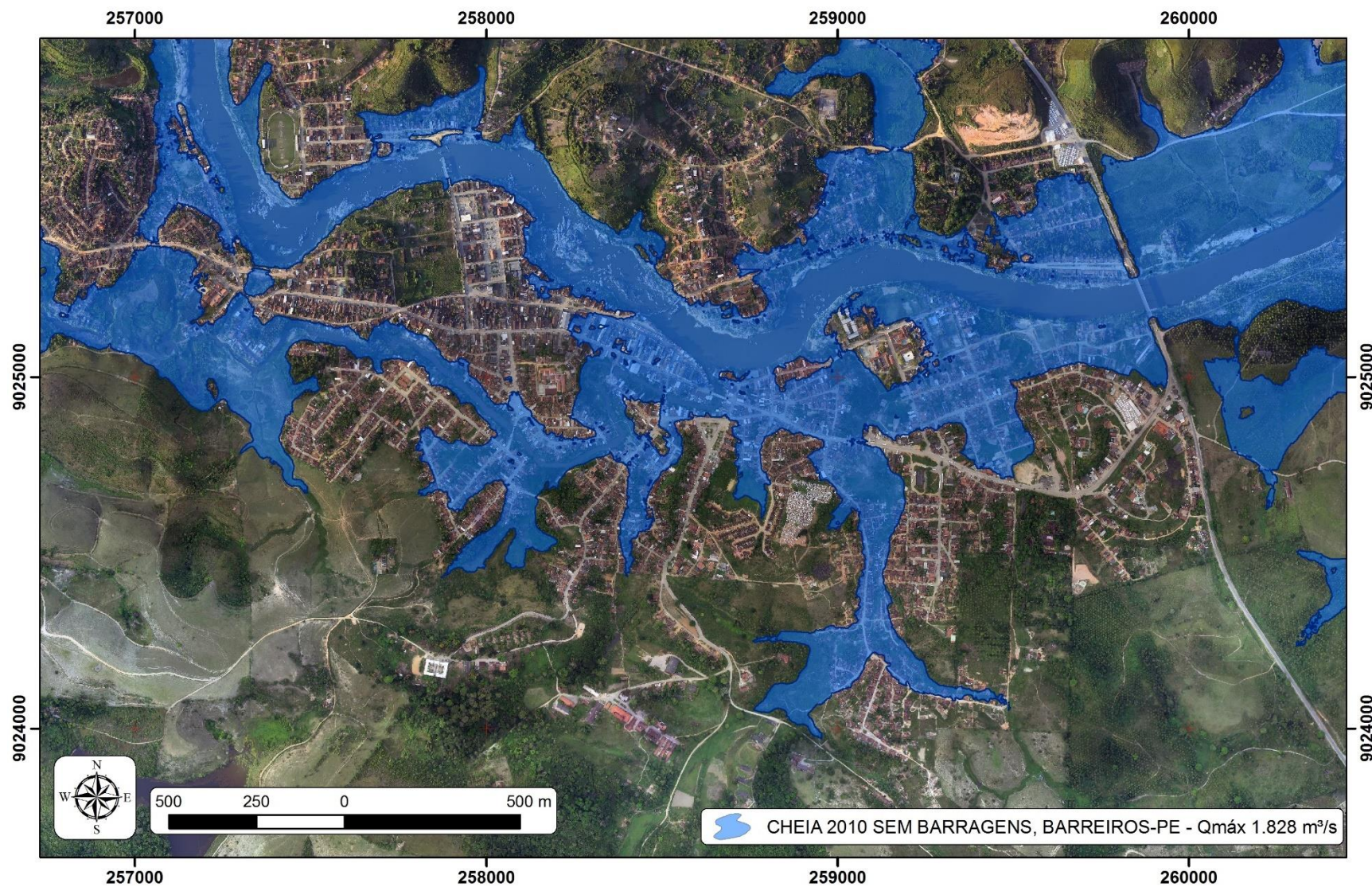
Fonte: O autor, (2017)

Figura 82 – Mapa de inundação de área urbana de Água Preta-PE, cheia de 2010 com barragens.



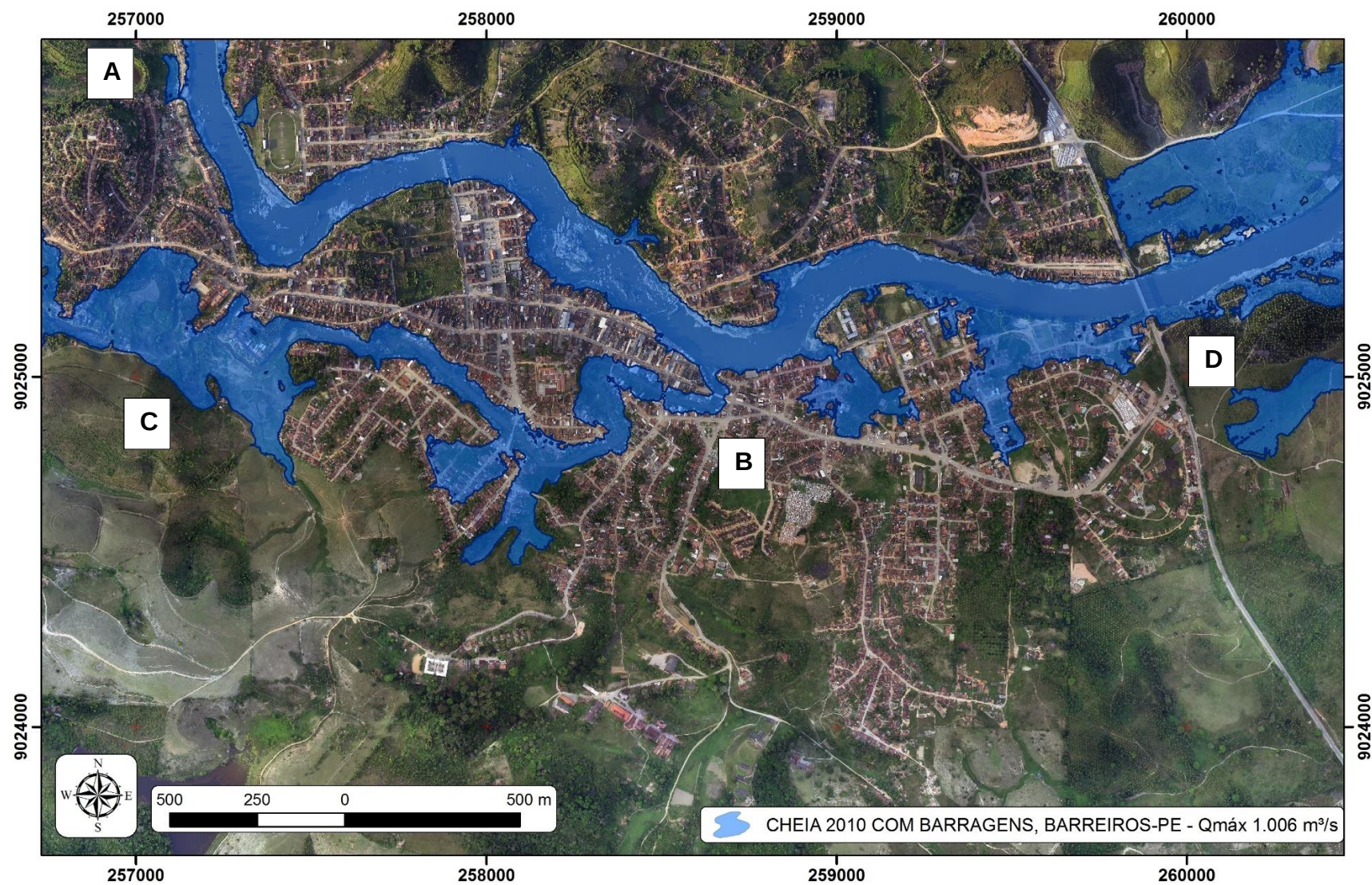
Fonte: O autor, (2017)

Figura 83 – Mapa de inundação de área urbana de Barreiros-PE, cheia de 2010 sem barragens.



Fonte: O autor, (2017)

Figura 84 – Mapa de inundação de área urbana de Barreiros-PE, cheia de 2010 com barragens.



