

Edilson Raimundo Silva

**MODELAGEM INTEGRADA PARA CONTROLE DE CHEIAS,
PREVISÃO E ALERTA DE INUNDAÇÕES:
ESTUDO DE CASO DA BACIA DO RIO UNA EM PERNAMBUCO**

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

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

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

Recife

2015

Catalogação na fonte
Bibliotecária Valdicêa Alves, CRB-4 / 1260

S586m Silva, Edilson Raimundo.
Modelagem integrada para controle de cheias, previsão e alerta de inundações: estudo de caso da bacia do rio una em Pernambuco / Edilson Raimundo Silva. - Recife: O Autor, 2015.
145folhas, Il. e Tabs.

Orientador: Profº. Dr. José Almir Cirilo.
Coorientador: Dr. Alfredo Ribeiro Neto.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação Engenharia Civil, 2015.
Inclui Referências e Apêndices.

1. Engenharia Civil. 2. Previsão e controle de inundações. 3. Sistema de apoio à decisão. 4. Modelagem hidrológico-hidrodinâmica integrada. 5. Bacia do rio Una. I. Cirilo, José Almir. (Orientador). II. Ribeiro Neto, Alfredo. Coorientador. III. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG/2015-177



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

A comissão examinadora da Defesa de Tese de Doutorado

**MODELAGEM INTEGRADA PARA CONTROLE DE CHEIAS,
PREVISÃO E ALERTA DE INUNDAÇÕES: ESTUDO DE
CASO DA BACIA DO RIO UNA EM PERNAMBUCO**

defendida por

Edilson Raimundo Silva

Considera o candidato APROVADO

Recife, 30 de abril de 2015

Orientador:

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

Prof. Dr. Alfredo Ribeiro Neto – UFPE
(co-orientador)

Banca Examinadora:

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

Prof. Dr. Marcos Aurélio Vasconcelos de Freitas - UFRJ
(examinador externo)

Prof.^a Dr.^a Simone Rosa da Silva – UPE
(examinadora externa)

Prof. Dr. Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral – UFPE
(examinador interno)

Prof. Dr. José Roberto Gonçalves de Azevedo – UFPE
(examinador interno)

*Este trabalho é dedicado a todos
que buscam a Verdade. Porque está escrito:*

“Conhecerás a Verdade e a Verdade vos libertará...”

AGRADECIMENTOS

Na escala hierárquica cósmica, eu agradeço a Deus Todo Poderoso, criador de tudo e de todos, princípio e emanção das coisas que existem e que não existem.

Mais abaixo, agradeço a todos os Seres condutores dos destinos da humanidade, nesse lindo planetinha chamado Terra.

Então, agradeço aos Espíritos amigos e principalmente ao meu Espírito guia, que tanto tem me auxiliado nessa maravilhosa encarnação.

Agradeço de todo coração ao meu Pai e minha Mãe, que são pessoas realmente divinas e que eu amo muito.

Agradeço agora a todos os professores que me abriram os caminhos da pesquisa acadêmica, principalmente aos que me fizeram adentrar no fantástico mundo da hidrologia.

Finalmente, rendo graças a todos os que contribuíram de uma forma ou de outra, para que eu tenha conseguido chegar até aqui. Valeu galera.

*Mamãe está a perguntar
se máquina vai parar
e o homem, quem sabe então,
vai curar sua ilusão...*

*Sabe, há um tempo
pra se nos estabelecer,
paramos um pouco,
suamos, respi, piramos,
saímos, zarpamos,
o mar, a terra e o sonho...
é um sonho.
...é tudo apenas um sonho.*

(O Autor)

RESUMO

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

MODELAGEM INTEGRADA PARA CONTROLE DE CHEIAS, PREVISÃO E ALERTA DE INUNDAÇÕES: ESTUDO DE CASO DA BACIA DO RIO UNA EM PERNAMBUCO

EDILSON RAIMUNDO SILVA

Abril/2015

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

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

SILVA, E. R. **Modelagem Integrada para Controle de Cheias, Previsão e Alerta de Inundações: Estudo de Caso da Bacia do Rio Una em Pernambuco.** Tese, (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 144 p., 2015.

Este trabalho de pesquisa propõe a ampliação dos conhecimentos associados ao emprego de modelos de simulação do processo hidrológico observado em épocas de grande pluviosidade. Conectando as etapas, meteorológica, hidrológica e hidrodinâmica em uma estrutura computacional construída sobre o entendimento dos sistemas envolvidos, esta pesquisa tem o objetivo de servir efetivamente de apoio aos procedimentos emergenciais de enfrentamento de enchentes. No desenvolvimento dos estudos, o autor utilizou resultados de modelos meteorológicos de mesoescala (ETA, BRAMS e WRF), os quais forneceram dados de chuva para um modelo hidrológico (HEC-HMS), o qual gerou vazões que foram utilizadas como entrada para um modelo hidrodinâmico (HEC-RAS), tendo este a função de gerar as variações de níveis de água por todo o curso dos rios modelados. Os estudos de calibração e integração dos modelos foram feitos levando-se em conta a possibilidade de vários tipos de experimentação, dentro de uma plataforma computacional que utiliza de forma contínua, o conhecimento hidrometeorológico representado pelos modelos da bacia em estudo. Recentemente em 2010 e 2011, a bacia do rio Una, localizada na Mata Sul de Pernambuco, foi palco de grandes enchentes que acarretaram sérios prejuízos para a população ribeirinha. Esta pesquisa foi realizada como uma forma de compilar o entendimento atual sobre os processos físicos ocorridos em enchentes, visando o desenvolvimento de uma ferramenta que forneça suporte aos decisores, em termos de previsão dos eventos de enchentes. Como resultados alcançados, o sistema de modelagem integrada construído mostrou-se capaz de realizar simulações hidrometeorológicas eficientes, caracterizando-se como uma poderosa ferramenta, tanto no suporte à decisão para o enfrentamento de enchentes, quanto na pesquisa e desenvolvimento de modelos hidrológicos e hidrodinâmicos para outras bacias.

Palavras-chave: Previsão e controle de inundações, Sistema de apoio à decisão, Modelagem hidrológico-hidrodinâmica integrada, Bacia do rio Una.

ABSTRACT

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

INTEGRATED MODELING FOR FLOOD CONTROL, FORECASTING AND FLOOD ALERT: CASE STUDY OF THE UNA RIVER BASIN IN PERNAMBUCO

EDILSON RAIMUNDO SILVA

April/2015

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

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

SILVA, E. R. **Integrated Modelling for Flood Control, Forecasting and Flood Alert: Case Study of the Una River Basin in Pernambuco.** Doctoral dissertation (Doctorate in Civil Engineering), Federal University of Pernambuco, Recife, Brazil, 144 p., 2015.

This research proposes the expansion of knowledge associated with the use of simulation models of the hydrological process observed in heavy rainfall seasons. Connecting the meteorological, hydrological and hydrodynamic steps in a computational structure built on the understanding of the systems involved, this research aims to effectively provide support to emergency flood procedures facing. In the development of studies, the author have used data from meteorological models of mesoscale (ETA, BRAMS and WRF), which provided rainfall data for a hydrological model (HEC-HMS), which generated flows that were used as input to a hydrodynamic model (HEC-RAS), the latter the user function to generate variations in water levels throughout the course of the modeled river. The calibration models and integration studies were performed taking into account the possibility of different types of experimentation, within a computing platform that uses continuous hydrometeorological knowledge represented by the model of the basin under study. Recently in 2010 and 2011, the Una River basin, located in South Forest of Pernambuco, was the scene of major floods that brought serious damages to the local population. This research was conducted as a way to build the current understanding of the physical processes occurring in floods, aiming to develop a tool that supports decision makers in terms of prediction of flood events. As achievements, the integrated modeling system built proved to be able to perform efficient hydro-meteorological simulations, characterizing itself as a powerful tool, in the decision support will to face floods, also in research and development of hydrological and hydrodynamic models for other basins.

Keywords: Forecasting and flood control, Decision support system, Integrated hydrological-hydrodynamic modeling, Una river basin.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Mecanismo de controle do impacto da drenagem urbana no escoamento, (Tucci, 2004).....	28
Figura 2: Variação do número de enchentes, por continente entre 1950 e 2000, (Cirilo, 2012).....	30
Figura 3: Níveis de severidade das enchentes, adaptado de Calianno, Ruin e Gourley (2013).....	31
Figura 4: Imagem do satélite GOES em 02/Jun/2005 mostrando o fenômeno da onda de leste, chegando ao litoral do estado de Pernambuco, (Aragão, Araújo e Lacerda, 2006).	38
Figura 5: Representação em modelo hidrológico da bacia do rio Negro, (Getirana et al., 2010).	40
Figura 6: Perfis de escoamento simulados pelo modelo MIKE 11, (Pramanik, Panda e Sen, 2010).....	43
Figura 7: Redes de trabalho como núcleo de integração, adaptação de Brimicombe (2010).	47
Figura 8: Relacionamento entre os módulos do sistema integrado, (Magalhães, 2005).	49
Figura 9: Partes básicas de um SAD para questões ambientais, adaptação de Poch et al. (2004).	52
Figura 10: Sistema de alerta da bacia do rio Doce, (CPRM, 2015).	56
Figura 11: Sistema de alerta da bacia do rio Itajaí, (ITAJAÍ, 2015).....	57
Figura 12: Sistema de alerta de emergências ambientais do estado do Rio de Janeiro, (INEA, 2015).	57
Figura 13: Sistema de alerta de inundações de São Paulo, (FCTH, 2015).	58
Figura 14: Localização do estado de Pernambuco no Brasil e da bacia do rio Una (Num. 5) no conjunto das bacias do estado, (FIDEM, 2006).	59
Figura 15: Mapa da bacia do rio Una, com rede hidrográfica, (SRHE, 2015).	60
Figura 16: Relevo e hidrografia da região da bacia do rio Una.	62
Figura 17: Os três domínios de utilização de dados pelo sistema.	64
Figura 18: Imagens do satélite GOES12, durante a enchente de 2010.	66
Figura 19: Imagens do satélite GOES12, durante a enchente de 2011.....	66
Figura 20: Agrupamento de organizações que integram a pesquisa.	71
Figura 21: Modelo de estrutura de informações do sistema desenvolvido.	73
Figura 22: Esquema geral do Sistema de Monitoramento Avançado de Enchentes.	75

Figura 23: Estrutura geral do MAVEN, com blocos de processos e conjuntos de dados interligados, além de atribuições de usuários.	77
Figura 24: Área de recorte para extração dos dados de previsão de chuvas.	83
Figura 25: Representação do cálculo do escoamento pelo HEC-HMS, adaptado de Feldman (2000).	86
Figura 26: Componentes da equação de perda da energia, adaptação de Brunner (1995).	87
Figura 27: Web-page de entrada no sistema MAVEN.	93
Figura 28: Tela principal do sistema e suas áreas específicas.	94
Figura 29: Área de funcionalidades do sistema	94
Figura 30: Tela de monitoramento do MAVEN e janela de consulta de dados hidrológicos.	95
Figura 31: Exemplo dos dados obtidos no Web Service da ANA.	96
Figura 32: Tela de monitoramento do MAVEN, janela de consulta de dados de previsão de chuvas.	97
Figura 33: Exemplo dos dados de previsão para um ponto da grade.	97
Figura 34: Discretização da bacia do Una no modelo HEC-HMS, (Neto et al., 2014).	100
Figura 35: Janela mostrando elementos da simulação.	102
Figura 36: Janela do ArcMap com modelo TIN e seções.	102
Figura 37: Modelo do rios Una, Piranji e Panelas, com todas as seções e trechos.	103
Figura 38: Janela do HEC-RAS, geometria do modelo e perfil da seção.	103
Figura 39: Localização e numeração das seções do modelo HEC-RAS usadas para avaliação dos resultados das simulações.	105
Figura 40: Estações automáticas usadas para simulação com dados observados.	106
Figura 41: Variação das chuvas na parte Alta (Cachoeirinha) da bacia e variação de nível na seção associada a esta parte da bacia.	107
Figura 42: Variação das chuvas na parte Alta (Cachoeirinha) e Média da bacia e variação de nível na seção associada a estas partes da bacia.	107
Figura 43: Variação das chuvas na parte Média da bacia e variação de nível nas seções associadas a esta parte da bacia.	108
Figura 44: Variação das chuvas nas partes Alta, Média e Baixa da bacia e variação de nível nas seções associadas a estas partes da bacia.	109
Figura 45: Variação das chuvas na parte Alta (Cachoeirinha) da bacia e variação de nível na seção associada a esta parte da bacia.	110
Figura 46: Variação das chuvas na parte Média da bacia e variação de nível na seção associada às partes Alta (Cachoeirinha) e Média da bacia.	110

Figura 47: Variação das chuvas na parte Média da bacia e variação de nível nas seções associadas a esta parte da bacia.	111
Figura 48: Variação das chuvas nas partes Alta, Média e Baixa da bacia e variação de nível nas seções associadas a estas partes da bacia.	112
Figura 49: Janela com elementos da simulação e pontos de dados de previsão do ETA.	113
Figura 50: Previsão das chuvas (médias dos pontos) na parte Alta da bacia e variação de nível na seção associada a esta parte da bacia.	114
Figura 51: Previsão das chuvas (médias dos pontos) nas partes Alta e Média da bacia e variação de nível na seção associada a estas partes da bacia.	114
Figura 52: Variação das chuvas (médias dos pontos) na parte Média da bacia e variação de nível nas seções associadas a esta parte da bacia.	115
Figura 53: Variação das chuvas (médias dos pontos) nas partes Alta e Média da bacia e variação de nível na seção associada a estas partes da bacia.	116
Figura 54: Variação das chuvas (médias dos pontos) nas partes Baixa da bacia e variação de nível na seção associada às partes Alta, Média e Baixa da bacia.	116
Figura 55: Variação das chuvas na parte Alta (Cachoeirinha) da bacia e variação de nível na seção associada a esta parte da bacia.	117
Figura 56: Variação das chuvas na parte Alta (Cachoeirinha) e Média da bacia e variação de nível na seção associada a essas partes da bacia.	118
Figura 57: Variação de nível nas seções associadas à parte Média da bacia.	118
Figura 58: Variação das chuvas nas partes Alta (Cachoeirinha), Média e Baixa da bacia e variação de nível nas seções associadas a estas partes da bacia.	119

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Municípios da bacia do Una.....	63
Tabela 2: Estações automáticas PCDs usadas no estudo.	65
Tabela 3: Partes dos percursos (PATHs) de acesso aos dados dos arquivos DSS.	90
Tabela 4: Arquivos e campos de controle do HEC-HMS, alterados pelo MAVEN. ..	91
Tabela 5: Arquivos e campos de controle do HEC-RAS, alterados pelo MAVEN....	91
Tabela 6: Elementos do acoplamento entre os modelos HEC-HMS e HEC-RAS..	101
Tabela 7: Valores de vazão mínima, para efeitos de simulação.....	104
Tabela 8: Seções usadas para avaliação dos resultados da simulação	105

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AHPS	Advanced Hydrologic Prediction System
ANA	Agência Nacional de Águas
APAC	Agência Pernambucana de Águas e Clima
ARMA	Auto-Regressive Moving Average
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
ASTER GDEM	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Global Digital Elevation Model
BRAMS	Brazilian Regional Atmospheric Modeling System
CCM	Complexos Convectivos de Mesoescala
CMORPH	Climate Prediction Center Morphing Technique
CN	Curve Number
CNPq	Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento
CPC	Climate Prediction Center
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
CTG	Centro de Tecnologia e Geociências
CUAHSI-HIS	Consortium of Universities for the Advancement of Hydrologic Science - Hydrologic Information System
DOL	Distúrbios Ondulatórios de Leste
DSS	Data Storage System
ECMWF	Ensemble Prediction System
EFAS	European Flood Alert System
EFS	Ensemble Forecasting Systems
EP	Ensemble Prediction
EPS	Ensemble Prediction System
ESM	Earth System Model
FCTH	Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica
FEWS	Flood Early Warning System
FRDST	Flood Risk Decision Support Tools
FTP	File Transfer Protocol