Fonte: O autor, (2017)

4.5. Considerações sobre a recorrência de inundações e a operação dos reservatórios

O sistema de barragens para controle de cheias na bacia do Una trará imensuráveis benefícios à população que vive às margens dos rios Panelas, Pirangi e Una, onde a redução dos efeitos das cheias irá evitar perdas de edificações públicas e privadas, elementos de infraestrutura urbana e principalmente vidas humanas.

No entanto, cabe ressaltar que a construção das barragens não traz a solução completa dos problemas de enchentes na bacia do rio Una. As barragens devem ser vistas pela sociedade como um benefício e como um reforço à segurança de quem está diariamente exposto a perder tudo que foi construído em uma vida de trabalho.

Faz-se também um alerta para que a sensação de segurança não deixe a população e o poder público desatentos às medidas de prevenção e controle das cheias, por mais que se saiba as dificuldades de implantar tais medidas, como o controle da expansão urbana. As áreas de maior risco de enchentes nos municípios de Palmares, Água Preta e Barreiros foram delimitadas neste trabalho e devem ser periodicamente monitoradas. Parte das edificações situadas nas margens dos rios nos perímetros urbanos deve ser efetivamente desocupada, visto que continuam sujeitas à destruição por inundações.

As barragens de controle de cheias foram projetadas individualmente e neste trabalho se observa o efeito das enchentes após à construção dos reservatórios operando de maneira integrada. Considerando os resultados apresentados, constata-se que estudos adicionais devem ser realizados para definir as regras de operação das barragens.

Sensatamente, as barragens foram projetadas para usos múltiplos, sendo o reforço de abastecimento de água uma demanda que não poderia ser deixada de lado. No entanto, principalmente ao considerar os resultados da simulação da barragem Serro Azul, observa-se que no início da simulação, o volume do reservatório era de 63,4 hm³

e durante a simulação chegou a armazenar até 247,0 hm³, ou seja, houve um acréscimo de 183,6 hm³.

Dos 303 hm³ da barragem Serro Azul, cerca de 100 hm³ são previstos para destinação ao abastecimento humano e cerca de 200 hm³ reservados para controle de cheias. A partir da cota 181 existe uma galeria livre para que o volume de espera de cheias seja sempre liberado. No entanto, considerando que mesmo sem a barragem estar com descargas pelo vertedouro principal, as áreas urbanas de Palmares e barreiros ainda poderiam de alguma forma ser afetadas caso o evento de 2010 se repetisse, deve-se controlar o nível da barragem no início da estação chuvosa de modo que preferencialmente ocorra o menor acréscimo de vazão possível proveniente dos vertedouros.

Considerando que a barragem Serro Azul foi simulada abaixo do nível aceitável para o amortecimento de cheias, e que se a mesma estivesse no nível dos 100 hm³, o volume máximo acumulado seria da ordem de 280 hm³. Um novo alerta se faz ao saber que, ao armazenar 280 hm³, haveria maior descarga da galeria livre e também haveria contribuição adicional dos vertedouros.

Sendo assim, constata-se que estudos detalhados para definição de regras de operação dos reservatórios de controle de cheias na bacia do rio Una devem ser realizados com brevidade, de modo a minimizar qualquer dano que ainda possa ocorrer aos municípios localizados em áreas de risco.

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1. Conclusões

Com base nas análises e simulações voltadas para o comportamento hidrológico e hidrodinâmico da bacia do rio Una realizados neste trabalho, pode-se concluir que:

- Os dados da precipitação prevista a partir dos modelos de previsão numérica ETA 40 Km e APAC 9 Km não apresentaram resultados satisfatórios que permitissem a utilização integrada em modelos hidrológicos e hidrodinâmicos. As diferenças encontradas entre os valores da precipitação média na bacia do Una, no evento de 2010, foram de aproximadamente seis vezes a precipitação média observada nos postos pluviométricos. Além disso, pode haver deslocamento planimétrico de até 49 Km do ponto de maior intensidade de chuva. Padrões de erro para correção dos dados não foram observados.
- O modelo hidrológico desenvolvido no HEC-HMS 4.0, recebeu melhorias, em relação à versão calibrada no MAVEN 1.0, de modo a modificar a distribuição de vazão ao longo da bacia. Na fase de calibração, o valor médio do coeficiente de *Nash Sultcliffe*, nos postos fluviométricos utilizados, teve melhoria discreta variando de 0,61 para 0,65. No entanto, observando períodos de simulações anuais fica evidenciada a estabilidade do modelo, quando deixam de ocorrer vazões extremas geradas por baixas precipitações.
- O modelo hidrodinâmico unidimensional permitiu analisar os efeitos das barragens de controle de cheias na bacia do rio Una, considerando a repetição de um evento semelhante ao ocorrido em 2010. Foi identificado que o amortecimento da vazão de pico imediatamente a jusante dos reservatórios Igarapeba, Serro Azul e Panelas foi, respectivamente, de 80,6%, 74,8% e 85,1%. Nas cidades mais afetadas pelas cheias do rio Una, a redução de vazão de pico imediatamente a montante das áreas urbanas, foi de 62%, 61% e 45%, respectivamente em Palmares, Água Preta e Barreiros.

- A modelagem hidrodinâmica bidimensional permitiu visualizar as áreas urbanas inundadas para situação com barragens e sem barragens. Considerando a simulação do evento de chuva ocorrido em 2010 com as barragens de controle de cheias, verificou-se que em Água Preta os estragos provocados pelas enchentes chegam a ser quase anulados, no entanto algumas áreas ainda podem ser atingidas. Os municípios de Palmares e Barreiros terão sem dúvidas danos imensamente menores do que teriam se não existissem barragens, porém a recorrência de inundações ainda pode gerar impactos devidos à área não controlada a jusante das barragens, o que leva a necessidade de acompanhamento sistemático das áreas de risco e necessidade de promover desocupações de áreas ribeirinhas, como feito parcialmente em Palmares.
- A presença de pontes ao longo das cidades exerce influência significativa nos efeitos das inundações, levando a concluir que a inclusão dessas estruturas nas dimensões reais é relevante para melhorar a precisão dos resultados.
- Regras de operação dos reservatórios precisam ser definidas de modo a criar procedimentos pré-definidos de abertura de comportas. Diante da situação de possível recorrência de inundações, a barragem Serro Azul deverá ser operada de modo que a vazão incremental proveniente dos vertedouros seja evitada.

5.2. Recomendações para trabalhos futuros

A continuidade de estudos acadêmicos é um grande desafio quando visto que trabalhos subsequentes tendem a ter maior complexidade e requerem transferência do conhecimento adquirido no histórico de pesquisas de uma determinada área científica. No entanto, a continuidade traz ganhos que seriam muito mais difíceis de serem obtidos num trabalho desenvolvido a partir de sua fase inicial. Sendo assim, para novos trabalhos a serem desenvolvidos sobre modelagem hidrológica e hidrodinâmica na bacia do Una, recomenda-se que:

- Os dados do radar meteorológico operado pela APAC, disponíveis a partir de dezembro de 2016, devem ser avaliados e utilizados em novos estudos. Tais dados seguramente fornecem resultados mais próximos da realidade, quando observada a precisão dos aspectos quantitativos e posicionais, se comparados àqueles obtidos por meio de outros métodos de previsão, como os modelos meteorológicos. O principal desafio se refere à utilização desses dados de radar para acoplamento em tempo real aos modelos hidrológicos e hidrodinâmicos.
- Os dados do Pernambuco Tridimensional permitiram a realização de modelagem hidrodinâmica unidimensional ou bidimensional, no entanto, a modelagem hidrológica distribuída com dados de alta resolução é um campo a ser mais explorado no desenvolvimento de modelos hidrológicos.
- As atualizações feitas no modelo hidrodinâmico não contemplaram a inclusão da barragem dos Gatos, localizada em Lagoa dos Gatos. Embora esta tenha um volume bem inferior quando comparada às demais, e tenha sido considerado uma redução de vazão no afluente em que a mesma se localiza, recomenda-se que, em atualizações futuras, a barragem dos Gatos seja incluída no sistema. Além desta, outras barragens existentes que tenham relevância, como a barragem de Gurjão, em Capoeiras, do Prata, em Bonito e da futura barragem em São Bento do Una também devem ser inseridas.