GMT	Greenwich Meridian Time
GOES	Geostationary Operational Environmental Satellite
GPS	Global Position System
GRIB	General Regularly-distributed Information in Binary
HDT	Hasse Diagram Technique
HEC	Hydrologic Engineering Center
HEC-DSS	Hydrologic Engineering Center - Data Storage System
HEC-HMS	Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System
HEC-RAS	Hydrologic Engineering Center – River Analysis System
HEPEX	Hydrologic Ensemble Prediction Experiment
IGAM	Instituto de Gestão das Águas de Minas Gerais
INEA	Instituto Estadual do Ambiente
IPH	Instituto de Pesquisas Hidráulicas
JAXA	Japan Aerospace Exploration Agency
KML	Keyhole Markup Language
LAMEPE	Laboratório de Meteorologia de Pernambuco
LFEWS	Local Flood Early Warning System
LIDAR	Light Detection and Ranging
MAVEN	Monitor Avançado de Enchentes
MDT	Modelo Digital de Terreno
MGB-IPH	Modelo de Grandes Bacias - Instituto de Pesquisas Hidráulicas
MM5	Mesoscale Model – Fifth Generation
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NOAA	National Ocean e Atmospheric Administration
NRM	Natural Resource Management
NWP	Numerical Weather Prediction
NWS	National Weather Service
OASIS2	Ocean, Atmosphere, Sea, Ice, Soil – 2
OpenMI	Open Modeling Interface
PCD	Plataforma de Coleta de Dados
PERH-PE	Plano Estadual de Recursos Hídricos de Pernambuco
PoP	Probability of Precipitation

PRECIS	Providing REgional Climates for Impacts Studies
PROMETHEE	Preference Ranking Method for Enrichment Evaluation
RAMS	Regional Atmospheric Modelling System
RSMT	River System Management Tool
SACE	Sistema de Alerta de Eventos Críticos
SAD	Sistema de Apoio à Decisão
SAISP	Sistema de Alerta de Inundações de São Paulo
SCS	Soil Conservation Service
SEINFRA	Secretaria de Infraestrutura do Estado de Pernambuco
SGI	Sistema Gerencial de Informações Hidrológicas de Pernambuco
SHAVE	Severe Hazards Analysis and Verification Experiment
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SMA	Soil Moisture Accounting
SMS	Short Message System
SRHE	Secretaria de Recursos Hídricos e Energéticos
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
SSD	Sistema de Suporte à Decisão
STAR	Center for Satellite Applications and Research
TIN	Triangulated Irregular Network
tRIBS	TIN based Real-time Integrated Basin Simulator
TRMM	Tropical Rainfall Measuring Mission
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UML	Unified Modelling Language
UPE	Universidade de Pernambuco
USACE	US Army Corp of Engineering
WRF	Weather Research and Forecasting
XML	Extensible Markup Language
ZCIT	Zona de Convergência Inter-Tropical

SUMÁRIO

1	Introdução	18
1.1	Apresentação	18
1.2	Objetivo Geral	23
1.3	Objetivos Específicos	23
1.4	Estrutura da Tese	24
2	Revisão da Literatura	25
2.1	A Dinâmica das Enchentes e sua Previsibilidade	25
2.2	Modelagem de Eventos de Enchentes	34
2.2.1	Modelagem Meteorológica.....	36
2.2.2	Modelagem Hidrológica	38
2.2.3	Modelagem Hidrodinâmica	42
2.3	Integração de Modelos Ambientais	46
2.4	Sistemas de Alerta e Suporte à Decisão em Enchentes	51
3	Área de Estudo e Conjuntos de Dados	59
3.1	Área de Estudo: A Bacia do Rio Una em Pernambuco	59
3.1.1	Hidrografia.....	60
3.1.2	Climatologia	61
3.1.3	Geologia.....	61
3.1.4	Geomorfologia e Relevô	61
3.1.5	Solo, Vegetação e Uso das Águas	62
3.1.6	Socioeconomia.....	63
3.1.7	Impactos Ambientais.....	63
3.2	Conjuntos de Dados Utilizados	64
3.2.1	Dados Meteorológicos	65
3.2.2	Dados Hidrológicos.....	69
3.2.3	Dados Geográficos	69
4	Metodologia e Estrutura do Sistema de Modelagem Integrada.....	70
4.1	Análise do Problema	70
4.2	Estruturação do Sistema Computacional	72
4.2.1	Definição da Estrutura de Dados e Procedimentos	74
4.2.2	Definição da Arquitetura Geral do Sistema	76
4.2.3	Captura de Dados Externos.....	81
4.3	Mecanismos de Integração de Modelos e Dados	83
4.3.1	Escolha dos Modelos, Hidrológico e Hidrodinâmico.....	84
4.3.2	Integração de Modelos de Simulação	88
4.4	Operacionalidade do Sistema	91
4.4.1	Automação de Tarefas e o Usuário MAVEN	92
4.4.2	Interação dos Usuários com a Interface Web.....	92
4.4.3	Administração do Cadastro de Informações Básicas.....	94
4.4.4	Monitoramento	94
4.4.5	Execução de Modelos de Simulação Integrados.....	98

5	Resultados Obtidos	99
5.1	Estado Operacional do Desenvolvimento do Sistema	99
5.2	Modelagem Hidrológica e Hidrodinâmica da Bacia do Rio Una	100
5.2.1	<i>Modelo Hidrológico</i>	<i>100</i>
5.2.2	<i>Modelo Hidrodinâmico</i>	<i>101</i>
5.3	Simulações Executadas com o Sistema	104
5.3.1	<i>Simulações com Dados Observados.....</i>	<i>105</i>
5.3.2	<i>Simulações com Dados de Previsões</i>	<i>113</i>
5.3.3	<i>Simulações com Dados de Cenários.....</i>	<i>117</i>
5.4	Análise da Viabilidade do Uso de Estimativas de Chuva de Satélites	120
6	Discussão dos Resultados	123
7	Conclusões e Recomendações.....	128

1 Introdução

1.1 Apresentação

O gerenciamento hídrico é uma tarefa que requer o conhecimento e o trabalho sobre um complexo sistema de elementos ativos e passivos que se inter-relacionam dinamicamente e constituem o que se costuma chamar de meio ambiente. Uma das constituintes fundamentais do meio ambiente são as águas, que para a sociedade humana se mostra como recurso hídrico. Basicamente as águas no planeta, dividem-se em marítimas, terrestres e atmosféricas. O movimento atmosférico das águas é responsável pelo transporte das águas marinhas para os continentes, sendo o motor principal do ciclo hidrológico. A parte terrestre desse ciclo hidrológico, por sua vez, é constituída pelos fluxos subterrâneo e superficial, sendo o fluxo superficial das águas, o objeto principal desse estudo.

O movimento das águas na superfície dos continentes do planeta Terra é baseado na geomorfologia das áreas de captação de precipitações, ou seja, das bacias hidrográficas. Uma bacia hidrográfica é o palco de um dos fenômenos mais importantes para os seres vivos da Terra, que é a precipitação de águas dos mares, trazidas para terra firme pelas nuvens. O fluxo de água acima e abaixo da superfície da Terra cria nascentes, córregos, riachos, lagos, lagoas, rios e pântanos. Atualmente pode-se observar que esses mananciais se encontram bastante alterados pelo processo desenvolvimentista da espécie humana, processo esse que, em muitas ocasiões, não leva em consideração fatores básicos de conservação, implicado em comprometimentos sérios para os usuários desta água.

Nos dias de hoje, vários setores da sociedade se organizam para enfrentar problemas ambientais causados pela acelerada expansão desta mesma sociedade, que tem alterado mais e mais os ecossistemas dos lugares onde se instala desde a época das grandes navegações. Recentemente, por conta do desenvolvimento de ferramentas tecnológicas de avaliação de impactos, aliada a uma visão mais sistêmica do mundo, grupos de cientistas procuram soluções viáveis de engenharia, que possam ser integradas a políticas públicas mais desenvolvidas, tentando assim reverter desequilíbrios já instalados nos ecossistemas hídricos do planeta, de forma

que as próximas gerações tenham menos problemas de acesso às águas.

Quando tratadas através de um projeto de desenvolvimento local ambientalmente equilibrado, as questões relacionadas ao gerenciamento de recursos hídricos mostram caminhos sustentáveis para nossa sociedade. Além disso, elas representam também oportunidades para aprofundar os estudos sobre os complexos conjuntos de objetivos múltiplos, recursos restritos e exigências de sustentabilidade. Esses aspectos tomam importância cada vez maior diante da incerteza de cenários futuros, verificados pelos mais recentes resultados dos estudos climatológicos feitos nos grandes centros de pesquisa climática mundial.

Por sua vez, os fenômenos associados às questões hídricas mostram um nível de complexidade que exige o conhecimento de muitos especialistas, conjuntamente com o emprego de modernas ferramentas tecnológicas, tanto no que diz respeito ao uso de equipamentos poderosos, quanto ao desenvolvimento de sistemas de informações avançados e flexíveis. Diretamente associado a esse fato, o tema da previsão de eventos hidrológicos extremos se caracteriza pela utilização de ferramentas computacionais avançadas e procedimentos de modelagem hidrológica e hidrodinâmica, que simulam o comportamento dos principais fenômenos físicos envolvidos nos eventos de enchentes. A esses modelos hidrológicos são submetidos dados de previsões meteorológicas, com o objetivo de avaliar as consequências, nos níveis de água de determinados pontos do rio, diante das ocorrências de grandes chuvas previstas pelos modelos meteorológicos.

Apesar de ter clara a percepção da complexidade do tema, é notório observar que, nas últimas décadas, as tecnologias têm nos propiciado uma grande variedade de mecanismos e procedimentos que, empregados isoladamente ou em conjunto, fornecem aos especialistas em recursos hídricos, fontes interativas de informação, bem qualificadas e quantificadas, além de conjuntos de dados bem distribuídos temporal e espacialmente. Considera-se nesse contexto, o avanço das interfaces homem-máquina, a obtenção de novas e mais precisas imagens de satélites, o uso de supercomputadores, softwares inteligentes, sensores mais precisos para mapeamentos, entre outros fatores.

O estudo do processo físico observado em enchentes e dos desdobramentos que este processo pode ter, nas cidades ribeirinhas atingidas pelo evento, revela-se como premente para minimização de perdas materiais e vidas humanas.

Atualmente, no contexto mundial, enchentes são os fenômenos naturais que mais resultam em vítimas fatais, sem contar o grande volume de perdas materiais e em deslocamentos de famílias. Dados recentes mostram o aumento do número de enchentes com grandes prejuízos ao redor do mundo. Estes dados refletem não só o aumento populacional por si só, mas também a consequência histórica de terem sido os rios no passado, uma das principais vias de transporte, propiciando o estabelecimento de comunidades e vilas nas margens dos principais cursos navegáveis.

Em decorrência do estabelecimento das cidades ribeirinhas e de seu aumento demográfico, as enchentes passaram a ter efeitos, não só no carreamento natural de sedimentos, mas também nas habitações que ocupam em grande número, a calha transbordável dos principais rios. Estas ocupações, em sua maior parte desordenadas, levam a situações críticas como a de Palmares, onde se observa que grande parte da cidade está construída dentro da calha do rio Una, sobre um grande banco de areia. As soluções para este tipo de situação de risco passam por medidas estruturantes e dispendiosas, como a construção de barramentos para contenção de vazões ou a retirada da população de áreas mais susceptíveis, mas também envolvem procedimentos estratégicos, como o melhoramento dos sistemas de informação para alertas preventivos.

Investigando os acontecimentos, no âmbito do gerenciamento dos eventos de enchentes, ocorridos durante as cheias de 2010 e 2011 na região da Mata Sul do estado de Pernambuco, pôde-se observar a carência grande de informações em termos de dados em tempo real, para lidar com os eventos extremos ocorridos. Durante as cheias foram montadas “forças tarefa” formadas por hidrólogos, meteorologistas, engenheiros, gestores de recursos hídricos, órgãos da defesa civil, bombeiros e representantes das prefeituras das cidades ribeirinhas. Esse grupo todo se reunia em torno de computadores que acessavam, de maneira não automática, os dados das PCDs, mostrando o nível dos rios e a quantidade de chuvas que estava sendo medida.

Mediante o exame dos fluxos de informações, estrutura dos procedimentos e elementos atuantes no processo de enfrentamento de enchentes no estado de Pernambuco, entendeu-se que a dinâmica das tomadas de decisão está diretamente associada ao acompanhamento dos parâmetros hidrológicos dos

cenários enfrentados, bem como do comportamento hidráulico dos canais, nas bacias sob risco. Esse conjunto de dados e mecanismos mostra como está a situação de uma bacia naquele momento, no que se refere aos níveis instantâneos dos rios. No entanto, de acordo com o que se pôde avaliar, para se ter um enfrentamento eficiente de situações de enchentes, é preciso ter alguma ideia sobre as configurações meteorológicas futuras, que poderão agravar a situação atual, ou amenizá-la.

Dentro desse raciocínio, deduziu-se que um gestor público, responsável pelas tomadas de decisão no enfrentamento de situações de enchentes, precisa não somente, ter capacitação técnica para exercer tal função, mas também contar com um ferramental de informações e conjuntos de procedimentos modelados, que lhe forneçam de forma rápida e o mais precisamente possível, um quadro claro e facilmente visualizável da situação atual do evento de enchente, bem como das possibilidades de desdobramento futuro. Podendo inclusive ter acesso a simulações de comportamento hídrico baseados em cenários hipotéticos, gerados no momento exato do enfrentamento, por técnicos mais experientes.

Esse tipo de informação precisa estar disponível para o gestor a qualquer instante e, com a utilização dos mecanismos de comunicação atuais, levar os alertas aos gestores, onde quer que eles estejam. Além disso, o sistema deveria poder simular determinados cenários hidrometeorológicos e avaliar possíveis consequências. Funcionando desta maneira, um sistema pode vir a ser considerado uma ferramenta de apoio à decisão.

Foi verificado, através da análise da resposta aos eventos de enchentes ocorridas em 2010 e 2011 na mata sul de Pernambuco, que os órgãos de gerenciamento dos recursos hídricos e ações sociais têm uma grande necessidade de dados e informações hidrometeorológicas especializadas. Estes dados devem poder auxiliar os técnicos no acompanhamento dos níveis da água dos rios, bem como dos índices de precipitação instantânea, durante os eventos de enchentes. Além disso, estas informações tem que chegar aos gestores de forma rápida, confiável, sumarizada e de fácil visualização, fornecendo inclusive a capacidade para avaliações de cenários futuros.

Trabalhando na construção de sistemas de informações que possam efetivamente apoiar os gestores de recursos hídricos, a lidar com eventos

hidroclimatológicos extremos causadores de enchentes, hidrólogos e meteorologistas aliam-se a cientistas computacionais para criar e fazer uso de modelos numéricos. Esses modelos procuram representar, o mais precisamente possível, os principais fenômenos físicos envolvidos em acontecimentos dos eventos em estudo, sendo esses fenômenos observados em três principais grupos: os fenômenos hidroclimatológicos, que tratam das interações da água na atmosfera; os fenômenos hidrológicos, que envolvem a passagem da água, da atmosfera para o solo e; os fenômenos hidrodinâmicos, que se constituem na maneira com que a água se movimenta na superfície do solo.