- A qualidade das simulações hidrodinâmicas, considerando a situação onde se quer evitar transbordamento da calha do rio, requer detalhamento específico das pontes e demais estruturas como bueiros ou diques. Recomenda-se inserir todas as pontes existentes nos trechos de áreas urbanas onde se pretende definir áreas inundáveis. Para isso, deve-se obter em campo as dimensões geométricas exatas das estruturas, e sempre que possível, histórico de marcas de cheias nas seções transversais às pontes.
- A Lei nº 12.334 de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens, enquadra todas as barragens de controle de cheias da bacia do Una em um elevado dano potencial associado aos empreendimentos. Sendo assim, os estudos de rompimento de barragem, conhecidos como *Dam Break*, podem ser objetos de estudos acadêmicos para embasar o Plano de Ação Emergencial – PAE de cada reservatório.

Referências

- [1] SETTI, A.A.; LIMA, J.E.F.W.; CHAVES, A.G.M. & PEREIRA, I.C. 2001. **Introdução ao Gerenciamento de Recursos Hídricos**. 2ª edição. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL; Agência Nacional de Águas – ANA, 226p.
- [2] BARROS, F. G. N.; AMIN, M. M. **Água**: um bem econômico de valor para o Brasil e o mundo. *Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional*, v. 4, n. 1, p. 75- 108. Taubaté, 2008.
- [3] YASSUDA, E. R. Gestão de recursos hídricos: fundamentos e aspectos institucionais. **Revista de Administração Pública**, v.27, n.2, p.5-18, 1993. Disponível em: <http://bibliotecadigital.fgv.br/ojs/index.php/rap/article/view/8663/0>. Acesso em: 01 de fevereiro de 2016.
- [4] PORTO, M. F. A.; PORTO, R. La L. Gestão de bacias hidrográficas. **Estudos Avançados** [online]. vol. 22, n. 63, p. 43 - 60. 2008. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-40142008000200004. Acesso em: 01 de fevereiro de 2016.
- [5] BRASIL. Lei Federal nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. **Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989**. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L9433.htm>. Acesso em: 01 de fevereiro de 2016.
- [6] CIRILO, J. A.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; CAMPOS, J. N. B. A questão da água no semiárido brasileiro. In: BICUDO, C.E. de M; TUNDISI, J.G.; SCHEUENSTUHL, M.C.B.. (Org.). **Águas do Brasil análises estratégicas**. São Paulo: Instituto de Botânica, 2010. v. 1, p. 81-91.
- [7] TINGSANCHALI, T. Urban flood disaster management. **Procedia engineering**, v. 32, p. 25-37, 2012.
- [8] KAWAHATA, H. et al. Climatic change and its influence on human society in western Japan during the Holocene. **Quaternary International**, 2016.
- [9] LIN, Q. G. et al. Adaptation planning of community energy systems to climatic change over Canada. **Journal of Cleaner Production**, v. 143, p. 696-698, 2017.
- [10] ZHANG, P.; ZHANG, J.; CHEN, Minpeng. Economic Impacts of Climate Change on Agriculture: The Importance of Additional Climatic Variables Other than Temperature and Precipitation. **Journal of Environmental Economics and Management**, v. 83, p. 8-31, 2017.

- [11] MARENGO, J. A. et al. 2009. **Mudanças Climáticas e Eventos Extremos no Brasil**. Rio de Janeiro: FBDS, 76p.
- [12] JHA, A.K.; BLOCH, R. & LAMOND, J. 2012. **Cidades e inundações**. Um guia para a gestão integrada do risco de inundação urbana para o século XXI. Ed. Toro, J. & Pedroso, F.F. Banco Mundial e Global Facility for Disaster Reduction and Recovery (GFDRR). 54p.
- [13] CEPED. 2016. **Relatório de danos materiais e prejuízos decorrentes de desastres naturais no Brasil: 1995 – 2014**. Florianópolis: CEPED UFSC, 230 p.
- [14] BANCO MUNDIAL. 2012. **Avaliação de Perdas e Danos: Inundações Bruscas em Pernambuco - Junho de 2010**. Brasília: Executiva, 71p.
- [15] SCHMIDT, Danlán Martínes. 2014. **Dinâmica das configurações de formação e inibição das chuvas do Rio Grande do Norte**: caracterização hidroclimática do Estado. 136 f. Tese (Doutorado) – Centro de Ciência Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.
- [16] SANTOS, Leandro Diomério João dos. 2013. **Evolução morfodinâmica e antropogênica da unidade geomorfológica restinga no bairro do Recife Antigo-PE**. 150 f. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Ciências Geográficas, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.
- [17] MENDONÇA, F.; DANNI-OLIVEIRA, I. M. 2007. **Climatologia**: noções básicas e climas do Brasil. São Paulo: Oficina de Texto, 206 p.
- [18] SOUZA, E. B. de et al. **Desvios percentuais da precipitação na estação chuvosa do semi-árido nordestino durante os anos de el niño e la niña no pacífico tropical e fases do padrão de dipolo no atlântico tropical**. Divisão de Ciências Meteorológicas - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. 1997.
- [19] GEBER, B. de A. et al. Relação entre a precipitação do leste do Nordeste do Brasil e a temperatura dos oceanos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 4, p. 462-469, 2009.
- [20] ARAGÃO J.O.R. **O Impacto do ENSO e do Dipolo do Atlântico no Nordeste do Brasil**. Secretaria de Tecnologia e Meio Ambiente (SECTMA), Governo do Estado de Pernambuco. 1998.
- [21] ALMEIDA, Keyla Almeida dos 2010. **Modelagem do acompanhamento e controle de cheias em bacias hidrográficas de grande variação de altitude. Estudo de caso: Bacia do rio Mundaú**. 107f. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2010.
- [22] LAMEPE. **Previsão do Tempo e Monitoramento das Chuvas em Pernambuco e as imagens de satélite (15, 16 e 17/06/2010)**. Laboratório de Meteorologia de Pernambuco, Recife, 2010. 15p. Nota Técnica.

- [23] PERNAMBUCO. Lei nº 14.028, de 26 de março de 2010. **Cria a Agência Pernambucana de Águas e Clima – APAC, e dá outras providências.** Companhia Editorial de Pernambuco – CEPE, Recife, 2010.
- [24] TUCCI, Carlos Eduardo Morelli (Org.). **Hidrologia: ciência e aplicação.** 2ª ed. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 2001. 943 p. (Coleção ABRH de Recursos Hídricos, v. 4). ISBN 85-7025-298-6.
- [25] 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: 01 de fevereiro 2017.
- [26] O GLOBO. **PE 360 GRAUS:** Após a enchente, moradores de Barreiros, em Pernambuco, esperam por doações. Infoglobo Comunicação e Participações S.A, 2011. Disponível em: <<http://oglobo.globo.com/brasil/apos-enchente-moradores-de-barreiros-em-pernambuco-esperam-por-doacoes-2773219>>. Acesso em: 01 de fevereiro 2017.
- [27] PERNAMBUCO. 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.
- [28] 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.
- [29] 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: 01 de fevereiro de 2017. Website
- [30] 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: 05 de fevereiro de 2017. Website.
- [31] PERNAMBUCO. Casa Militar – CAMIL. **Palmares ganha Orla e duas novas pontes.** Recife, 2014. Disponível em: http://www.camil.pe.gov.br/web/casa-militar/exibir_noticia?groupId=18815&articleId=13941972&templateId=21622. Acesso em: 05 de fevereiro de 2017. Website.
- [32] G1. Caruaru e Região. **Em PE, G1 visita Palmares para ver o que mudou após enchentes de 2010.** Recife, 2015. <http://g1.globo.com/pe/caruaru-regiao/noticia/2015/06/em-pe-g1-visita-palmares-para-ver-o-que-mudou-apos-enchentes-de-2010.html>. Acesso em: 05 de fevereiro de 2017. Website.