Em termos de modelagem hidrológica, a unidade de estudo é a bacia hidrográfica, a qual pode ser vista como uma superfície em forma de árvore, cujos troncos e galhos são os rios e riachos, com seus trechos interligados, formando uma rede de drenagem. O movimento da água, descendo nesta rede de canais, forma uma onda hídrica que pode ser calculada por esquemas de utilização de equações diferenciais, simulando o processo hidrodinâmico da água nos rios. Na entrada desse processo hidrodinâmico se encontra o processo hidrológico, que é a transformação chuva-vazão, caracterizando-se esta pela aplicação do balanço hídrico na bacia. Esta parte do ciclo hidrológico, por sua vez, é precedida pelo processo atmosférico de condensação vapor-chuva, mais comumente chamado de precipitação. Como esses processos acontecem muitas vezes simultaneamente, um procedimento computacional que se proponha a representá-los, deverá prover, em algum nível, a integração dos modelos que os representem. Esta integração de modelos pode ser obtida pela construção de um sistema de informações que seja flexível e adaptável às condições ambientais de cada bacia, trabalhando sobre um conjunto de dados comum.

Para a materialização desta premissa, está sendo construído na UFPE, um sistema de informações para monitoramento avançado de enchentes, para uso (inicialmente) no estado de Pernambuco. Esse sistema agrega, processa e distribui informações de várias instituições, com a utilização dos três grupos de modelos que representam as enchentes. Esta Tese apresenta o embasamento teórico e metodológico associado ao desenvolvimento desse mecanismo computacional, integrando os modelos estudados, no sentido de efetivamente auxiliar os tomadores de decisão a enfrentar situações de enchentes em bacias hidrográficas.

1.2 Objetivo Geral

Caracterizar e conectar as etapas, meteorológica, hidrológica e hidrodinâmica, observadas em situações de enchentes, em uma estrutura computacional que possa servir efetivamente de apoio aos procedimentos emergenciais de enfrentamento de enchentes.

1.3 Objetivos Específicos

Esse trabalho inclui três objetivos específicos, associados aos domínios de conhecimento envolvidos no problema, esses são:

- a) Criar um modelo para interconexão de informações hidrometeorológicas, de forma automática, dinâmica e configurável, que possa ser utilizado, tanto no âmbito acadêmico, com a experimentação de modelos e geração de informações hidrometeorológicas, quanto no nível gerencial público, como suporte a tomadas de decisão baseadas em estudos científicos;
- b) Integrar diversas fontes de dados, disponíveis em órgãos e instituições governamentais de gestão e pesquisa, em um mecanismo computacional que operacionalize um integrador de informações e um simulador de cenários, em tempo real, com acesso facilitado e alto grau de adaptabilidade às mudanças nos parâmetros reais das bacias em estudo;
- c) Fornecer aos especialistas, reunidos em salas de situação, uma ferramenta de acesso a um conjunto integrado de informações e funcionalidades baseadas em estudos científicos, que possam efetivamente apoiar decisões de enfrentamento de ocorrências de enchentes em áreas urbanas ribeirinhas;

1.4 Estrutura da Tese

Esse texto está organizado da seguinte maneira:

O Capítulo 1 trata da Introdução, onde é feita uma apresentação geral da problemática a ser estudada como assunto da pesquisa. Dentro desse contexto, o objetivo da pesquisa é definido, bem como os objetivos específicos que o compõe. Ainda no Capítulo 1 são colocadas razões relevantes para a realização desse trabalho e sua estrutura documental é especificada. No Capítulo 2, a Revisão da Literatura referencia os quatro domínios do conhecimento investigados, quer sejam: a dinâmica das enchentes e sua previsibilidade; a modelagem de eventos de enchentes; aspectos computacionais e hidrológicos da integração de modelos; as ferramentas de apoio à decisão, para o enfrentamento de enchentes.

No Capítulo 3 são definidos os elementos básicos da pesquisa, que são a Área de Estudo e os Conjuntos de Dados utilizados, salientando a característica de flexibilidade desses elementos, desejada ao desenvolvimento do projeto. No Capítulo 4 são apresentados os procedimentos que foram utilizados no tratamento dos dados, bem como as estratégias adotadas e os parâmetros de contorno da pesquisa. Esse conjunto é representado pela Metodologia seguida no desenvolvimento do estudo e obtenção do resultado final. Nesse Capítulo são definidos os detalhes de especificação e construção do modelo de sistema de informações, isto é, como foi feito e como interagem seus módulos e funcionalidades, dentro de um conceito de modelagem integrada.

No Capítulo 5 são apresentados os Resultados do trabalho de investigação em busca de um modelo de sistema de informação para alerta de enchentes, mostrando que, além dos objetivos iniciais, alguns resultados extras foram conseguidos. No Capítulo 6, a discussão dos resultados é o espaço para análise crítica do que foi exposto no capítulo anterior, do ponto de vista dos objetivos inicialmente definidos.

O Capítulo 7 apresenta as Conclusões e Recomendações, mostrando que o término da tese representa tão somente o fechamento de uma fase no desenvolvimento do sistema e que muitas outras podem vir. Finalizando o texto, estão as Referências utilizadas durante a pesquisa.

2 Revisão da Literatura

O conjunto de temas, que envolvem o estudo de um procedimento que auxilie tomadores de decisão no enfrentamento de situações de enchentes, apresenta quatro domínios principais de conhecimento como pilares do estudo por completo. No primeiro tema, os eventos de enchentes são caracterizados, do ponto de vista do fenômeno ambiental, suas causas e consequências, bem como seu grau de previsibilidade. No segundo tema, a modelagem hidrometeorológica é apresentada em seus componentes básicos e estruturas correlatas, especificando conceitos necessários à compreensão dos passos seguintes. No terceiro tema, é abordada a integração de modelos como estratégia de implementação de simulações de enchentes, envolvendo algum grau de previsibilidade.

Concluindo a revisão da literatura, o quarto tema apresenta as possibilidades de desenvolvimento de um sistema de apoio à decisão para o enfrentamento das consequências de enchentes, que possa aplicar de forma efetiva, os conhecimentos desenvolvidos.

2.1 A Dinâmica das Enchentes e sua Previsibilidade

Para o estudo da previsão de enchentes, dois aspectos são evidentes, semanticamente: (1) O que são, conceitualmente e fisicamente, as enchentes? No caso desse estudo, entende-se que enchentes são eventos e não objetos, ou seja, as enchentes são acontecimentos e, por conseguinte têm uma dinâmica; (2) As possibilidades e experiências com previsões de eventos de enchentes. Previsibilidade esta, que atualmente está ligada estritamente às condições tecnológicas, que coletam e processam todo o imenso conjunto de dados necessários ao emprego de modelos de simulação.

Em um dos vários estudos sobre as enchentes, Harvey (1971) analisou fatores causadores desse tipo de evento na bacia do rio Ter, na Inglaterra. Com base na análise do hidrograma unitário, conclui-se que esses fatores estão diretamente ligados à duração e intensidade das chuvas, assim como indiretamente

também estão ligados às estratégias de uso da terra e ao tipo de solo. Para Balica et al. (2013), enchentes são basicamente consequências de eventos meteorológicos e, em termos físicos, uma enchente é caracterizada por sua duração, velocidade e a dimensão de sua planície de inundação, sendo esses elementos inter associados às características topológicas, hidrográficas e econômicas das bacias.

Watt (1971) realizou um estudo do comportamento de pequenas enchentes, em pequenas bacias, e concluiu que os eventos de enchentes de pequenas magnitudes podem ser representados por uma constante obtida da relação entre a descarga de pico e a máxima vazão em 24 horas.

Em Fucheng, Yuanjun e Manhua (1987) encontra-se um estudo sobre a frequência observada em grandes enchentes no rio Amarelo, na China, com base na análise das camadas de lodo. Nesse caso, o estudo da frequência das enchentes foi importante para determinação dos tempos de recorrência e sua relação com os parâmetros meteorológicos observados na bacia estudada.

Takeuchi (1988) também fez um interessante estudo sobre as características das enchentes, no que diz respeito à sua persistência hidrológica. O autor mostra que as curvas de duração de precipitação podem servir para classificação das chuvas, além disso, analisando também as curvas de duração de vazões, ele imputa maior responsabilidade pelos efeitos das chuvas ao aspecto geomorfológico das bacias, que propriamente à distribuição das chuvas.

Shu e Finlayson (1993) apresentam um estudo sobre as enchentes no baixo curso do rio Amarelo, na China, citando as estratégias de construção de barragens e diques de contenção como sendo as medidas escolhidas para mitigação dos efeitos das enchentes. Esse estudo mostra que estas estratégias não surtiram os efeitos desejados e ainda criaram outras situações indesejadas como assoreamento de grande parte do canal, além de várias situações onde houve o rompimento de diques, causando grandes perdas materiais e em vidas.

Os fatores citados acima, aliados à falta de planejamento de ocupação das planícies de inundação, surgem como agravantes dos eventos de enchentes, pois grandes comunidades com porte de cidades foram estabelecidas nas margens dos rios, causando um alto grau de impermeabilização do solo, conseqüentemente pequena infiltração. Além disso, observou-se que as chuvas nas regiões tropicais têm intensidade até 25% maior, que nas temperadas. Esse dado, associado ao fato

de que grande parte dos países que tem regiões tropicais é formada por países ainda em desenvolvimento, carentes de planejamento urbano e obras de infraestrutura, leva ao entendimento de que os maiores problemas relativos a enchentes, podem ocorrer em países da América do Sul, África e Oceania, (Tucci, 2002).

Para Plate (2002) as enchentes são eventos hidrológicos comuns, muitas vezes catastróficos, por causa da intervenção humana nas bacias hidrográficas. Sendo assim, o tratamento a ser dado a estas situações passaria pela adequação das soluções a um melhor nível operacional hidráulico, associado a melhores práticas de planejamento, às quais consideram a utilização dos últimos avanços científicos na análise dos cenários de risco enfrentados, objetivando a criação de políticas de desenvolvimento com critérios ambientais.

Simonovic e Carson (2003) analisam as circunstâncias hidrológicas e sociológicas envolvendo a enchente de 1997, no rio Vermelho, no Canadá, em especial no que diz respeito aos efeitos observados na cidade de Winnipeg. No caso desta enchente, verificou-se que ela se deu em maior intensidade e menor espaço de tempo que a enchente de 1950, muito embora ambas tenham registrado o mesmo volume de águas. Nesse caso, o elemento “amortecedor”, que seria o nível de umidade do solo, antes das fortes chuvas, mostrou-se realmente muito alto, logo antes da enchente ocorrida em 1997.

Marchi et al. (2010) também apontam o fator da umidade prévia do solo como preponderante nos eventos de enchentes rápidas, sendo identificada a influência das relações entre a área da bacia e seu comprimento na magnitude dos eventos. Além disso, esse estudo discorre também sobre os efeitos do parâmetro densidade da rede como impactante na resolução temporal da resposta da bacia a um evento de alta pluviosidade.

Tucci (2004) apresenta um estudo sobre causas das enchentes e sobre procedimentos operacionais integrados para sua minimização. Esse estudo expõe um ciclo fechado envolvendo políticas públicas (ou a falta delas) que acarretam impermeabilização do solo e processos desordenados de ocupação das várzeas (Figura 1). Nesse caso, medidas equivocadas realizadas para mitigação das enchentes em um local irão apenas transferir o problema para jusante.



Figura 1: Mecanismo de controle do impacto da drenagem urbana no escoamento, (Tucci, 2004).

Em Côrtes (2009) encontra-se um interessante estudo dos tipos de enchentes, considerando os cenários de previsão, de enfrentamento e análise de danos, com esquema de detalhamento de riscos baseado em consultas à população.

Ruin et al. (2008) analisam a ocorrência da enchente de 2002 na região de Gard, na França, diante dos processos físicos e sociais observados naquela região. Nesse estudo é criada uma escala que relaciona a intensidade da enchente e o número de possíveis perdas de vidas humanas, a partir de contextos determinados de exposição das cidades, ao movimento de águas das enchentes rápidas (flash floods). Naturalmente, esse estudo também aponta as condições de ocupação das margens dos rios, a montante das cidades e a configuração hidráulica da calha do rio como fatores agravantes dos efeitos das enchentes em cidades ribeirinhas.

Também em Yu et al. (2009) encontra-se um levantamento histórico das enchentes na bacia de Yangtze, na China, onde se mostra a influência antrópica nas ocorrências de enchentes a partir de 1950. Esse estudo constatou que as enchentes se tornaram mais frequentes e com vazões de pico maiores devido principalmente à processos de desmatamento. Em se tratando do fator duração da enchente, têm-se as enchentes de grande duração, geralmente associadas às grandes bacias, como a amazônica ou ao Pantanal mato-grossense, e as enchentes

de curta duração, ou rápidas (flash floods), comumente verificadas em pequenas e médias bacias.

Segundo Borga et al. (2010), o estudo das enchentes rápidas tem muita importância, pois são elas que causam maior quantidade de vítimas fatais. Esse estudo foi dificultado pela pequena quantidade de estações de medição de dados, encontradas nas pequenas e médias bacias, forçando o uso de modelos de simulação para geração de dados, em seus estudos.

Marengo (2008) apresenta um estudo sobre previsões de mudanças climáticas, que indicam aumentos de índices pluviométricos médios em algumas regiões da América do Sul e, ao mesmo tempo, diminuição desses mesmos índices, em outras regiões. Esse estudo mostra que algumas regiões, principalmente no Norte e Nordeste do Brasil, onde as ocorrências de enchentes eram frequentes, devem ver diminuído o número desses eventos, enfrentando situações de escassez. Por outro lado, as regiões Sul e Sudeste, enfrentarão aumento das precipitações e, conseqüentemente, aumento da possibilidade de enchentes.

Em um estudo mais específico, Albuquerque e Galvínio (2010) apresentam cenários futuros de aumento das vazões na bacia do rio Una, em Pernambuco, com base em prognósticos de aumento das temperaturas médias resultantes do modelo PRECIS (Providing REgional Climates for Impacts Studies). Por sua vez, dentro do mesmo tema das mudanças climáticas, Arnell e Gosling (2013) avaliam os cenários de previsões de emissões de gases e mostra que a maioria dos modelos prevê aumentos consideráveis nos fluxos hídricos dos rios situados nas altas latitudes do planeta e, ao mesmo tempo, redução destas mesmas vazões, e conseqüentemente da frequência de enchentes, nas regiões tropicais. Isto deve ocorrer devido ao aumento das temperaturas médias, previstos por quase todos os modelos climatológicos.

Com relação à frequência das enchentes, Cirilo (2012) mostra que as enchentes têm aumentado em praticamente todas as regiões do mundo (Figura 2), tendo este fato várias razões históricas, mas principalmente se verifica o aumento dos eventos catastróficos de enchentes como uma consequência direta do aumento populacional nas áreas ribeirinhas, associado à degradação ambiental de grandes áreas das bacias, verificadas em muitas ocupações humanas, nestas mesmas regiões ribeirinhas.

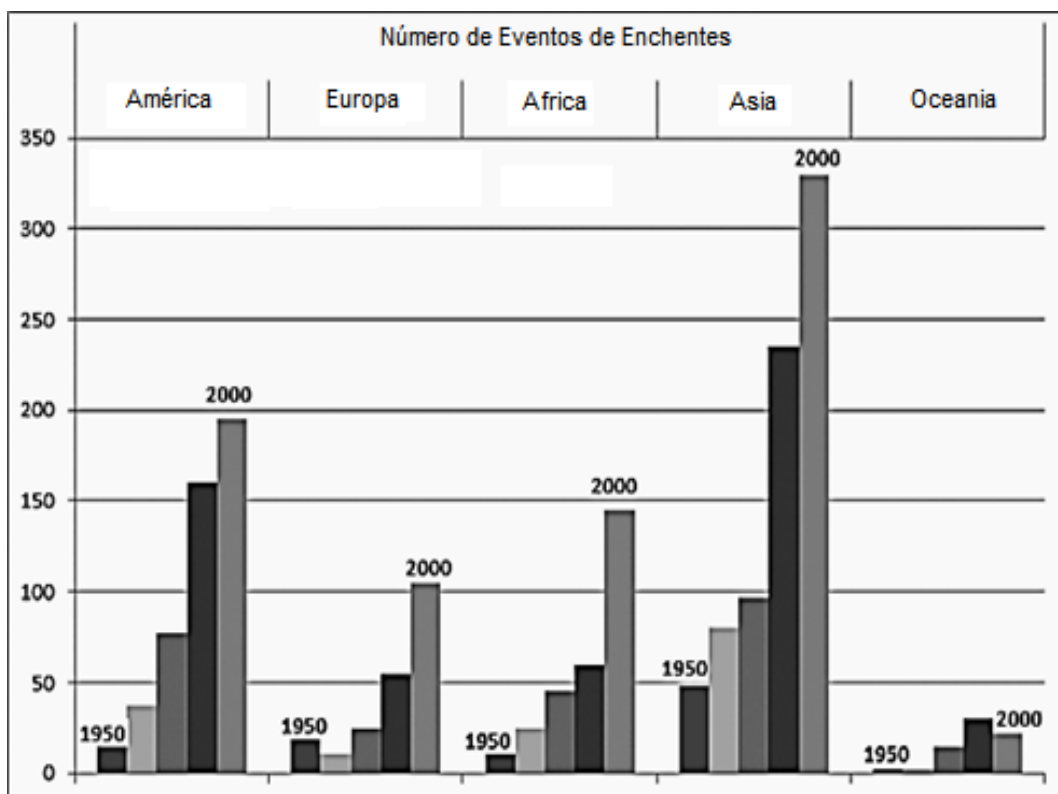


Figura 2: Variação mundial do número de enchentes, por continente entre 1950 e 2000. Adaptado de Cirilo (2012).

Segundo Dantas (2012), uma enchente pode ser caracterizada por uma elevação nos níveis normais de um curso hídrico, ultrapassando ou não, a sua calha habitual. Entender o fenômeno das enchentes envolve o estudo das características hidroclimáticas e hidromorfológicas das bacias, às quais estejam sujeitas a esses eventos extremos. O fenômeno das enchentes está associado diretamente, como fonte de sua existência, ao fenômeno das chuvas e estas são governadas por complexos mecanismos estudados a nível planetário na interação sol-ar-água-terra. Além do movimento natural das águas, as ações antrópicas como o desmatamento e a ocupação das planícies de inundação dos rios, atuam como agravantes dos efeitos das enchentes, principalmente em pequenas e médias bacias.

Observando o fato que as planícies de inundação possam determinar algum tipo de classificação das enchentes, Calianno, Ruin e Gourley (2013) apresentam um estudo sobre a vulnerabilidade ambiental da população às enchentes e provê uma escala de classificação (Figura 3) de impactos, baseada em dois conjuntos de dados, o SHAVE (Severe Hazards Analysis and Verification Experiment) e o NWS (National Weather Service).

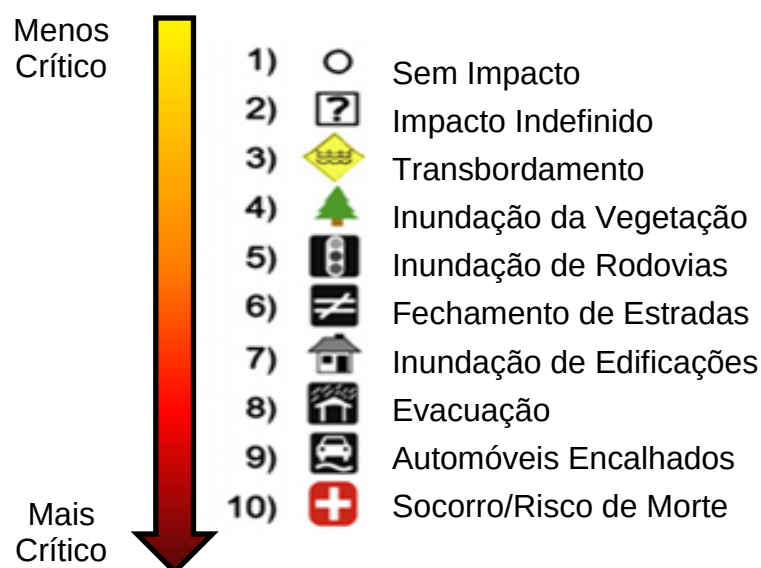


Figura 3: Níveis de severidade das enchentes. Adaptado de Caliano, Ruin e Gourley (2013).

Além da caracterização do mecanismo hidrometeorológico das enchentes, torna-se necessário também estudar os mecanismos matemáticos e computacionais que tenham capacidade de previsão com relação às vazões, ou níveis de água em determinadas partes dos cursos hídricos. Nesse aspecto, Nash e Sutcliffe (1970) trazem alguns princípios, tanto das previsões de vazões baseadas em modelos numéricos empíricos, quanto no uso de modelos conceituais. Nesse trabalho, várias ideias são básicas para os estudos futuros, principalmente o mecanismo “padrão” para avaliação do desempenho de modelos, mais conhecido como indicador de semelhança R^2 .

No Brasil, Tucci e Clarke (1980) analisam a capacidade dos modelos conceituais, baseados na estrutura do sistema, em relação aos modelos empíricos, montados unicamente sobre relações estatísticas. Algumas questões referentes ao volume de dados necessários aos procedimentos usados nos modelos conceituais são verificadas, pela maior precisão da modelagem conceitual.

Bertoni, Tucci e Clarke (1992) também avaliaram os mecanismos de previsão de enchentes através do uso de modelos conceituais, com relação à utilização de modelos empíricos baseados nas variáveis estatísticas: coeficiente de persistência e coeficiente de persistência ponderado. O estudo conclui que, na falta de dados suficientes para alimentar os modelos conceituais, o que pode ocorrer em pequenas bacias, os modelos empíricos conseguem atingir um nível de adequação satisfatório. Por sua vez, Silva, Tucci e Collischonn (2006) apresentam um conjunto

de ferramentas de previsão de eventos hidroclimáticos, definindo as características básicas dos procedimentos de previsão, até a verificação da necessidade da utilização de modelos conceituais com dados mais precisos e em maior consistência.

Tucci (1998) classifica os procedimentos que podem ser feitos para previsão de vazões em: (a) previsão de chuvas com modelos meteorológicos, integrada a modelos chuva-vazão; (b) estimativas de chuvas por radar, integradas a modelo chuva-vazão, integrada a rede pluviométrica; (c) estimativas de chuva com base em rede pluviométrica integrada a modelos chuva-vazão; (d) previsão de vazões com base em valores de montante; (e) previsão de vazões com o uso de valores de montante, integrados a algum dos procedimentos a, b ou c. Em Toth, Brath e Montanari (2000), encontra-se um interessante estudo da integração entre um processo de análise de séries temporais de chuvas e um modelo conceitual chuva-vazão, tendo um mecanismo de redes neurais como método de ajustes. Esse estudo mostra um comparativo entre a abordagem assumida para previsão de enchentes e as metodologias tradicionalmente usadas para esse fim.

Os modelos meteorológicos quase sempre são utilizados para fornecer dados para modelos chuva-vazão em procedimentos de previsão de vazões. Tucci et al. (2003) analisam esse tipo de aplicação, concluindo que se faz necessário o ajuste dos dados de chuva dos modelos meteorológicos, visto que esses apresentam tendências, às quais podem ser corrigidas por métodos estatísticos. Moore, Bell e Jones (2005) apresentam um excelente conjunto de princípios e técnicas empregados na previsão de vazões com o uso de modelos. Nesse trabalho são avaliadas as aplicações envolvendo dados de estimativas de radar, na melhoria do desempenho dos procedimentos de previsão hidrometeorológica, além das perspectivas para implementação de novos sistemas de previsão.

No aspecto teórico das previsões, Tucci e Collischonn (2006) mostram uma síntese dos aspectos principais relativos à previsão de enchentes, iniciando pela dependência da escala de tamanho da bacia, o que classifica os procedimentos pelo seu prazo de análise, ou seja, as bacias pequenas e médias necessitam previsões de curto prazo, com o uso de modelos meteorológicos, enquanto que as bacias de grande porte fazem um planejamento maior, com previsões de médio e longo prazo. Em Silva et al. (2007), encontram-se estudos abordando a previsão de

vazões utilizando-se dados de previsões de chuva do modelo ETA, do INPE/CPTEC (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais/Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos), como fonte de dados de entrada para o modelo MGB-IPH. Verificou-se que o modelo ETA apresentou melhor qualidade nas previsões para conjuntos acumulados de três dias, para o estudo de caso na bacia do rio São Francisco e, no caso de bacias menores, esses resultados podem variar bastante, em decorrência do fato que os modelos atmosféricos são ajustados para áreas maiores que a maioria das bacias.

Já o estudo de Lynch (2008) faz uma retrospectiva dos trabalhos que criaram os procedimentos de previsão numérica de clima (NWP – Numerical Weather Prediction), desde o desenvolvimento dos princípios da termodinâmica no início do século XIX, passando pelo uso intensivo da estatística, até o aparecimento dos mecanismos de previsões em conjunto (EFS – Ensemble Forecasting Systems) no final do século XX. Esses processos, eminentemente matemáticos, só tiveram grandes avanços após o surgimento dos grandes e poderosos sistemas computacionais, os quais implementaram grande parte dos conceitos e teorias até então vistas. Tucci et al. (2008) expõem resultados da experimentação chamada de HEPEX (Hydrologic Ensemble Prediction Experiment) na bacia do rio Grande, situado entre os estados de Minas Gerais e São Paulo. Esse estudo avaliou o mecanismo HEPEX para previsão de vazões em curto prazo (12 dias) e longo prazo (6 meses), verificando a adequação maior da abordagem utilizada, às situações de previsões de curto prazo. Também mostrando a tendência da utilização de previsões em conjunto (EP – Ensemble Prediction) de modelos meteorológicos, Cloke e Pappenberger (2009) fazem uma análise das razões que levaram esta estratégia de otimização dos produtos dos modelos meteorológicos a assumir um lugar importante nas recentes pesquisas em previsões de vazões, salientando porém, que existem várias dificuldades a serem enfrentadas para efetiva utilização desse tipo de mecanismo.

Outra tendência observada no âmbito da pesquisa em previsões de vazões está no uso de estimativas de satélites, nesse aspecto Fotopoulos, Makropoulos e Mimikou (2010) mostram algumas dificuldades desta técnica e apresentam uma ferramenta para facilitar a modelagem de fontes de dados com formatos quase sempre distintos entre si, como são os dados de satélites. Abordando também os

aspectos que diferenciam as fontes de dados e complicam os procedimentos de previsão de enchentes em tempo real, Remesan et al. (2010) analisam a influência dos intervalos de tempo no desempenho dos modelos de previsão de enchentes, sugerindo possíveis ferramentas a serem utilizadas para configuração do parâmetro intervalo de tempo.

Já Werner et al. (2013) apresentam os princípios que nortearam o desenvolvimento do Delft-FEWS (Delft – Flood Early Warning System), um abrangente sistema de previsão de enchentes criado em 1992 e que é atualmente utilizado em vários lugares do mundo, inclusive no Brasil, em Vitória, no Espírito Santo e na baía da Guanabara, no Rio de Janeiro. O desenvolvimento desse sistema envolveu um grande número de pesquisadores dos Estados Unidos e da Europa, que juntos criaram uma plataforma com múltiplas aplicações, em constante evolução.

Finalizando a parte referente à previsibilidade das enchentes, com um trabalho de revisão do estado da arte na previsão de enchentes, Henonin et al. (2013) contém um estudo sobre as possibilidades atuais e futuras, envolvendo a integração de modelos de chuva-vazão e de propagação de onda de cheia, enfocando as áreas urbanas e suas questões de difícil solução como crescimento desordenado e deficiências nos sistemas de drenagem.

2.2 Modelagem de Eventos de Enchentes

Para entender o que são e como interagem, os fenômenos físicos, o Ser humano racional analisa os problemas com o uso de informações e de concepção intelectual. Para isto, naturalmente ele faz uso de modelos, ou modelagem da realidade, aplicando um determinado grau de cognição e percepção das inter-relações que constituem a estrutura e dinâmica ambiental (Porto e Azevedo, 1997).

Para Tucci (1998), a modelagem é o processo que faz dos modelos, representações da realidade mensurável. Sendo assim, cada modelo carrega em si, um grau de aproximação entre seu funcionamento, expresso em seus resultados, e os valores das variáveis em estudo, verificadas no sistema real modelado. Os modelos podem ser classificados quanto a sua forma de utilização, em contínuo ou discreto, quanto à forma de utilização dos dados, em concentrado ou distribuído,

quanto à variabilidade de seus resultados, como estocástico ou determinístico e, finalmente, quanto a sua forma de construção, como conceitual ou empírico. Mais especificadamente, os modelos desenvolvidos para uso no gerenciamento de recursos hídricos são classificados como: (a) modelos de comportamento, os quais representam os mecanismos operativos do sistema em estudo; (b) modelos de otimização, que procuram, mediante a definição de funções de otimização e valores objetivo, atingir metas de representatividade; (c) modelos de planejamento, onde são simuladas condições dentro de escalas globais e intervalos de tempo maiores que a maioria das simulações experimentais. No caso dos modelos para representação do sistema hidroclimatológico onde se observam as enchentes, se verifica o uso de modelos de comportamento.

Christofolletti (1999) afirma que é necessário considerar os aspectos quantitativos e qualitativos de um ecossistema de maneira integrada, utilizando esquemas de modelagem que representem a dinâmica dos processos envolvidos, com razoável aproximação da realidade. Isto pode ser feito com vários tipos de modelos individualmente, ou através de mecanismos combinatórios entre esses. Atualmente, praticamente toda modelagem destinada a representar fenômenos ambientais deve estar conectada a elementos georreferenciados. Nesse ponto, Zeiler (1999) apresenta vários aspectos da modelagem de dados geográficos, associando dados numéricos ou textuais a objetos espaciais, dando assim aos processos de modelagem, um ponto de ligação que praticamente localiza as informações, trazendo a modelagem ambiental para mais perto da realidade.

Em Silva (2010) é colocado que modelos são representações da realidade, resultantes das capacidades e limitações do tipo de modelagem utilizada, bem como da influência da perspectiva do agente modelador. Desse modo, a modelagem permite a geração de subconjuntos das coisas e fenômenos observados no meio ambiente, com maior ou menor grau de aproximação dos aspectos reais, tendo relação direta com o ponto de vista do observador.

A partir da análise do desenvolvimento das pesquisas em tomada de decisão, entende-se que, para que os procedimentos relativos ao gerenciamento de recursos hídricos sejam efetuados de maneira eficiente, são necessários mecanismos que façam uso de modelos, tanto de disponibilidade quanto de demanda, (Welsh et al., 2013).

Brimicombe (2010) constitui uma importante fonte de informação sobre a modelagem ambiental, para a qual são descritas as relações da modelagem de recursos hídricos com as facilidades do geoprocessamento e georreferenciamento. Na sequência são detalhadas a tipologia dos modelos ambientais e suas formas de utilização, cobrindo praticamente todo o espectro de funcionalidades da modelagem ambiental.

2.2.1 Modelagem Meteorológica

A modelagem meteorológica se divide de acordo com a escala dos sistemas atmosféricos, desde a microescala, onde os eventos ocorrem até mais ou menos dez quilômetros de extensão, passando pela mesoescala, com sistemas de dez a algumas centenas de quilômetros de dimensão, até a escala sinóptica ou macroescala, envolvendo as grandes massas, que circundam o planeta. No caso, os eventos de enchentes são fenômenos para os quais se observa maior a influência dos sistemas atmosféricos de mesoescala (Pielke, 2002).