- [33] ASCOM. Assessoria de Comunicação Casa Militar. **Ponte de Engenho Limeira**. Recife, 2014. Disponível em: http://www.camil.pe.gov.br/web/casa-militar/exibir_noticia?groupId=18815&articleId=13941972&templateId=21622. Acesso em: 05 de fevereiro de 2017.
- [34] PERNAMBUCO. Blog da Reconstrução. **Eduardo pede construção de sete barragens no PAC 2**. Recife, 2011. Disponível em: <http://operacaoreconstrucaope.blogspot.com.br/>. Acesso em: 05 de fevereiro de 2017.
- [35] PERNAMBUCO. Secretaria de Saúde – SES. **Hospital Regional de Palmares Sívio Magalhães**. Recife, 2011b. Disponível em: <http://portal.saude.pe.gov.br/unidades-de-saude-e-servicos/secretaria-executiva-de-atencao-saude/hospital-regional-de-palmares>. Acesso em: 05 de fevereiro de 2017.
- [36] PERNAMBUCO. Secretaria de Recursos Hídricos e Energéticos – SRHE. **Relatório de Ações 2007-2013**. Recife, 2013. 60p.
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] DANTAS, Carlos Eduardo de Oliveira. 2012. **Previsão e controle de inundações em meio urbano com suporte de informações espaciais de alta resolução**. 212f. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2012.
- [40] SILVA, Edilson Raimundo. 2015. **Modelagem Integrada para Controle de Cheias, Previsão e Alerta de Inundações: Estudo de Caso da Bacia do Rio Una em Pernambuco**. 144f. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015.
- [41] CIRILO, J. A.; ALVES, F. H. B.; SILVA, L. A. C. da; CAMPOS, J. H. A. L. Suporte de Informações Georreferenciadas de Alta Resolução para Implantação de Infraestrutura e Planejamento Territorial. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 7, n. 4, p. 755-763, 2014.
- [42] PERNAMBUCO. 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-decheias. Acesso em: 04 de fevereiro de 2017. Website.

- [43] PERNAMBUCO. Secretaria de Desenvolvimento Econômico (SDEC). Secretaria Executiva de Recursos Hídricos. **Resumo de Custos de Obras para Controle de Cheias**. Recife, 2015. Nota Técnica.
- [44] MENDES, Carlos André Bulhões; CIRILO, José Almir. 2001. **Geoprocessamento em recursos hídricos**: princípios, integração e aplicação. ABRH, 2001. 536p.
- [45] FLORENZANO, Teresa Gallotti. **Iniciação em sensoriamento remoto**. 3ª Edição – ampliada e atualizada. Oficina de Textos, 2011. 128p. ISBN: 978-85-7975-016-8
- [46] MENESES, Paulo Roberto et al. **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto**. Brasília: UNB/CNPq, 2012. 276p.
- [47] LIU, William Tse Horng. **Aplicações de sensoriamento remoto**. 2ª Edição. Oficina de Textos, 2015. ISBN: 978-85-7975-177-6
- [48] NOVO, E. M. L. de M. EML DE M. NOVO. **Sensoriamento remoto**: princípios e aplicações. 4ª Edição. Edgard Blücher, 2010. 388p. ISBN: 9788521205401.
- [49] D'ARCO, E. **Radiometria e Comportamento Espectral de Alvos**. INPE. Disponível em: http://www.klickeducacao.com.br/simulados/simulados_mostra/0,7562,POR-22089-46-981-2011,00.html. Acesso em: 10 de fevereiro de 2017.
- [50] JARCHOW, Christopher J. et al. Evapotranspiration by remote sensing: An analysis of the Colorado River Delta before and after the Minute 319 pulse flow to Mexico. **Ecological Engineering**, 2016.
- [51] WRIGHT, Daniel B.; MANTILLA, Ricardo; PETERS-LIDARD, Christa D. A remote sensing-based tool for assessing rainfall-driven hazards. **Environmental Modelling & Software**, v. 90, p. 34-54, 2017.
- [52] THOMPSON, M. M. **Manual of Photogrammetry**. 3ª Edição. American Society of Photogrammetry. 1966, 1220p.
- [53] SLAMA, Chester C.; THEURER, Charles; HENRIKSEN, Soren W. **Manual of photogrammetry**. 4ª Edição. American Society of Photogrammetry, Falls Church, VA 1980. 1056p.
- [54] BRANDALIZE, A. A. 2003. **Perfilamento a laser**: Comparação com Métodos Fotogramétricos. Esteio Engenharia e Aerolevantamentos S/A. Curitiba/PR. Disponível em: <www.lidar.com.br/arquivos/brandalizeperf.pdf>. Acesso em: 10 de fevereiro de 2017.
- [55] HEXAGON. **Stereo Analyst for ArcGIS 2010**. Curso de Erdas Imagine. Instrutor: Emanuele Traversari. 2014.
- [56] RIVIX, 2000. **RiverTools User Guide**. Rivix Co. UsGuide.pdf. 486 p.

- [57] VALERIANO, M. M. 2008. **TOPODATA**: Guia para utilização dos dados geomorfológicos locais. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 75p. 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: 10 de fevereiro de 2017.
- [58] NASA. **ASTER**: Global Digital Elevation Map Announcement. *National Aeronautics and Space Administration*. EUA, 2011. Disponível em: <https://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp>. Acesso em: 10 de fevereiro de 2017.
- [59] POPESCU, S. C. Estimating Plot-Level Forest Biophysical Parameters Using Small-Footprint Airborne Lidar Measurements. Blacksburg, Virginia, 115f. Tese (Doutorado em Floresta) – Department of Foresty, Virginia Tech, 2002.
- [60] FLOOD, M. LiDAR activities and research priorities in the commercial sector. In: ISPRS WORKING GROUP III/3, 2001, Anápolis. Land surface mapping and characterization using laser altimetry: **proceedings...** Freiburg: [S.I.] International Society of Photogrammetry and Remote Sensing, 2001. p. 3-7. Disponível em: <<http://www.isprs.org/proceedings/XXXIV/3-W4/pdf/Flood.pdf>>. Acesso em: 10 de fevereiro de 2017.
- [61] FERREIRA, Islan Peterson Monteiro; HEMERLY, Elder Moreira. Análise de integração entre IMU e GPS utilizando filtro de Kalman. In: Congresso Nacional de Engenharia mecânica. VI., 2010. Campina Grande, Paraíba, Brasil. **Anais...** Campina Grande: CONEM, 2010. Disponível em: <<http://www.abcm.org.br/anais/conem/2010/PDF/CON10-0641.pdf>>. Acesso em: 10 de fevereiro de 2017.
- [62] RENSLOW, Michael S. **Airborne Topographic LiDAR Manual**. American Society of Photogrammetry and Remote Sensing, Bethesda, 2012. 528p.
- [63] SILVA, Mirele Viegas da. 2014. **Avaliação da qualidade posicional planimétrica de dados Lidar em duas áreas urbanas no município do Recife/PE**. 109f. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Cartográfica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2014.
- [64] HELICA Sensors: LiDAR. Disponível em: <<http://www.helica.it/lidar-en.php>>. Acesso em: 10 de fevereiro de 2017. Website.
- [65] PETZOLD, Bettina; REISS, Peter; STÖSSEL, Wolfgang. Laser scanning – Surveying and mapping agencies are using a new technique for the derivation of digital terrain models. **ISPRS Journal of Photogrammetry and remote Sensing**, v. 54, n. 2, p. 95-104, 1999.
- [66] BRANDALIZE, Maria Cecília Bonato. 2004. **A qualidade cartográfica dos resultados do Laserscanner aerotransportado**. 240f. Tese (Doutorado). Departamento de Engenharia Civil, Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

- [67] FERREIRA, Flávia Renata. 2014. **Segmentação do espaço urbano por meio da tecnologia Lidar aerotransportado**. 130f. Tese (Doutorado). Departamento de Engenharia de Transportes. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.
- [68] FALAT, D. R. 2005. **Perfilamento a laser para a detecção de construções clandestinas e determinação de altura das edificações**. Esteio Engenharia e Aerolevantamentos S/A. Curitiba/PR. Disponível em: <http://www.esteio.com.br/downloads/2005/edificacoes_clandestinas-GeoBR2005_artigo.pdf> Acesso em: 10 de fevereiro de 2017.
- [69] ASSUNÇÃO, Márcio Geovani Tavares da. 2008. **Desenvolvimento de métodos de filtragem e classificação de pontos LIDAR para a geração automática do modelo digital do terreno**. 79f. Dissertação (Mestrado). Departamento de Engenharia Cartográfica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2010.
- [70] CAO, Lin et al. Tree species classification in subtropical forests using small-footprint full-waveform LiDAR data. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 49, p. 39-51, 2016.
- [71] GIONGO, Marcos et al. LiDAR: princípios e aplicações florestais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 30, n. 63, p. 231, 2010. Disponível em: <<http://pfb.cnpf.embrapa.br/pfb/index.php/pfb/article/viewFile/148/133>> Acesso em: 10 de fevereiro de 2017.
- [72] MARKS, Kate; BATES, Paul. Integration of high-resolution topographic data with floodplain flow models. **Hydrological Processes**, Inglaterra, v. 14, p. 2109-2122, 2000.
- [73] 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.
- [74] PERNAMBUCO. **Pernambuco Tridimensional: PE3D**. Secretaria de Desenvolvimento Econômico – SDEC. 2016. Disponível em: www.pe3.pe.gov.br. Acesso em: 10 de fevereiro de 2017. Website.
- [75] LACTEC. **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. Meio digital.
- [76] CIRILO, J. A.; ALVES; F. H. B.; SILVA, B. de M.; CAMPOS; P. H. A. L. PERNAMBUCO TRIDIMENSIONAL: base de dados espaciais para planejamento urbano e gestão territorial. In: SILUSBA Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Portuguesa. 12º, 2015, Brasília, Distrito Federal, Brasil. **Anais...** Brasília: SILUSBA, 2015.
- [77] RIBEIRO, Jorge Martinho. 2008. **Modelo de previsão meteorológica baseado em sistemas de inferência difusa**. 120f. Tese (Doutorado). Departamento de

Engenharia Electrotécnica. Instituto Politécnico do Porto. Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, Portugal, 2008.