A partir de um estudo realizado na Amazônia, Calvet et al. (1997) mostraram que a modelagem meteorológica em meso-escala é diretamente influenciada pelas características das superfícies, tais como umidade e cobertura vegetal. Sendo que os processos de desmatamento criam alterações na homogeneidade da superfície, modificando os limites das camadas atmosféricas superiores às áreas desmatadas. A influência da cobertura vegetal também aparece em Chng et al. (2010), que apresentam estudos utilizando o modelo meteorológico MM5 (Mesoscale Model – Fifth Generation), onde são analisados os impactos da cobertura vegetal no comportamento dos modelos meteorológicos de mesoescala, verificando que alterações, principalmente causadas na velocidade dos ventos e na temperatura, são fatores preponderantes no funcionamento dos modelos.

Ducrocq, Tzanos e Sénési (1998) tratam da questão da sensibilidade dos modelos meteorológicos em mesoescala, aos parâmetros das condições iniciais, mostrando que uma maneira de se alcançar um maior grau de confiabilidade dos modelos meteorológicos é a montagem de conjuntos (Ensemble) integrados de simulações, com pequenas diferenças de condições iniciais, entre si.

Pielke (2002) contém um excelente material descritivo sobre a modelagem meteorológica em mesoescala, com detalhamento matemático dos componentes e fases da modelagem, incluindo relações de conservação de massa, equações básicas da análise espacial, parametrização dos processos termodinâmicos e definição de grades. Nesse trabalho, são apresentados os princípios da modelagem atmosférica em mesoescala, quer sejam: (1) conservação de massa; (2) conservação da energia; (3) conservação da quantidade do movimento; (4) conservação da água e; (5) conservação dos gases. A modelagem meteorológica se utiliza, em muitas ocasiões, de dados observados em estações de monitoramento e dados de chuva obtidos de estimativas de satélites para efeito de calibração dos modelos (Rozante, Gonçalves e Vila, 2010). Esses dados observados não são usados como modelos de previsão de precipitações, mas servem de instrumento para entendimento das relações entre a atmosfera e a superfície terrestre (Yang e Yang, 2014).

Segundo Moura et al. (2010), o comportamento dos modelos meteorológicos tem seu funcionamento relacionado a fatores, tais como: região de aplicação; época do ano; horário de execução; quantidade e qualidade dos dados de entrada. A partir dessa constatação, vários procedimentos têm sido feitos para melhorar a qualidade das previsões resultantes do uso desses modelos. É o caso da técnica MERGE (Rozante, Gonçalves e Vila, 2010), em que dados de estimativas de precipitação obtidas da missão TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) são utilizados para melhorar a precisão das previsões do modelo ETA. Blancq e Johnson (2000) examinaram o componente confiança sobre probabilidades de precipitação (PoP – Probability of Precipitation) resultantes de modelos meteorológicos de média escala, desenvolvendo um mecanismo para classificação dos modelos com base na acurácia de cada um, perante um valor objetivo.

No contexto das aplicações dos mecanismos da modelagem meteorológica, Tremback et al. (1986) apresentaram o RAMS (Regional Atmospheric Modelling System), da Colorado State University (USA), como um mecanismo integrador de três modelos numéricos atmosféricos que foi projetado e construído para prover flexibilidade e adaptabilidade em seu uso. Já em Pielke et al. (1992), o RAMS é apresentado em seus detalhes de projeto, funcionamento e aplicações, salientando que o modelo foi um esforço de integração de alguns modelos numéricos que eram

usados separadamente, com os mesmos conjuntos de dados. Em Aragão, Araújo e Lacerda (2006), o modelo BRAMS (Brazilian Regional Atmospheric Modeling System) foi experimentado no LAMEPE (Laboratório de Meteorologia de Pernambuco) para melhorar as previsões meteorológicas sobre o Estado de Pernambuco. O modelo foi então avaliado com base em cenários de chuvas fortes ocorridos no Estado em 2005 e 2006, sob duas conformações diferentes de condições meteorológicas totalmente distintas, tendo apresentado um bom ajuste no evento de 2005.

Para a região da mata sul de Pernambuco, área de estudo desta pesquisa, os sistemas atmosféricos que mais influenciam na produção dos grandes eventos de chuva são as frentes frias vindas do sul, os Complexos Convectivos de Mesoescala (CCM), bem como a ZCIT (Zona de Convergência Inter Tropical) e aos Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOL), as chamadas “ondas de leste” (Figura 4), às quais provocaram anomalias nas precipitações durante as enchentes da bacia do rio Una em 2010 (Monteiro et al., 2014).

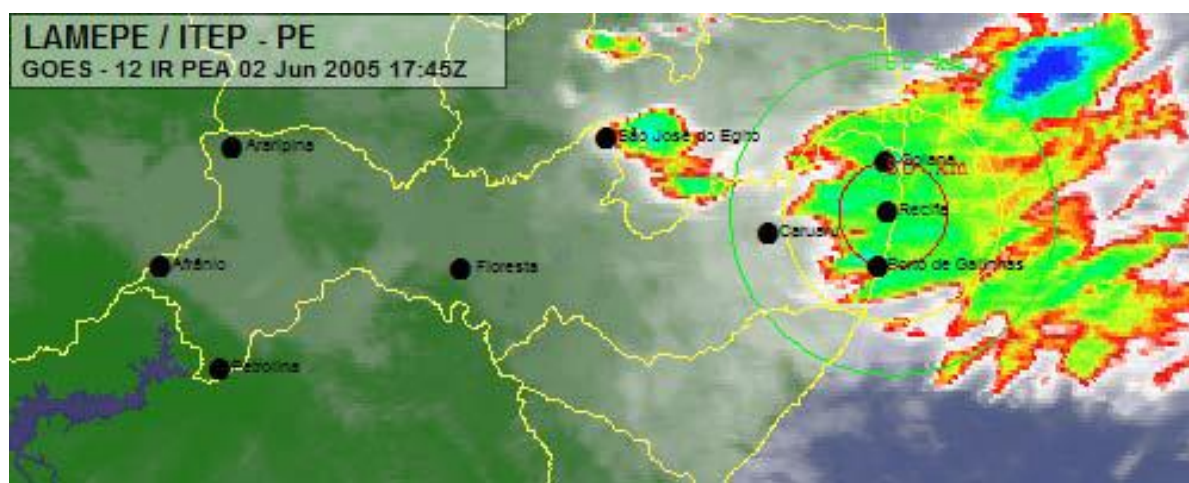


Figura 4: Imagem do satélite GOES em 02/Jun/2005 mostrando o fenômeno da onda de leste, chegando ao litoral do estado de Pernambuco, (Aragão, Araújo e Lacerda, 2006).

2.2.2 Modelagem Hidrológica

O núcleo de um sistema hidrometeorológico pode ser considerado o modelo hidrológico. Para isso, a modelagem hidrológica se vale de um grande conjunto de dados físicos, relativos ao balanço hídrico da superfície da terra. Segundo Sorooshian (1985), a modelagem hidrológica pode ser representada pela união dos

conhecimentos da hidrologia com a análise de sistemas, sendo que uma questão principal da modelagem hidrológica, assim como outros tipos de modelagem, é a determinação do nível de complexidade sobre o qual serão construídas as estruturas do modelo. Além disso, a própria escolha do modelo está associada à escala da modelagem, sendo esta afetada pelo tamanho do conjunto de parâmetros de calibração.

Toth, Brath e Montanari (2000) apresentam um estudo sobre os modelos hidrológicos empíricos, utilizando as técnicas de média móvel autorregressiva (ARMA - Auto-Regressive Moving Average), método do vizinho mais próximo (Nearest-Neighbours) e redes neurais, para analisar conjuntos de dados passados e gerar previsões.

Kuzmin, Seed e Walker (2007) mostram que a modelagem hidrológica utiliza um conjunto de dados atmosféricos: precipitação de postos pluviométricos; estimativas de precipitação por radar; evapotranspiração real e potencial; pressão e temperatura do ar na superfície; temperatura do ponto de orvalho; radiações de ondas longas e curta.

Segundo Praskievicz e Chang (2009), os modelos hidrológicos são mecanismos probabilísticos, onde as incertezas aumentam de estágio para estágio, mostrando grande sensibilidade a fatores físicos, como topografia, mas também suscetíveis aos tipos de cenários e escalas de modelagem. A modelagem hidrológica tem se desenvolvido bastante nos estudos associados às previsões de mudanças climáticas e sua aplicação em áreas urbanas, onde o parâmetro impermeabilidade é alto.

Nos modelos hidrológicos a tarefa da calibração relaciona-se diretamente com a dimensão de seu conjunto de parâmetros e o estudo de caso a caso é importante para conhecer as aplicabilidades dos modelos. Dentro desse raciocínio, Collischonn e Tucci (2005) descrevem um conjunto de procedimentos de calibragem do modelo hidrológico MGB-IPH, baseados na regionalização de dados e utilização de algoritmo genético. Esse estudo faz parte de um experimento para uso integrado de modelos climáticos e hidrológicos.

Por sua vez, Zoccatelli et al. (2010) examinam a influência da distribuição espacial das chuvas ocorridas na bacia em situações de enchentes, com base em avaliações da métrica espacial das chuvas e na análise dos tempos de viagem

(travel time) na rede de drenagem, mostrando que a utilização do parâmetro de distribuição de chuvas, na composição do cenário de chuvas, altera substancialmente a resposta do modelo,

Collischonn et al. (2007) apresentam o modelo hidrológico MGB-IPH (Modelo para Grandes Bacias), criado no âmbito do IPH (Instituto de Pesquisas Hidráulicas) da UFRGS. O MGB-IPH é um modelo distribuído, composto por módulos responsáveis pelos cálculos dos dados associados ao balanço hídrico na bacia em estudo. A questão da escala se torna importante, considerando-se os estudos que mostram a importância desse parâmetro nos sistemas atmosféricos, que são fonte dos dados de chuva utilizados nos modelos hidrológicos.

Getirana et al. (2010) apresentam os resultados de uma pesquisa com a modelagem hidrológica em escala regional, feitas no rio Negro (Figura 5), na região amazônica, onde foi usado o modelo MGB-IPH. Esse modelo é considerado relativamente simples, quanto à sua exigência de dados e parâmetros de calibração, mostrando um ajuste considerado bom para bacias de grande dimensão.

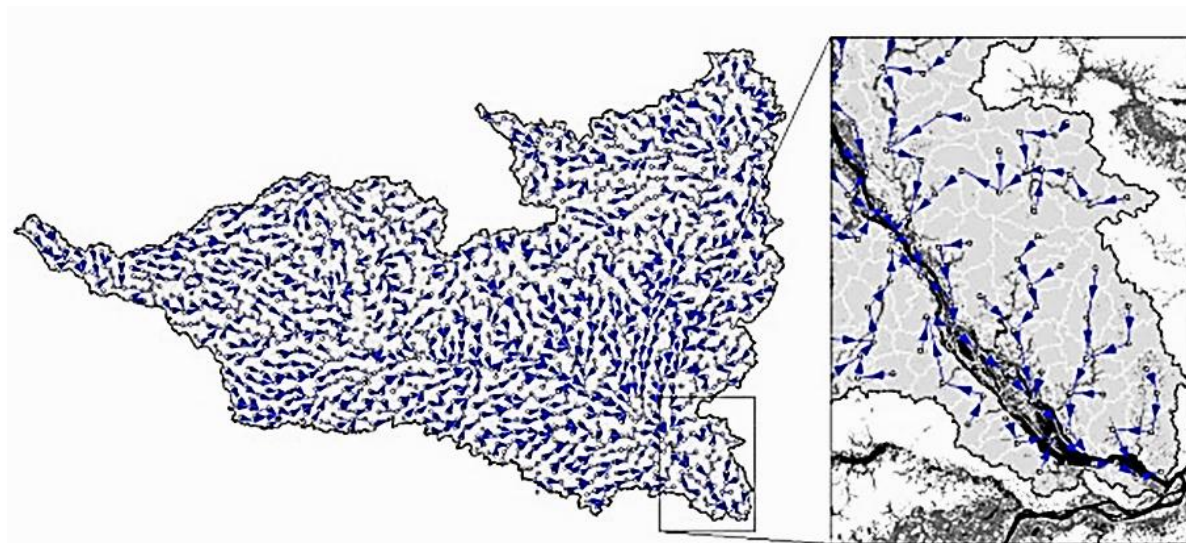


Figura 5: Representação em modelo hidrológico da bacia do rio Negro, (Getirana et al., 2010).

Vaze et al. (2011) trazem um compêndio sobre a modelagem hidrológica, suas diretrizes de estudo e projeto, enumerando tópicos da modelagem, tais como: identificação do problema e dos objetivos; entendimento do domínio da aplicação; critérios de decisão e avaliação; escalabilidade e mecanismos de desenvolvimento. Esse trabalho apresenta também considerações sobre sensibilidade, incerteza, estratégias de utilização, calibração, validação e questões relativas ao desempenho dos modelos, sob várias condições.

Zhan et al. (2013) apresentam um estudo feito sobre os conjuntos de parâmetros requeridos pelos modelos hidrológicos e concluiu que a umidade do solo e o coeficiente de evapotranspiração são os valores que mais influenciam o comportamento dos modelos.

Em Santos (2004) encontra-se uma aplicação do modelo hidrológico TOPMODEL no zoneamento hidrológico do rio Pequeno, no Paraná. Essa aplicação resultou em gráficos que mostram boa aderência entre os valores das vazões calculadas e observadas, capacitando esse modelo para uso em bacias de relevo suave e topografia homogênea. Braud et al. (2010) utilizam dois modelos hidrológicos, o CVN e MARINE, para um estudo sobre os fatores mais impactantes na modelagem hidrológica, relacionando a amplitude dos eventos de vazões à magnitude das chuvas ocorridas, às condições morfológicas da bacia e à representação espacial do solo.

Em Collischonn et al. (2011) é feito um estudo com o uso do modelo hidrológico MGH-IPH para avaliação da disponibilidade hídrica na bacia do rio Quaraí, que se situa entre o Brasil e o Uruguai. O modelo foi calibrado com a parametrização das retiradas de água para a lavoura de arroz e a presença de reservatórios, e sua aplicação mostrou um déficit hídrico na região, sendo esse mais impactado pelas retiradas diretas do rio.

Vivoni et al. (2011) investigam a aplicação do modelo tRIBS (Triangulated Irregular Network – based Real-time Integrated Basin Simulator) a procedimentos de processamento paralelo, com o objetivo de otimizar a simulação hidrológica de grandes bacias por longo tempo e dados em alta resolução, o que requer grande capacidade computacional. Em Hernández, Bá e Guerra-Cobián (2013) é mostrado um estudo da utilização da modelagem hidrológica com modelo HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System), com dados de entrada fornecidos por estimativas de radar.

No caso do estudo das enchentes, encontram-se aplicações do HEC-HMS em Simonovic (2010), Ali et al. (2011) e Halwatura e Najim (2013). Anderson et al. (2002) utilizaram o HEC-HMS com modelos atmosféricos ETA e MM5. Walega (2013) procurou simular uma enchente na Polônia, enquanto Basarudin et al. (2014) utiliza o modelo em simulações na Malásia. Yang e Yang (2014), Hejazi e Markus (2009) e Meenu, Rehana e Mujundar (2013) também utilizaram o HEC-HMS em

seus estudos de enchentes. Por sua vez, De Silva, Weerakoon e Herath (2014) e Sifontes e Moya (2012) apresentam um procedimento complexo de simulação com uso do HEC-HMS.