- [78] PIELKE, R. A. **Mesoscale Meteorological Modeling**. 3ª Ed., Academic Press, Fort Collins, USA, 693 p., 2002.
- [79] RAMOS DA SILVA, R.; DIAS, P. L. S.; MOREIRA, D. S.; SOUZA, E. B de Modelo OLAM (ocean-land-atmosphere-model): descrição, aplicações e perspectivas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 24, n. 2, p. 144-157, 2009.
- [80] CHOU, Sin-Chan. & NOBRE, Paulo **Avaliação de Modelos Globais e Regionais Climáticos**. In: Base Científica das mudanças climáticas, Capítulo 8. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro: COPPE, 466p., 2014. Disponível: http://www.pbmc.coppe.ufrj.br/documentos/RAN1_completo_vol1.pdf. Acesso em: 10 de fevereiro de 2017.
- [81] CHOU, S.C. Modelo regional Eta. **Climanálise**. v.1, n. Ed. Especial, p.203-207, 1996.
- [82] BASSAN, José Marcio. Avaliação da chuva produzida pelo modelo Eta de previsão do tempo para o Estado de São Paulo com uso de radar meteorológico para aplicações agrícolas. 2014. xv, 73f. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu, 2014. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/110966>>.
- [83] INPE. **Previsão Numérica**: Regional Eta (11 dias) 15 X 15km. Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Disponível em: <<http://previsaonumerica.cptec.inpe.br/golMapWeb/DadosPages?id=Eta15>> Acesso em: 10 de fevereiro de 2017.
- [84] DE MOURA, R. G. et al. Avaliação do modelo regional ETA utilizando as análises do CPTEC e NCEP. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 1, p. 46-53, 2010.
- [85] TUCCI, Carlos Eduardo Morelli (Org.). **Modelos Hidrológicos**. 2. ed. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 2005. 678 p. ISBN 85-7025-823-2.
- [86] KAISER, Ilza Machado. 2006. **Avaliação de métodos de composição de campos de precipitação para uso em modelos hidrológicos distribuídos**. 400f. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.
- [87] RENNÓ, C. D.; SOARES, J. V. **Modelos hidrológicos para gestão ambiental**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) Programa de Ciência e Tecnologia para a Gestão de Ecossistemas. Ação “Métodos, modelos e geoinformação para a gestão ambiental”. Relatório Técnico Parcial. São Paulo, 60p, 2000.
- [88] SANTOS, Laércio Leal. MODELOS HIDROLÓGICOS: Conceitos e Aplicações. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 2, n. 3, p. 1-19, 2009.

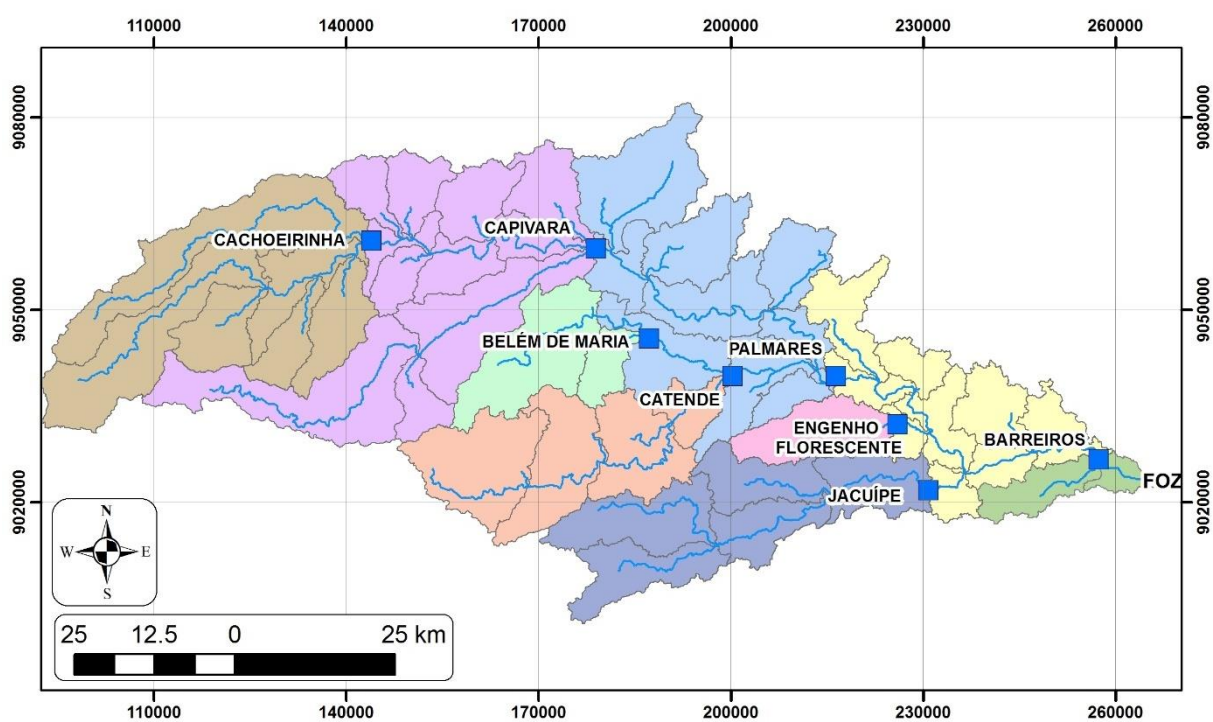
- [89] ALCOFORADO, Roberta Guedes; CIRILO, José Almir. Sistema de suporte à decisão para análise, previsão e controle de inundações. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 4, p. 133-153, 2001.
- [90] COLLISCHONN, Walter. 2001. **Simulação hidrológica em grandes bacias**. 270f. Tese (Doutorado). Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do sul. Porto Alegre, 2001.
- [91] CAMPOS, José Nilson B. **Lições em modelos e simulação hidrológica**. Fortaleza: ASTEF/Expressão Gráfica, v. 1, p. 166, 2009.
- [92] SÁNCHEZ, Francisco Javier. **HEC-HMS Manual Elemental**. Universidade da Salamanca, Departamento de Geologia, Espanha, Julho, 2009. 24 p. Disponível em: <<http://hidrologia.usal.es/Complementos/Hec-hms-4.pdf>>. Acesso em: 10 de fevereiro de 2017.
- [93] CIRILO, José Almir et al. **Hidráulica aplicada**. 2ª Edição Revisada e Ampliada. Coleção ABRH de Recursos Hídricos, v. 8, 2003. 621p.
- [94] PAIVA, Rodrigo Cauduro Dias de. 2009. **Modelagem Hidrológica e Hidrodinâmica de Grandes Bacias. Estudo de caso: bacia do rio Solimões**. 182f. Dissertação (Mestrado). Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.
- [95] USACE. **River Analysis System HEC-RAS: User's Manual**. Version 5.0. United States Army Corps of Engineers – USACE. Hydrologic Engineering Center – HEC. Davis, California, EUA, 2016. 960p.
- [96] MARK, O. et al. Potential and limitations of 1D modelling of urban flooding. **Journal of Hydrology**, v. 299, n. 3, p. 284-299, 2004.
- [97] DA PAZ, A. R.; SCHETTINI, E. B. C; VILLANUEVA, Adolfo ON. **Simulação Hidrodinâmica Bidimensional do Banhado do Taim (RS)**. In: SBRH Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. 2003. Disponível em: http://www.ct.ufpb.br/~adrianorpaz/artigos/Paz_et_al_SBRH_2003.pdf. Acesso em: 10 de fevereiro de 2017.
- [98] BRASIL, Lucas Samuel Santos. 2005. **Utilização de Modelagens Uni e Bidimensional para a Propagação de Onda de Cheia Proveniente de Ruptura Hipotética de Barragem. Estudo de Caso: Barragem Rio de Pedras**. 222f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2005.
- [99] ROSMAN, P. C. C. **Referência técnica do SisBAHIA**, Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental. Rio de Janeiro: Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa de Engenharia, 2000.
- [100] ALCOFORADO, R. G. 2006. **Simulação Hidráulico-Hidrológica do escoamento em redes complexas de rios urbanos: Suporte de informações**

espaciais de alta resolução. 272p. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2006.