2.2.3 Modelagem Hidrodinâmica

O fenômeno hídrico observado em enchentes pode ser representado por modelos de simulação hidrodinâmica, os quais procuram representar o movimento das águas em canais. Esse movimento pode ser dividido em: (1) movimento permanente (stead), onde a vazão não varia, em relação ao ponto do canal e ao tempo; (2) movimento não permanente (unstead), onde a vazão pode variar, com relação ao tempo e espaço. No caso do estudo de enchentes, onde os canais têm variação contínua em suas características geomorfológicas, utilizam-se modelos matemáticos que simulam o movimento não-permanente, os quais são regidos pelas equações desenvolvidas ainda no século XIX, pelos matemáticos Laplace e Lagrange, considerados os primeiros a caracterizar o movimento das ondas em canais, (Marmood e Yevjevich, 1975).

Segundo Tucci (1998) a modelagem hidrodinâmica se utiliza das equações de continuidade e de quantidade de movimento, sendo que para suas resoluções realizam-se processos computacionais que envolvem grande quantidade de dados e procuram representar mais precisamente o sistema físico observado no escoamento em canais, de vazão constante ou variável. No caso do estudo de enchentes, esse escoamento depende essencialmente da declividade da bacia, da estrutura da rede de drenagem e da cobertura vegetal, existente no leito e margens dos rios.

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. Chien e Tan (2011) apresentam um experimento que utiliza imagens do Google Earth, em formato KML (Keyhole Markup Language), para gerar a geometria necessária à simulação com o modelo hidrodinâmico 2D AnuGA.

Gichamo et al. (2012) verificaram a aplicabilidade dos MDT's ASTER GDEM (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Global Digital Elevation Model), com um pós-processamento para correção de tendências (bias),

em um procedimento de modelagem hidrodinâmica com o modelo HES-RAS para simulação de eventos enchentes no rio Tisza, na Hungria, mostrando-se a abordagem experimentada de grande utilidade para o estudo hidrodinâmico.

Em Souza, Collischonn e Tucci (2007) encontra-se uma aplicação do modelo HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center – River Analysis System) para a simulação de enchentes em um trecho do rio São Francisco, na Bahia. O trecho do rio teve seu leito modelado com base em um MDT SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) e utilizou dados do Hidroweb para alimentar o modelo. Também em Pramanik, Panda e Sen (2010) é descrito um experimento feito com o MDT STRM para gerar secções para o modelo hidrodinâmico MIKE 11 (Figura 6).

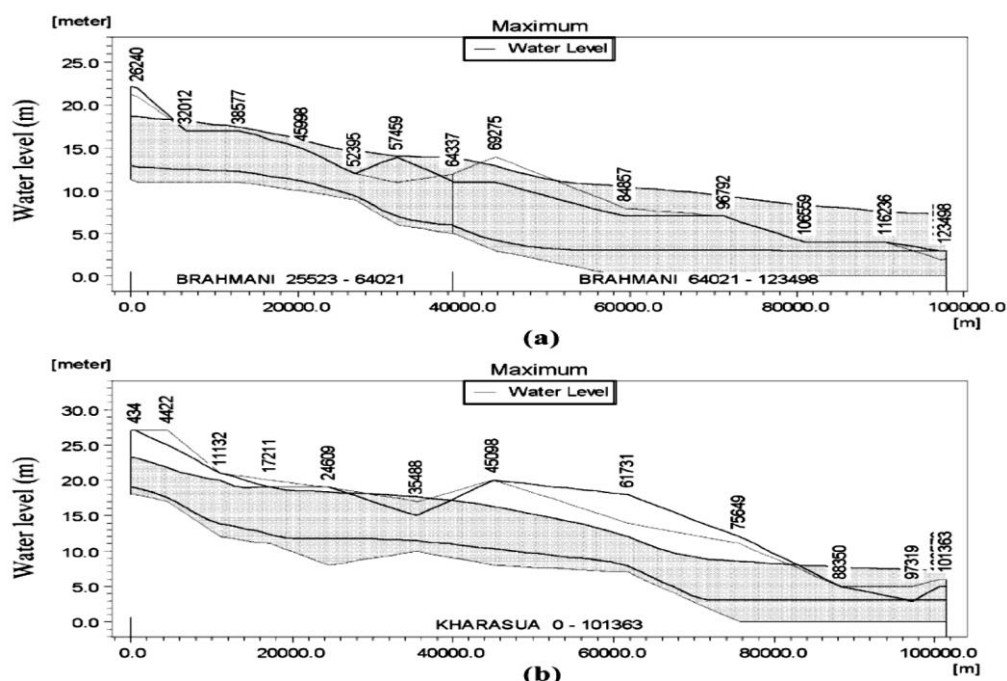


Figura 6: Perfis de escoamento simulados pelo modelo MIKE 11, (Pramanik, Panda e Sen, 2010).

Santillan et al. (2012) utilizaram o modelo hidrodinâmico HEC-HAS para gerar as planícies de alagamento para rio Marikina, nas Filipinas, com alimentação do modelo por meio de ligação direta com estações de medição de nível, com intervalo de tempo de dez minutos. Os mapas de alagamento são então distribuídos ao público, orientando as pessoas acerca da dimensão da enchente. O estudo mostrou a viabilidade e utilidade do sistema montado, no enfrentamento das enchentes.

Dantas (2012) utilizou a modelagem hidrodinâmica, com o uso do modelo HEC-RAS para estudar os padrões de chuvas que causam enchentes na bacia do

rio Una, em Pernambuco. Nesse estudo foi utilizado um modelo digital de terreno LIDAR (Light Detection and Ranging), para fornecer elementos altimétricos que propiciaram a criação das secções do modelo hidrodinâmico, com o uso das ferramentas de geoprocessamento.

Abdullah et al. (2012) também examinaram a utilização do MDT LIDAR em um procedimento de simulação hidrodinâmica, com a experimentação de vários filtros, para composição de cenários mais reais, para a criação das secções do modelo. Salientando a importância da utilização de MDT de alta resolução para a eficiência da modelagem hidrodinâmica, French (2003) examinou a aplicação desse tipo de dado, um modelo LIDAR, a um processo de modelagem de cenários de inundação, onde se verifica que as tarefas de calibração do modelo são facilitadas pelo uso do MDT.

Um dos parâmetros mais importantes da simulação hidrodinâmica é o coeficiente de rugosidade de Manning. Ele se reflete na resistência que a água tem, em escoar pela superfície do canal. Lyra et al. (2010) exploraram a tarefa da determinação do coeficiente de Manning para uso em simulações hidrodinâmicas com o auxílio de redes neurais (RN), trabalhando com séries de vazões de 21 anos. Esse estudo também analisou a diferença dos coeficientes de rugosidade, nos períodos secos e períodos úmidos com relação aos outros parâmetros e constatou que a diferença no período não influencia tanto quanto a presença de vegetação nas margens.

Naot, Nezu e Nakagawa (1994) e Darby (1999) também investigaram a influência da vegetação riparia no comportamento das vazões com objetivo do entendimento e previsão de enchentes. Em Mark et al. (2004) tem-se um interessante estudo sobre as limitações da modelagem hidrodinâmica 1D no estudo de enchentes em áreas urbanas com utilização de ferramentas de geoprocessamento. 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. Sharkey (2014) coloca que o HEC-RAS é um modelo hidrodinâmico mundialmente empregado porque utiliza métodos de roteamento de fluxo baseados em princípios de continuidade e momento, que são familiares para os engenheiros

de recursos hídricos. Além disso, o modelo também é muito usado devido a sua acurácia e por ser de acesso livre, com vasta documentação.

Em termos da utilização desses modelos em simulações de situações de enchentes, encontram-se aplicações do HEC-RAS em Hasani (2013), Butt, Umar e Qamar (2013) e Ashraf et al. (2011), com estudos sobre enchentes e planícies de inundação. Abdelbasset et al. (2015), Malik e Ahmad (2014), Salajegheh et al. (2010), Sharkey (2014) e Boboc et al. (2012) também aplicaram o HEC-RAS, bem como Bashar, Khudair e Khalid (2014), Motallebian e Hassapour (2013), Kamanbedast e Ghahremani (2014) e Baldassarre e Claps (2010).

Na literatura mundial encontram-se também utilizações conjuntas do HEC-HMS e HEC-HAS em Pistocchi e Mazzoli (2002), Goodell (2005), Wyrick et al. (2009) e Knebl et al. (2005). Mais recentemente, Abon, David e Tabios III (2012), Suriya e Mudgal (2012) e Rao et al. (2014) trabalharam esta integração na construção de sistemas de alerta de enchentes. Com esse mesmo enfoque, Gul, Harmancioglu e Gul (2010), Samarasinghe et al. (2010), Gibson, Pak e Fleming (2010) e Tripathi et al. (2014), empregaram esta combinação de modelos.

Haile (2005) realiza um estudo sobre a confiabilidade dos modelos hidrodinâmicos, com relação à sua variabilidade de entradas, na função de simulação de eventos de enchentes. Essa pesquisa utilizou o modelo HEC-RAS com seções geradas por procedimento de geoprocessamento, trabalhando sobre dados LIDAR, concluindo que a utilização de modelos digitais de alta resolução permite aos modeladores explorar combinações de valores de parâmetros que causariam grande instabilidade se executados sobre um modelo de terreno com baixa resolução.

Por sua vez, Wheeler (2002) traz uma revisão sobre as perspectivas da modelagem hidrodinâmica na simulação de enchentes, com especial interesse na representação apropriada da distribuição da precipitação real, ou com base em cenários de mudanças climáticas, além do incremento na capacidade de simulação em bacias sem estações de coleta de dados. Nesse estudo são analisadas questões referentes aos impactos dos tipos de uso da terra nas simulações, considerações a respeito da utilização de dados obtidos por satélites, bem como as possibilidades de integração de informações em um sistema de suporte à decisão.

2.3 Integração de Modelos Ambientais

As pesquisas apresentadas no tópico anterior mostram que a previsão de eventos de enchentes necessita, além de uma sofisticada infraestrutura computacional, do uso da modelagem hidrometeorológica, constituída de modelos dos três níveis de eventos, o meteorológico, o hidrológico e o hidrodinâmico, e esses precisam ser integrados, para representar as interligações do sistema real.

Ao longo das últimas décadas, vários experimentos envolvendo a integração de modelos ambientais têm sido feitos, melhorando o conhecimento acerca desse processo. Cruz (1987) propôs a integração de modelos empíricos com modelos semi-conceituais, para uso em previsão de enchentes, como metodologia para minimização de erros cometidos pelos modelos, quando utilizados isoladamente. Argent e Houghton (2001) discutem questões relacionadas à integração de modelos físicos da terra e do ar como um pré-requisito para a modelagem ambiental e cita também a necessidade desta integração ser feita por módulos adaptáveis, flexíveis e reutilizáveis, de maneira com que os elementos principais do sistema possam ser conectados entre si e a interface de usuário possa ser projetada com o auxílio dos mesmos.

Boughton e Droop (2003) tratam do tema da simulação contínua, entre os processos de transformação de chuva em vazão e distribuição desta vazão nos canais de drenagem das bacias, além disso, é colocado que nas pesquisas para o desenvolvimento de sistemas que utilizam processos de simulação, esses são sempre comparados com procedimentos estatísticos estocásticos para previsão de enchentes. Argent (2004) contém uma excelente revisão sobre o tema da integração de modelos com propósitos de gerenciamento ambiental, discorrendo sobre questões e requerimentos, infraestrutura e tecnologias utilizadas, ou em desenvolvimento para a criação de sistemas integrados de informações gerenciais ambientais. O componente de georreferenciamento é citado como elemento de ligação entre os vários módulos e funções dos sistemas, considerando os pressupostos e capacidades da espacialização dos dados. Nesse caso, todos os sistemas para gerenciamento ambiental, criados a partir do início desse século, fazem uso extensivo de geoprocessamento, como uma ferramenta de integração de dados e processos. Sendo assim, a integração de modelos surge da necessidade

de adicionar às aplicações existentes, as facilidades de processamento fornecidas pela espacialização dos dados. Além disso, algumas questões relativas à integração de dados estão associadas à forma de representação dos modelos, dimensionalidade, semântica e gerenciamento de componentes. De uma maneira geral, a arquitetura dos sistemas que integram modelos também é colocada como elemento chave no processo de interação dos modelos, (Argent, 2004).

Goodal, Robinson e Castronova (2011) examinaram a integração de modelos sob a estratégia de orientação a serviço da Web. Neste caso os autores consideram os mecanismos de comunicação de dados da internet como elemento comum entre serviços, os quais fornecem os dados obtidos após a simulação com modelos ambientais. Operacionalmente, essa integração deve ser implementada por interfaces que atuam como ferramentas de conectividade entre os diversos módulos e tem como desvantagem a dependência de conexão à rede mundial.

Ferraz, Milde e Mortatti (1999) também trataram da integração de modelos hidrológicos, através do uso de conjuntos de informações georreferenciadas. Brimicombe (2010) define a integração de modelos como o ato de conectar duas ou mais tecnologias diferentes, ou conjuntos delas, para que estas possam funcionar juntas como uma só. São apresentadas também algumas questões sobre a integração de modelos no que diz respeito às tecnologias atuais e suas capacidades reais de inter-acoplamento, bem como aspectos relativos às trocas de dados entre os modelos (Figura 7) e a própria qualidade dos dados a serem intercambiados.

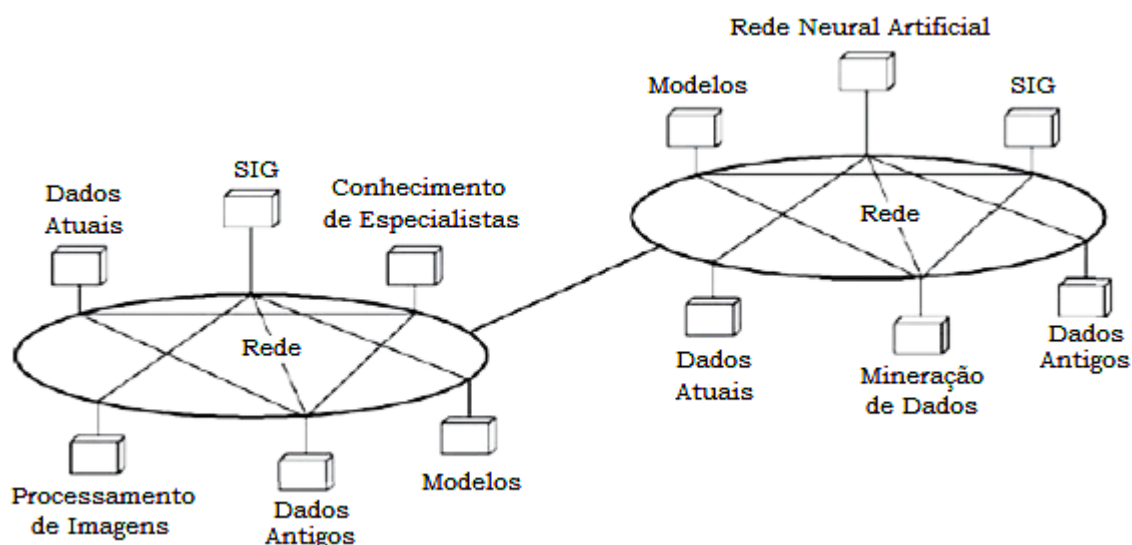


Figura 7: Redes de trabalho como núcleo de integração, adaptado de Brimicombe (2010).

Malleron et al. (2011) afirmam que existem atualmente muitos modelos que geram dados para vários domínios da engenharia hidrológica, mas colocam que esses modelos precisam ser conectados, possibilitando, por exemplo, que um modelo possa fornecer dados para outro, representando um sistema físico em maior escala ou servindo como mecanismo de apoio à decisão. Esse estudo investiga o acoplamento hidráulico entre dois modelos hidrodinâmicos, um de dimensão espacial 1D e outro 2D, mostrando as vantagens da abordagem integrativa do mecanismo de acoplamento utilizado, sobre uma conexão simples de modelos, que apenas compartilhe arquivos.

Laniak et al. (2013) apresentam um excelente tratado sobre a integração de modelos ambientais, relacionando esse tipo de abordagem com uma estrutura de desenvolvimento baseada na ciência, na transdisciplinaridade e na holística. Esse estudo é bastante completo e coloca a integração de modelos como base para a união da ciência, com aplicações, tecnologias e com o aspecto social, contribuindo de forma marcante para a melhoria nos processos decisórios, com o suporte dos atuais meios de comunicação.

Kragt, Robson e Macleod (2013) exploram a interdisciplinaridade da tarefa de integrar modelos ambientais, colocando a modelagem em si, como elemento integrador do conhecimento, vencendo os desafios da pesquisa em rede, desconectada e isolada da realidade única. Esse estudo também vê na figura do agente modelador, um componente imprescindível em toda geração de conhecimento ambiental.

Em Voinov e Shugart (2013) tem-se um estudo sobre as interfaces entre os modelos em um sistema integrado. Os autores colocam que um mecanismo, que busque a integração de modelos, deve ser planejado e construído com estratégias que facilitem o intercâmbio de dados, admita processos de modificação, atualização dos modelos e tarefas de calibração, além de prover a capacidade de tratar com conjuntos de dados de diferentes formatos e cenários hipotéticos, com independência na dinâmica dos módulos do sistema.

Em Cirilo et al. (1997) encontra-se a descrição do SGI (Sistema Gerencial de Informações Hidrológicas de Pernambuco), composto de vários módulos interligados, que faz o agrupamento de vários tipos de informações para uma

mesma área, executando então o cálculo de algumas variáveis hidrológicas, resumizando conjuntos de dados e identificando tendências.

Larson, Jacob e Ong (2005) apresentam um mecanismo para programação de acopladores entre modelos, salientando o aspecto da importância das interfaces entre os modelos, onde um modelo fornece em sua saída, dados e parâmetros para outros modelos, criando assim uma rede de interdependência de dados, que é verificada nos sistemas físicos reais.

Collischonn et al. (2005) descrevem uma aplicação de sistema computacional para previsão de vazões que utiliza previsões de chuva em três resoluções espaciais, como entrada para um modelo chuva-vazão em tempo real. Esse estudo mostrou que a metodologia usada para previsão de vazões se apresenta como viável para um horizonte temporal de dez a dezesseis horas à frente.

Em Goés (2009) é apresentado o experimento de modelagem hidrológico-hidrodinâmica utilizando os sistemas MIKE SHE / MIKE 11. Nesse estudo foram usados dados de estimativas de chuva por satélites e dados de estações telemétricas automáticas, mostrando boa adequação desse tipo de abordagem às atividades de Defesa Civil, planejamento de uso do solo e ações de macrodrenagem.

Por sua vez, Magalhães (2005) apresenta uma proposta de modelo integrado (Figura 8) para uso no gerenciamento de recursos hídricos, composto por um módulo hidrodinâmico, um módulo hidrológico, outro de gerenciamento e outro de qualidade de água. O procedimento descrito envolve a estruturação de células em módulos, os quais representam bacias e sub-bacias, em elementos chamados de células de escoamento.

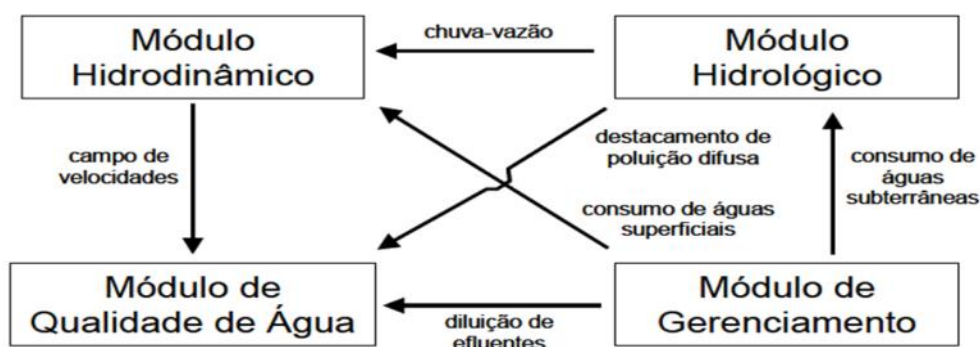


Figura 8: Relacionamento entre os módulos do sistema integrado, (Magalhães, 2005).

Em Redler, Valcke e Ritzdorf (2010) têm-se os princípios de funcionamento do projeto OASIS2 (Ocean, Atmosphere, Sea, Ice, Soil – 2), um sistema para acoplamento de modelos ambientais que trabalha com processamento paralelo e pode rodar modelos em múltiplas escalas. O OASIS2 controla a sincronização entre os modelos e suas trocas de dados, mantendo a interação entre os diversos módulos, representando uma classe de sistemas chamada de ESM (Earth System Model). Kragt et al. (2011) mostram detalhes de construção de um sistema NRM (Natural Resource Management), composto por modelos de otimização do balanço demanda x disponibilidade de águas, integrados a modelos hidro-ecológicos e modelos de validação econômica. Seguindo essa tendência, Arnold (2013) descreve alguns mecanismos que podem ser utilizados no desenvolvimento de sistemas NRM integrados, esses são: a) Observação e medição para obtenção de dados primários; b) Composição de bancos de dados e modelos; c) Análise dos dados e modelos; d) Interfaces para visualização de dados e modelos; e) Garantias de qualidade dos dados e validação dos modelos; f) Controle de fluxo e disseminação de informações.

Rodriguez (2012) aborda o tema da integração de modelos, implementando o acoplamento do modelo MGB-IPH com os dados de previsão de precipitação do modelo WRF (Weather Research and Forecasting), em simulação de vazões no rio Paraíba do Meio, entre Alagoas e Sergipe. Esse estudo mostra os ajustes e os procedimentos de avaliação dos resultados obtidos pelo experimento, que concluiu considerando que o procedimento de integração de modelos favoreceu o prognóstico de vazões elevadas, mas o modelo meteorológico necessita ainda de procedimentos de calibração. Bravo et al. (2011) apresentam os resultados do experimento de integração do modelo hidrológico MGB-IPH, com o modelo hidrodinâmico HEC-HAS, usados para simulação de vazões na bacia do rio Paraguai, em sua parte que constitui o Planalto mato-grossense. Esse estudo salientou a importância de se reduzir as incertezas, de um modelo para o outro, pois esse fator sofre uma multiplicação, devido ao erro de um modelo ser submetido ao erro do outro. No caso desse experimento, a rede de drenagem para o modelo hidrodinâmico foi obtida com base em um MDT STRM, que tem 90 metros de resolução espacial. Como a área a ser simulada é muito grande, esta deficiência de precisão no MDT não surtiu tanto efeito.

Castronova, Goodall e Ercan (2013) mostram a descrição de um protótipo construído para integração de um sistema de informações hidrológicas, o CUAHSI-HIS (Consortium of Universities for the Advancement of Hydrologic Science - Hydrologic Information System), a uma plataforma de integração de modelos ambientais, a OpenMI (Open Modeling Interface). No caso desse estudo, um modelo para simulação da evapotranspiração foi construído no OpenMI, utilizando dados provenientes do CUAHSI-HIS.

2.4 Sistemas de Alerta e Suporte à Decisão em Enchentes

De uma maneira geral, os SADs (Sistemas de Apoio à Decisão) são ferramentas computacionais que disponibilizam mecanismos para obtenção, tratamento e apresentação de informações específicas de um campo de conhecimento, propiciando simulações de cenários com o objetivo de melhorar o processo decisório e auxiliar responsáveis pela resolução de situações conflitantes. Desta forma, no desenvolvimento de SADs verifica-se a utilização de mecanismos para tratamento da incerteza, da variabilidade dos contextos e dos aspectos relativos a esquemas multicriteriais, bem como métodos de análise decisória que podem incluir árvores de decisão, diagramas de influência e modelos utilitários multiatributo, (GRH, 2004).

Os SADs são também conhecidos como SSDs (Sistema de Suporte a Decisão) e isso geralmente acontece quando sua utilização for imprescindível para a tomada de decisão, isto é, a informação se torna o suporte da decisão, sem a qual a decisão se torna praticamente impossível, como é o caso dos sistemas de controle de tráfego aéreo, bolsas de valores, controle de trens urbanos, etc. Dependendo de sua capacidade em fornecer informações importantes para a tomada de decisão e sua usabilidade, um SAD pode passar a SSD, com o passar do tempo (Srdjevic, 2004).

Geralmente os SADs para recursos hídricos utilizam mecanismos matemáticos para lidar com problemas de grande complexidade, juntamente com um conjunto de mecanismos sofisticados de interface homem-máquina. Para implementação desses SADs é necessária a criação de ambientes adequados (laboratórios e áreas de estudo) onde são geradas importantes informações para

auxiliar na resolução de conflitos. Desta forma, na utilização de SADs observa-se claramente a formalização do processo decisório com tratamento de problemas estruturados e não estruturados por uma abordagem sistêmica, envolvendo modelagem matemática e princípios da inteligência artificial (Porto e Azevedo, 1997).

Caracterizando sistemas de suporte a decisão para aplicações ambientais, Poch et al. (2004) salientam a importância do uso de várias fontes de dados, que possam ser integradas de uma maneira amigavelmente gráfica, com a utilização de modelos de simulação e otimização. São necessários também protocolos padronizados nos formatos de dados para facilitarem o intercâmbio, melhorando a eficiência de funcionamento como rede, além do uso de mecanismos avançados para aquisição de dados e da participação dos usuários finais na elaboração do projeto do sistema. Pelo fato de ter sua aplicação dirigida às questões ambientais, um SAD para enfrentamento de enchentes necessita de alguns componentes conceituais em sua base, conforme mostrado na Figura 9.

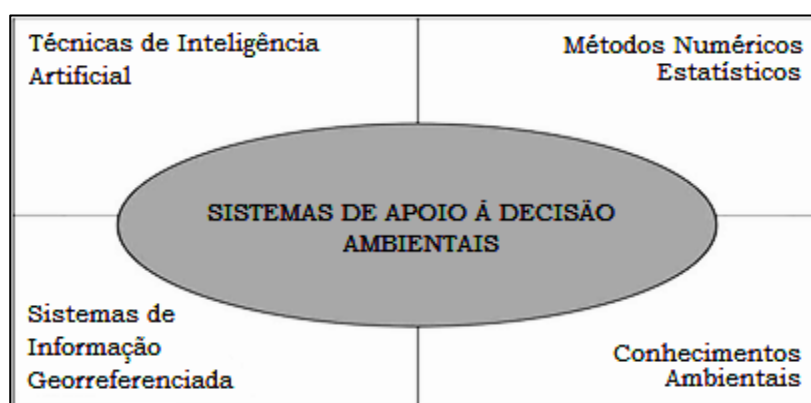


Figura 9: Partes básicas de um SAD para questões ambientais, adaptação de Poch et al. (2004).

Simonovic (2008) aponta três pontos fundamentais para o projeto de sistemas de apoio à decisão para recursos hídricos, quais sejam: (a) Mecanismos de simulação; (b) procedimentos de otimização; (c) análise multi-objetivo. É mostrado que os algoritmos evolucionários e os conjuntos difusos são duas tecnologias que estão sendo cada vez mais utilizadas, principalmente para o tratamento de incertezas, que é uma característica comum em quase todos os conjuntos de dados ambientais.

Em termos de aplicações, Azevedo et al. (1997) apresentam detalhes de um sistema de apoio ao desenvolvimento de planos de recursos hídricos para o Estado

de Pernambuco. O SGI (Sistema Gerenciador de Informações) hidrológico de Pernambuco é constituído de módulos conectados por uma interface, com o objetivo de fornecer informações hidrológicas acerca de uma sub-bacia delimitada pelo usuário. Alcoforado e Cirilo (2001) descrevem o desenvolvimento de um SAD para enfrentamento de situações de enchentes que faz uso da modelagem hidrodinâmica associada a mecanismos de lógica difusa (Zadeh, 1965) em um ambiente de geoprocessamento. Esse sistema foi aplicado com meio de proteção da região metropolitana de Recife e tem funcionalidade tanto no caso de planejamento, quanto de prevenção.

Em GIZ (2002) encontra-se a descrição do LFEWS (Local Flood Early Warning System), um conjunto de procedimentos concebido para prover os tomadores de decisão com conhecimento dos riscos e alternativas para ações em caso de enchentes, tratando de efetuar prognósticos do risco, analisar seus dados e se comunicar com a população. A operacionalização do LFEWS implica também na implementação de um processo de capacitação da população envolvida pelo risco de enchentes, na avaliação do grau de risco e de seus mecanismos de mitigação.

Ahmad e Simonovic (2006) trazem detalhes de especificação do funcionamento de um SAD para gerenciamento de eventos de enchentes que se propõe a unir o conhecimento de especialistas a modelos de simulação, utilizando para isto, procedimentos de inteligência artificial e redes neurais. Esse tema, referente à utilização de procedimentos de inteligência artificial em sistemas de apoio à decisão, é explorado extensamente em Reusch (2004), onde são detalhados elementos da aplicação de redes neurais e lógica difusa. A lógica difusa também é objeto de estudo para o desenvolvimento de SAD para gerenciamento ambiental, com a análise de vários projetos em Adriaenssens et al. (2004).

Silva (2010) criou um SAD experimental para investigar a aplicação da lógica difusa à tomada de decisão visando a escolha de um regime de vazões ecológicas. Esse sistema submete indicadores ambientais a um processo de “fuzzificação”, inserindo então os indicadores “fuzzificados” a procedimentos de análise multicriterial. Como resultado comparativo entre os indicadores e suas versões “fuzzificadas” foram feitos testes com várias composições de cenários de regimes de vazão, tendo sido observado o aumento da sensibilidade decisória à vontade dos tomadores de decisão, melhorado com o uso dos indicadores “fuzzificados”.

Métodos multicriteriais foram utilizados também em Simon, Bruggemann e Pudenz (2004) para avaliação de estratégias de gerenciamento de recursos hídricos em Berlim e Postdam, na Alemanha. Foram comparados os resultados de dois métodos multicriteriais, o PROMETHEE (Preference Ranking Method for Enrichment Evaluation) e o HDT (Hasse Diagram Technique), concluindo pela vantagem do HDT, nas aplicações sobre os cenários utilizados.

Abebe e Price (2005) relatam características de um sistema de apoio à decisão para alertas em enchentes que foi projetado para trabalhar com um conjunto de modelos hidrológico/hidráulicos e meteorológicos, conectados com redes de aquisição de dados, tendo os estudos para desenvolvimento do sistema apresentado claramente a dimensão da complexidade do problema da previsão de enchentes, em seus aspectos hidrológicos e computacionais.

Dentro da questão da hidrologia computacional envolvida no problema das previsões de enchentes, as análises dos conjuntos de dados têm nos métodos de mineração de dados (Data Mining), uma ferramenta que apresenta um grau cada vez maior de desenvolvimento, com muitas aplicações fazendo uso das suas técnicas. Nesse tema, Rahman (2008) reúne e apresenta princípios da mineração de dados para uso em processos de tomada de decisão, enfocando a aquisição e o empoderamento do conhecimento por parte dos tomadores de decisão, como pré-requisito para a melhoria do processo decisório em qualquer área, fundamentando na base do entendimento do problema enfrentado.

Capdevilla (2009) apresenta o desenvolvimento de um SAD baseado no entendimento entre a ciência e a área de políticas públicas com o objetivo de obter adaptabilidade e resiliência no gerenciamento dos recursos hídricos na bacia do rio San Pedro, no Arizona. A ideia de desenvolvimento de um SAD para o rio San Pedro se baseou na participação popular e na apropriação do conhecimento científico por parte dos tomadores de decisão.