- [101] PERNAMBUCO. Secretaria de Ciência, Tecnologia e Meio Ambiente (SECTMA). **Plano Estadual de Recursos Hídricos de Pernambuco** – PERH. Recife: 1998. 8 v.
- [102] 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: 10 de fevereiro de 2017. Meio digital.
- [103] FARIA, Caroline. **Monções.** 2006. Info Escola Navegando e Aprendendo. Disponível em: <http://www.infoescola.com/geografia/moncoes-moncao/>. Acesso em: 10 de fevereiro de 2017.
- [104] ITEP. **Relatório de Impacto Ambiental – RIMA.** Barragem São Bento do Una. Instituto de Tecnologia de Pernambuco – ITEP/OS. Recife, 2015. 93p. Disponível em: <http://www.cprh.pe.gov.br/downloads/rima/RIMA-Sao-Bento-do-Una.pdf> Acesso em: 10 de fevereiro de 2017.
- [105] ITEP. **Relatório de Impacto Ambiental – RIMA.** Barragem Igarapeba. Instituto de Tecnologia de Pernambuco – ITEP/OS. Recife, 2011. 63p. Disponível em: http://www.cprh.pe.gov.br/downloads/rima_igarapeba_tudo.pdf Acesso em: 10 de fevereiro de 2017.
- [106] USACE. **Hydrologic Modeling System HEC-HMS: User's Manual.** Version 4.0. United States Army Corps of Engineers – USACE. Hydrologic Engineering Center – HEC. Davis, California, EUA, 2013. 442p.
- [107] NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. **River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles.** Journal of hydrology, v. 10, n. 3, p. 282-290, 1970.

Anexo

Parâmetros fixos e parâmetros calibrados do modelo hidrológico HEC-HMS da bacia do rio Una.



ROUTING – MUSKINGUM-CUNGE						
Reach	Time Step Method	Length (m)	Slope (m/m)	Manning's n	Shape	Width (m)
R260	A. F. I.	11081.0	0.00219	0.05	Trapezoid	10
R230	A. F. I.	8861.4	0.00158	0.05	Trapezoid	10
R180	A. F. I.	3669.8	0.00195	0.05	Trapezoid	10
R110	A. F. I.	8372.3	0.00110	0.05	Trapezoid	10
R90	A. F. I.	1911.0	0.00433	0.05	Trapezoid	10
R150	A. F. I.	4325.9	0.01360	0.05	Trapezoid	10
R190	A. F. I.	15062.0	0.00167	0.05	Trapezoid	10
R140	A. F. I.	22622.0	0.00221	0.05	Trapezoid	10
R360	A. F. I.	15742.0	0.00351	0.05	Trapezoid	10
R360a	A. F. I.	20742.0	0.00190	0.05	Trapezoid	10
R130	A. F. I.	552.4	0.00270	0.05	Trapezoid	10
R1460	A. F. I.	724.3	0.00096	0.05	Trapezoid	10
R160	A. F. I.	3641.0	0.00273	0.05	Trapezoid	10
R250	A. F. I.	8371.5	0.00466	0.05	Trapezoid	10
R310	A. F. I.	32647.0	0.00544	0.05	Trapezoid	10
R380	A. F. I.	20399.0	0.00203	0.05	Trapezoid	10
R640	A. F. I.	19314.0	0.00580	0.05	Trapezoid	10
R590	A. F. I.	26449.0	0.00456	0.05	Trapezoid	10
R1520	A. F. I.	15638.0	0.00213	0.05	Trapezoid	10
R510	A. F. I.	984.0	0.00460	0.05	Trapezoid	10
R340	A. F. I.	13156.0	0.01057	0.05	Trapezoid	10
R400	A. F. I.	20653.0	0.00432	0.05	Trapezoid	10
R410	A. F. I.	7673.8	0.00379	0.05	Trapezoid	10
R390	A. F. I.	7707.2	0.00115	0.05	Trapezoid	10
R430	A. F. I.	2645.5	0.00046	0.05	Trapezoid	10
R1660	A. F. I.	1987.6	0.00130	0.05	Trapezoid	10
R440	A. F. I.	9005.4	0.00181	0.05	Trapezoid	10
R500	A. F. I.	10217.0	0.00073	0.05	Trapezoid	10
R530	A. F. I.	10641.0	0.00183	0.05	Trapezoid	10
R540	A. F. I.	6414.7	0.00132	0.05	Trapezoid	10
R600	A. F. I.	11517.0	0.00081	0.05	Trapezoid	10
R690	A. F. I.	25831.0	0.00172	0.05	Trapezoid	10
R1620	A. F. I.	22220.0	0.00139	0.05	Trapezoid	10
R650	A. F. I.	8014.1	0.00086	0.05	Trapezoid	10
R610	A. F. I.	13162.0	0.00122	0.05	Trapezoid	10
R1720	A. F. I.	17359.0	0.00135	0.05	Trapezoid	10
R580	A. F. I.	1546.7	0.00027	0.05	Trapezoid	10
R620	A. F. I.	10394.0	0.00139	0.05	Trapezoid	10

A.F.I. – Automatic Fixed Interval

Posto Flu	ÁREA	
	Sub-bacia	Área, (Km²)
Cachoeirinha	W980	329.2
	W1040	130.7
	W1020	86.7
	W970	135.3
	W810	395.1
	W1010	130.1
Capivara	W780	76.7
	W760	90.1
	W940	63.2
	W900	53.8
	W800	115.4
	W880	90.2
	W1130	365.1
	W1140	70.6
	W920a	154.6
	W920	128.3
	W750	127.1
Catende	W910	69.3
	W1350	259.2
	W1330	213.8
	W1250	190.6
Belém de Maria	W1500	72.7
	W2250	282.5
Palmares	W1100	74.2
	W790	266.5
	W1000	153.8
	W1030	85.8
	W1050	167.5
	W960	110.8
	W1120	173.7
	W1490	135.0
	W1070	60.2
	W1210	54.2
Eng. Florescente	W1650	7.2
	W1550	180.4
Jacuípe	W1410	202.3
	W1420	153.5
	W1380	136.0
	W1400	120.7
	W1600	143.9
Barreiros	W1110	127.3
	W1230	63.2
	W1220	61.1
	W1540	38.2
	W1240	98.8
	W1590	53.4
	W1290	115.7
	W1320	58.0
Foz	W1700	92.0
	W1340	100.8
	W1690	40.0

CANOPY – SIMPLE CANOPY				
Posto Flu	Sub-bacia	Inicial Storage, (%)	Max Storage, (mm)	Crop Coefficient
Cachoeirinha	W980	50	5	1.0
	W1040	50	5	1.0
	W1020	50	5	1.0
	W970	50	5	1.0
	W810	50	5	1.0
	W1010	50	5	1.0
Capivara	W780	50	50	1.0
	W760	50	50	1.0
	W940	50	50	1.0
	W900	50	50	1.0
	W800	50	50	1.0
	W880	50	50	1.0
	W1130	50	50	1.0
	W1140	50	50	1.0
	W920a	50	50	1.0
	W920	50	50	1.0
	W750	50	50	1.0
	W910	50	50	1.0
Catende	W1350	50	1	1.0
	W1330	50	1	1.0
	W1250	50	1	1.0
	W1500	50	1	1.0
Belém de Maria	W2250	50	50	1.0
	W1100	50	50	1.0
Palmares	W790	50	50	1.0
	W1000	50	50	1.0
	W1030	50	50	1.0
	W1050	50	50	1.0
	W960	50	50	1.0
	W1120	50	50	1.0
	W1490	50	50	1.0
	W1070	50	50	1.0
	W1210	50	50	1.0
	W1650	50	50	1.0
Eng. Florescente	W1550	50	2	1.0
Jacuípe	W1410	50	5	1.0
	W1420	50	5	1.0
	W1380	50	5	1.0
	W1400	50	5	1.0
	W1600	50	5	1.0
Barreiros	W1110	50	5	1.0
	W1230	50	5	1.0
	W1220	50	5	1.0
	W1540	50	5	1.0
	W1240	50	5	1.0
	W1590	50	5	1.0
	W1290	50	5	1.0
	W1320	50	5	1.0
	W1700	50	5	1.0
Foz	W1340	50	5	1.0
	W1690	50	5	1.0

SURFACE – SIMPLE SURFACE			
Posto Flu	Sub-bacia	Inicial Storage, (%)	Max Storage
Cachoeirinha	W980	50	1
	W1040	50	1
	W1020	50	1
	W970	50	1
	W810	50	1
	W1010	50	1
Capivara	W780	50	20
	W760	50	20
	W940	50	20
	W900	50	20
	W800	50	20
	W880	50	20
	W1130	50	20
	W1140	50	20
	W920a	50	20
	W920	50	20
	W750	50	20
	W910	50	20
Catende	W1350	50	1
	W1330	50	1
	W1250	50	1
	W1500	50	1
Belém de Maria	W2250	50	1
	W1100	50	1
Palmares	W790	50	1
	W1000	50	1
	W1030	50	1
	W1050	50	1
	W960	50	1
	W1120	50	1
	W1490	50	1
	W1070	50	1
	W1210	50	1
	W1650	50	1
Eng. Florescente	W1550	0	0
Jacuípe	W1410	0	0
	W1420	0	0
	W1380	0	0
	W1400	0	0
	W1600	0	0
Barreiros	W1110	50	1
	W1230	50	1
	W1220	50	1
	W1540	50	1
	W1240	50	1
	W1590	50	1
	W1290	50	1
	W1320	50	1
	W1700	50	1
Foz	W1340	50	1
	W1690	50	1

LOSS – SOIL MOISTURE ACCOUNTING				
Posto Flu	Sub bacia	Soil (%)	Groundwater 1	Groundwater 2
Cachoeirinha	W980	50	50	0
	W1040	50	50	0
	W1020	50	50	0
	W970	50	50	0
	W810	50	50	0
	W1010	50	50	0
Capivara	W780	20	0	0
	W760	20	0	0
	W940	20	0	0
	W900	20	0	0
	W800	20	0	0
	W880	20	0	0
	W1130	20	0	0
	W1140	20	0	0
	W920a	20	0	0
	W920	20	0	0
	W750	20	0	0
	W910	20	0	0
Catende	W1350	0	0	0
	W1330	0	0	0
	W1250	0	0	0
	W1500	0	0	0
Belém de Maria	W2250	50	50	0
	W1100	50	50	0
Palmares	W790	50	50	0
	W1000	50	50	0
	W1030	50	50	0
	W1050	50	50	0
	W960	50	50	0
	W1120	50	50	0
	W1490	50	50	0
	W1070	50	50	0
	W1210	50	50	0
	W1650	50	50	0
Eng. Florescente	W1550	10	10	0
Jacuípe	W1410	50	50	0
	W1420	50	50	0
	W1380	50	50	0
	W1400	50	50	0
	W1600	50	50	0
Barreiros	W1110	50	50	0
	W1230	50	50	0
	W1220	50	50	0
	W1540	50	50	0
	W1240	50	50	0
	W1590	50	50	0
	W1290	50	50	0
	W1320	50	50	0
	W1700	50	50	0
Foz	W1340	50	50	0
	W1690	50	50	0

LOSS – SOIL MOISTURE ACCOUNTING				
Posto Flu	Sub bacia	Max Infiltration (mm/h)	Impervious (%)	Soil Storage (mm)
Cachoeirinha	W980	50	3	150
	W1040	50	3	150
	W1020	50	3	150
	W970	50	3	150
	W810	50	3	150
	W1010	50	3	150
Capivara	W780	1	5	200
	W760	2	1	200
	W940	3	5	200
	W900	2	5	200
	W800	2	5	200
	W880	3	5	200
	W1130	3	1	200
	W1140	2	1	200
	W920a	1	5	200
	W920	1	5	200
	W750	1	10	200
	W910	1	5	200
Catende	W1350	3	10	200
	W1330	3	15	200
	W1250	2	15	200
	W1500	2	30	200
Belém de Maria	W2250	20	10	200
	W1100	10	20	150
Palmares	W790	0.5	40	200
	W1000	1	40	200
	W1030	3	40	100
	W1050	3	30	200
	W960	3	40	200
	W1120	2	40	200
	W1490	3	40	200
	W1070	0.5	40	200
	W1210	2	40	200
	W1650	0.25	60	200
Eng. Florescente	W1550	40	35	400
Jacuípe	W1410	10	40	300
	W1420	10	30	300
	W1380	10	40	300
	W1400	10	30	300
	W1600	10	40	300
Barreiros	W1110	0.5	40	200
	W1230	3	20	200
	W1220	1	40	200
	W1540	3	20	200
	W1240	4	15	200
	W1590	3	20	200
	W1290	4	15	200
	W1320	5	10	200
	W1700	4	15	200
Foz	W1340	4	15	200
	W1690	4	15	200

LOSS – SOIL MOISTURE ACCOUNTING			
Posto Flu	Sub-bacia	Tension Storage (mm)	Soil Percolation (mm/s)
Cachoeirinha	W980	5	0.35
	W1040	5	0.35
	W1020	5	0.35
	W970	5	0.7
	W810	5	0.35
	W1010	5	0.7
Capivara	W780	40	0.5
	W760	5	1
	W940	40	1
	W900	40	1
	W800	40	1
	W880	40	1
	W1130	5	2
	W1140	5	1
	W920a	40	0.5
	W920	40	0.5
	W750	40	0.5
	W910	40	0.5
Catende	W1350	50	4
	W1330	50	4
	W1250	100	4
	W1500	100	4
Belém de Maria	W2250	5	0.5
	W1100	50	0.5
Palmares	W790	5	2
	W1000	5	4
	W1030	5	4
	W1050	5	4
	W960	5	4
	W1120	5	4
	W1490	5	4
	W1070	5	2
	W1210	5	4
	W1650	5	2
Eng. Florescente	W1550	100	5
Jacuípe	W1410	15	3
	W1420	15	3
	W1380	15	3
	W1400	15	3
	W1600	15	3
Barreiros	W1110	180	1
	W1230	100	2
	W1220	100	1
	W1540	100	2
	W1240	100	4
	W1590	100	2
	W1290	100	2
	W1320	100	2
	W1700	100	2
Foz	W1340	100	2
	W1690	100	2

LOSS – SOIL MOISTURE ACCOUNTING				
Posto Flu	Sub bacia	GW 1 Storage (mm)	GW 1 Percolation (mm/h)	GW 1 Coefficient (h)
Cachoeirinha	W980	1	5	480
	W1040	1	5	480
	W1020	1	5	480
	W970	1	6	480
	W810	1	5	480
	W1010	1	6	480
Capivara	W780	50	5	120
	W760	50	6	120
	W940	50	5	120
	W900	50	5	120
	W800	50	5	120
	W880	50	5	120
	W1130	50	6	120
	W1140	50	5	120
	W920a	50	5	120
	W920	50	5	120
	W750	50	5	120
	W910	50	5	120
Catende	W1350	100	5	100
	W1330	100	3	100
	W1250	100	5	100
	W1500	100	3	100
Belém de Maria	W2250	100	5	480
	W1100	5	5	480
Palmares	W790	100	5	100
	W1000	100	5	100
	W1030	100	5	100
	W1050	100	5	100
	W960	100	5	100
	W1120	100	5	100
	W1490	100	5	100
	W1070	100	5	100
	W1210	100	5	100
	W1650	100	5	100
Eng. Florescente	W1550	25	5	150
Jacuípe	W1410	100	5	150
	W1420	100	5	150
	W1380	100	5	150
	W1400	100	5	150
	W1600	100	5	150
Barreiros	W1110	100	3	100
	W1230	100	5	100
	W1220	100	5	100
	W1540	100	5	100
	W1240	100	5	100
	W1590	100	5	100
	W1290	100	5	100
	W1320	100	5	100
	W1700	100	5	100
Foz	W1340	100	5	100
	W1690	100	5	100

LOSS – SOIL MOISTURE ACCOUNTING				
Posto Flu	Sub bacia	GW 2 Storage (mm)	GW 2 Percolation (mm/h)	GW 2 Coefficient (h)
Cachoeirinha	W980	0	0	0
	W1040	0	0	0
	W1020	0	0	0
	W970	0	0	0
	W810	0	0	0
	W1010	0	0	0
Capivara	W780	0	0	0
	W760	0	0	0
	W940	0	0	0
	W900	0	0	0
	W800	0	0	0
	W880	0	0	0
	W1130	0	0	0
	W1140	0	0	0
	W920a	0	0	0
	W920	0	0	0
	W750	0	0	0
	W910	0	0	0
Catende	W1350	0	0	0
	W1330	0	0	0
	W1250	0	0	0
	W1500	0	0	0
Belém de Maria	W2250	0	0	0
	W1100	0	0	0
Palmares	W790	0	0	0
	W1000	0	0	0
	W1030	0	0	0
	W1050	0	0	0
	W960	0	0	0
	W1120	0	0	0
	W1490	0	0	0
	W1070	0	0	0
	W1210	0	0	0
Eng. Florescente	W1650	0	0	0
	W1550	0	0	0
Jacuípe	W1410	0	0	0
	W1420	0	0	0
	W1380	0	0	0
	W1400	0	0	0
	W1600	0	0	0
Barreiros	W1110	0	0	0
	W1230	0	0	0
	W1220	0	0	0
	W1540	0	0	0
	W1240	0	0	0
	W1590	0	0	0
	W1290	0	0	0
	W1320	0	0	0
	W1700	0	0	0
Foz	W1340	0	0	0
	W1690	0	0	0

TRANSFORM – SCS UNIT HYDROGRAPH			
Posto Flu	Sub-bacia	Graph Type	Lag Time, (h)
Cachoeirinha	W980	Standard	775
	W1040	Standard	433
	W1020	Standard	366
	W970	Standard	578
	W810	Standard	1089
	W1010	Standard	554
Capivara	W780	Standard	347
	W760	Standard	258
	W940	Standard	244
	W900	Standard	294
	W800	Standard	259
	W880	Standard	403
	W1130	Standard	902
	W1140	Standard	229
	W920a	Standard	300
	W920	Standard	342
	W750	Standard	300
	W910	Standard	369
Catende	W1350	Standard	717
	W1330	Standard	421
	W1250	Standard	323
	W1500	Standard	287
Belém de Maria	W2250	Standard	447
	W1100	Standard	263
Palmares	W790	Standard	403
	W1000	Standard	369
	W1030	Standard	172
	W1050	Standard	302
	W960	Standard	242
	W1120	Standard	316
	W1490	Standard	491
	W1070	Standard	332
	W1210	Standard	302
	W1650	Standard	112
Eng. Florescente	W1550	Delmarva	520
Jacuípe	W1410	Delmarva	452
	W1420	Delmarva	398
	W1380	Delmarva	420
	W1400	Delmarva	426
	W1600	Delmarva	457
Barreiros	W1110	Standard	473
	W1230	Standard	285
	W1220	Standard	460
	W1540	Standard	206
	W1240	Standard	632
	W1590	Standard	231
	W1290	Standard	405
	W1320	Standard	303
	W1700	Standard	401
Foz	W1340	Standard	550
	W1690	Standard	234

BASEFLOW – RECESSION				
Posto Flu	Sub bacia	Inicial Type	Inicial Discharge (m ³ /s)	Recession Constant
Cachoeirinha	W980	Discharge	1	0.75
	W1040	Discharge	0.5	0.75
	W1020	Discharge	0.5	0.75
	W970	Discharge	0.5	0.75
	W810	Discharge	0.5	0.75
	W1010	Discharge	0.5	0.75
Cativara	W780	Discharge	0.2	0.99
	W760	Discharge	0.2	0.99
	W940	Discharge	0.2	0.99
	W900	Discharge	0.2	0.99
	W800	Discharge	0.2	0.99
	W880	Discharge	0.2	0.99
	W1130	Discharge	0.2	0.99
	W1140	Discharge	0.2	0.99
	W920a	Discharge	0.2	0.99
	W920	Discharge	0.2	0.99
	W750	Discharge	0.2	0.99
	W910	Discharge	0.2	0.99
Catende	W1350	Discharge	1	0.999
	W1330	Discharge	1	0.999
	W1250	Discharge	1	0.999
	W1500	Discharge	1	0.999
Belém de Maria	W2250	Discharge	0.05	0.995
	W1100	Discharge	0.05	0.95
Palmares	W790	Discharge	0.75	0.98
	W1000	Discharge	0.75	0.98
	W1030	Discharge	0.75	0.98
	W1050	Discharge	0.75	0.98
	W960	Discharge	0.75	0.98
	W1120	Discharge	0.75	0.98
	W1490	Discharge	0.75	0.98
	W1070	Discharge	0.75	0.98
	W1210	Discharge	0.75	0.98
	W1650	Discharge	0.75	0.98
Eng. Florescente	W1550	Discharge	2	0.995
Jacuípe	W1410	Discharge	1	0.99
	W1420	Discharge	1	0.99
	W1380	Discharge	1	0.99
	W1400	Discharge	1	0.99
	W1600	Discharge	1	0.99
Barreiros	W1110	Discharge	0.75	0.99
	W1230	Discharge	0.75	0.99
	W1220	Discharge	0.75	0.99
	W1540	Discharge	0.75	0.99
	W1240	Discharge	0.75	0.99
	W1590	Discharge	0.75	0.99
	W1290	Discharge	0.75	0.99
	W1320	Discharge	0.75	0.99
	W1700	Discharge	0.75	0.99
Foz	W1340	Discharge	0.75	0.99
	W1690	Discharge	0.75	0.99

BASEFLOW – RECESSION			
Posto Flu	Sub-bacia	Threshold Type	Ratio to Peak
Cachoeirinha	W980	Ratio to Peak	0.1
	W1040	Ratio to Peak	0.1
	W1020	Ratio to Peak	0.1
	W970	Ratio to Peak	0.1
	W810	Ratio to Peak	0.1
	W1010	Ratio to Peak	0.1
Capivara	W780	Ratio to Peak	0.01
	W760	Ratio to Peak	0.01
	W940	Ratio to Peak	0.01
	W900	Ratio to Peak	0.01
	W800	Ratio to Peak	0.01
	W880	Ratio to Peak	0.01
	W1130	Ratio to Peak	0.01
	W1140	Ratio to Peak	0.01
	W920a	Ratio to Peak	0.01
	W920	Ratio to Peak	0.01
	W750	Ratio to Peak	0.01
	W910	Ratio to Peak	0.01
Catende	W1350	Ratio to Peak	0.01
	W1330	Ratio to Peak	0.01
	W1250	Ratio to Peak	0.01
	W1500	Ratio to Peak	0.01
Belém de Maria	W2250	Ratio to Peak	0.01
	W1100	Ratio to Peak	0.2
Palmares	W790	Ratio to Peak	0.1
	W1000	Ratio to Peak	0.1
	W1030	Ratio to Peak	0.1
	W1050	Ratio to Peak	0.1
	W960	Ratio to Peak	0.1
	W1120	Ratio to Peak	0.1
	W1490	Ratio to Peak	0.1
	W1070	Ratio to Peak	0.1
	W1210	Ratio to Peak	0.1
	W1650	Ratio to Peak	0.1
Eng. Florescente	W1550	Ratio to Peak	0.05
Jacuípe	W1410	Ratio to Peak	0.05
	W1420	Ratio to Peak	0.05
	W1380	Ratio to Peak	0.05
	W1400	Ratio to Peak	0.05
	W1600	Ratio to Peak	0.05
Barreiros	W1110	Ratio to Peak	0.01
	W1230	Ratio to Peak	0.01
	W1220	Ratio to Peak	0.01
	W1540	Ratio to Peak	0.01
	W1240	Ratio to Peak	0.01
	W1590	Ratio to Peak	0.01
	W1290	Ratio to Peak	0.01
	W1320	Ratio to Peak	0.01
	W1700	Ratio to Peak	0.01
Foz	W1340	Ratio to Peak	0.05
	W1690	Ratio to Peak	0.05