Na busca da otimização do gerenciamento de recursos hídricos, com foco na definição de conformidades de padrões para os dados, Almeida et al. (2009) discutem o estabelecimento e uso dos padrões UML (Unified Modelling Language) e XML (Extensible Markup Language). Nesse caso, evidencia-se que a utilização conjunta de um padrão para representação dos sistemas, como o UML, associada a um padrão de representação dos dados, o XML, traria uma série de facilidades de

desenvolvimento e conexão entre os sistemas de informações para recursos hídricos. Unwin et al. (2009) descrevem um modelo de sistema para monitoramento e controle em tempo real (RT-M/C – Real Time Monitoring/Control) sendo utilizado como ferramenta de apoio à decisão nos riscos de enchentes (FRDST - Flood Risk Decision Support Tools).

Cloke e Pappenberger (2009) apresentam uma tabela com alguns desses centros, relacionando suas pesquisas aos sistemas de previsão conjunta (EPS – Ensemble Prediction System), por eles utilizados. Essa tabela mostra que o tipo de previsão numérica de clima (NWP) mais usado é o ECMWF (European Centre for Medium Range Weather Forecasts). Esse trabalho inclui uma revisão sobre o assunto dos EPS e uma enumeração de características importantes para o uso desse tipo de mecanismo na previsão de enchentes.

Maidment (2012) apresenta os detalhes de um sistema global de informações hidrometeorológicas, envolvendo uma extensa rede de servidores, bases de dados e sensores, distribuídos pelo planeta. Nesse caso, para que o tráfego dos dados seja otimizado, todos os componentes de comunicação devem fazer uso de uma linguagem comum e devem trabalhar sobre um conjunto de padrões associados diretamente com o aspecto geoambiental e com as escalas temporais globais.

Em Welsh e Podger (2008) tem-se a descrição do RSMT (River System Management Tool), um sistema de modelagem integrada de recursos hídricos, cujas principais funcionalidades são: (a) apoio à resolução de conflitos pelo domínio das águas; (b) simulação de múltiplos reservatórios e múltiplas demandas; (c) suporte à configuração de regras de gerenciamento de recursos hídricos e; (d) avaliação de recursos disponíveis. Além disso, o RSMT provê a capacidade de configuração de conjuntos de necessidades sociais, relacionadas ao uso dos recursos hídricos.

McIntosh et al. (2011) enumeraram uma série de desafios do desenvolvimento de sistemas de apoio à decisão, principalmente no que diz respeito à aceitação e emprego dos SADs por seus usuários. Esses desafios estão ligados à dificuldade no envolvimento dos tomadores de decisão, no desenvolvimento dos sistemas, mostrando que isto está associado à própria inércia das organizações na mudança de seus procedimentos operacionais em direção a estratégias mais participativas de tratamento das questões ambientais, que possam efetivamente minimizar os efeitos das enchentes.

Em termos de sistemas de alertas de enchentes disponíveis no Brasil, verifica-se um mecanismo interessante (Figura 10) no sistema de alerta da bacia do rio Doce (CPRM, 2015), implementado pelo IGAM (Instituto de Gestão das Águas de Minas Gerais) em parceria com o CPRM (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais). Esse sistema, denominado SACE (Sistema de Alerta de Eventos Críticos) realiza o monitoramento das estações da bacia do rio Doce, fornecendo funções de georreferenciamento e boletins sobre a situação dos níveis de água.

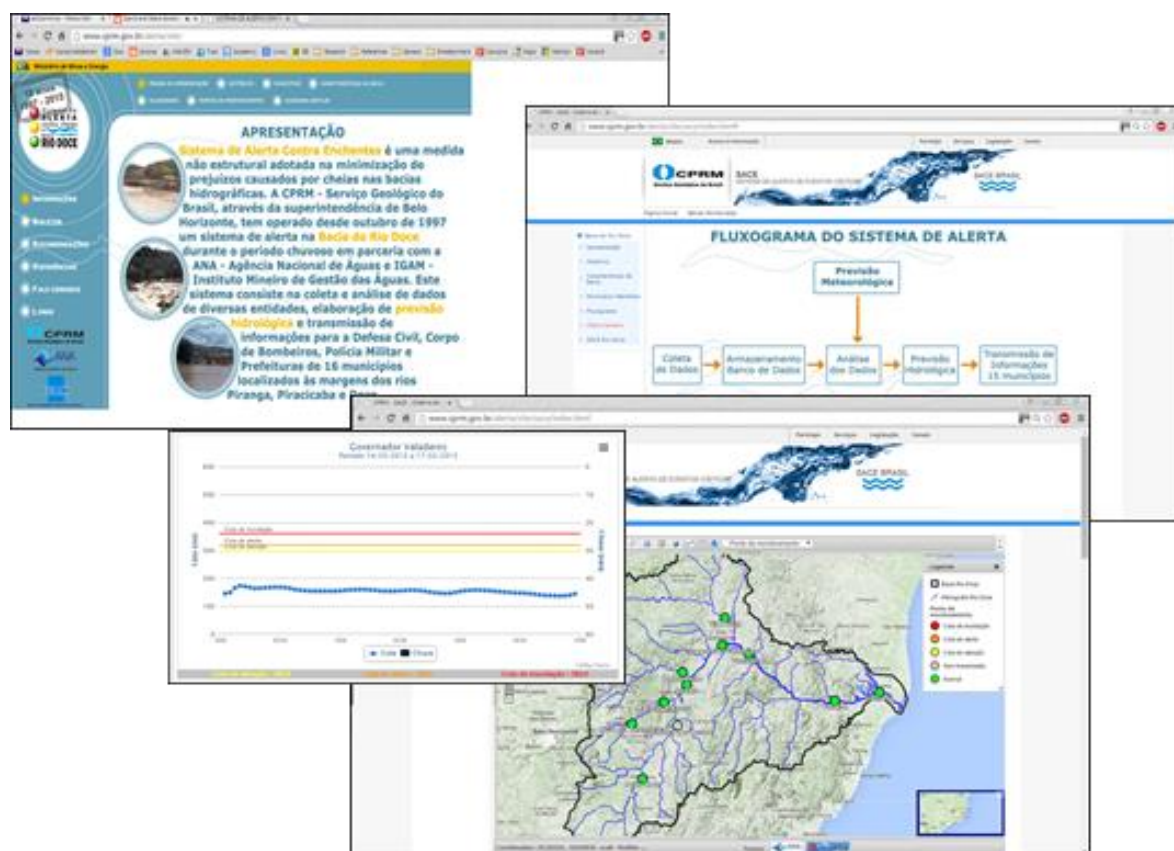


Figura 10: Sistema de alerta da bacia do rio Doce, (CPRM, 2015).

Outra referência é o Sistema de Alerta de Cheias da bacia do rio Itajaí (ITAJAÍ, 2015), que se apresenta como sistema de monitoramento de enchentes (Figura 11), disponibilizando informações “estáticas” sobre o histórico de enchentes da bacia. Esse sistema se caracteriza pelo monitoramento do nível dos rios e clima, previsão hidrológica e previsões meteorológicas, as quais são elaboradas em três fases: (1) coleta de dados meteorológicos e imagens de satélites; (2) Análise dos modelos matemáticos de previsão e; (3) boletins de previsão do tempo, (Momo e Refosco, 2011).

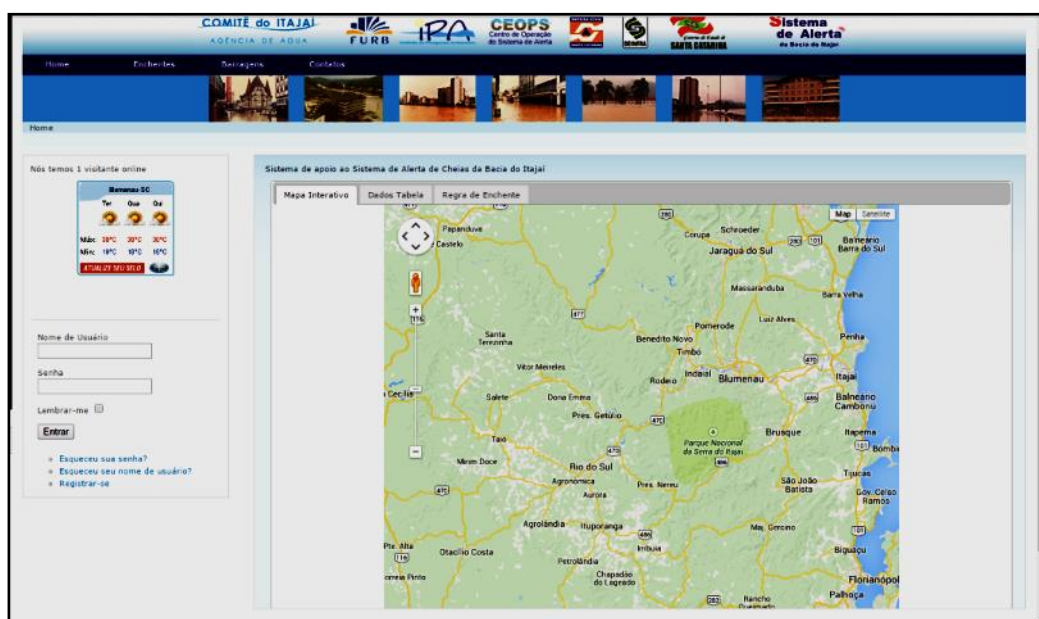


Figura 11: Sistema de alerta da bacia do rio Itajaí, (ITAJAÍ, 2015).

Já o sistema de alerta de cheias do Rio de Janeiro, criado pelo INEA (Instituto Estadual do Ambiente), é um mecanismo que emite alertas de enchentes e boletins de situação dos rios para usuários cadastrados em seu website, (INEA, 2015). Esse sistema, cuja página inicial é mostrada na Figura 12, é parte de um planejamento estratégico de enfrentamento das enchentes no Estado do Rio de Janeiro.



Figura 12: Sistema de alerta de emergências ambientais do estado do Rio de Janeiro, (INEA, 2015).

Em São Paulo destaca-se o SAISP (Sistema de Alerta de Inundações de São Paulo), criado pela FCTH (Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica). Esse

sistema (FCTH, 2015), que tem sua página inicial mostrada na Figura 13, disponibiliza vários produtos de informações ambientais relacionadas às inundações com base na rede de estações telemétricas, como também em dados do radar.

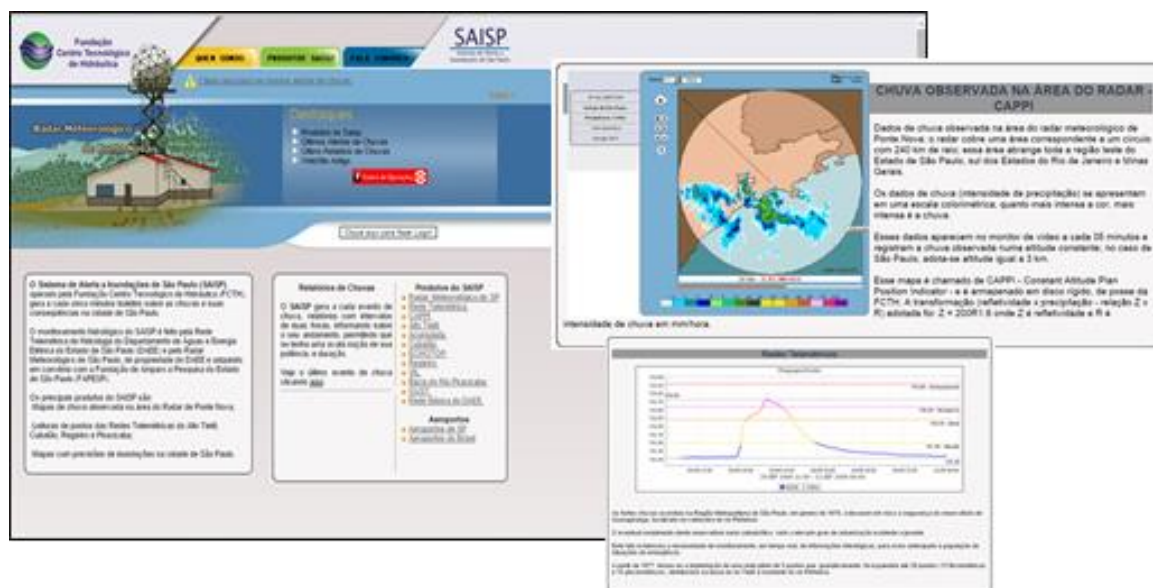


Figura 13: Sistema de alerta de inundações de São Paulo, (FCTH, 2015).

No que se refere aos grandes sistemas para alerta de eventos de enchentes no contexto mundial, os maiores são o EFAS (European Flood Alert System) e o AHPS (Advanced Hydrologic Prediction System).

Segundo Thielen et al. (2009), o EFAS foi projetado em 2003 para ser um sistema de alerta de enchentes para toda a Europa, provendo as autoridades locais com previsões de enchentes de 3 a 10 dias de antecedência. As previsões geradas pelo EFAS são utilizadas também pelo ECMWF, conjuntamente com outros 50 conjuntos de dados de previsões, nos produtos de previsão conjunta, propiciados pelo ECMWF.

Por sua vez, o AHPS é um sistema que faz parte do NOAA (National Ocean e Atmospheric Administration) e integra radares Doppler, estações de medição de chuvas e vazões, satélites e outras fontes de dados em previsões climáticas de longo termo, suportadas por Sistemas de Informações Geográficas (SIGs). O AHPS realiza modelagem das características hidrológicas de cada local em todo o território dos Estados Unidos, fornecendo informações precisas e aplicáveis para os tomadores de decisão, na construção de medidas mitigadoras para eventos de enchentes, (Gruntfest e Ripps, 2000).

3 Área de Estudo e Conjuntos de Dados

A área de estudo da pesquisa compreende bacias da Mata Sul do Estado de Pernambuco. Estas bacias foram severamente castigadas por enchentes nas últimas décadas, e por conta disso, foram desencadeadas várias ações governamentais de mitigação das consequências de tais eventos.

Apesar de considerar toda a hidrografia da zona da mata sul de Pernambuco, essa pesquisa se focou especificadamente na bacia do rio Una (Figura 14), considerada bacia piloto para o desenvolvimento do sistema. Uma das razões principais para escolha desta área foi a disponibilidade de um modelo digital de terreno LIDAR para grande parte do canal principal do rio e cidades atingidas, o qual foi adquirido pelo governo do Estado de Pernambuco por intermédio de uma empresa especializada nesse tipo de levantamento.



Figura 14: Localização do estado de Pernambuco no Brasil e da bacia do rio Una (Num. 5) no conjunto das bacias do estado, (FIDEM, 2006).

3.1 Área de Estudo: A Bacia do Rio Una em Pernambuco

O Estado de Pernambuco apresenta divisão geomorfológica, no sentido norte-sul, representada pelo Planalto da Borborema. Isso faz com que os rios da parte oriental do estado tenham seu escoamento no sentido oeste-leste, desaguando no Oceano Atlântico. Esses rios são denominados no Plano Estadual de Recursos Hídricos de Pernambuco (PERH-PE) como “rios litorâneos”: Goiana, Ipojuca, Capibaribe, Sirinhaém e Una, além dos designados como “grupos de bacias hidrográficas de pequeno porte”, dos quais, para efeito do presente trabalho,

destacam-se os dos pequenos rios litorâneos. A bacia hidrográfica do rio Una constitui, para efeitos do PERH-PE, a Unidade de Planejamento 5 (UP 5) e está situada entre $8^{\circ} 17' 14''$ e $8^{\circ} 55' 28''$ de latitude sul e $35^{\circ} 07' 48''$ e $36^{\circ} 42' 10''$ de longitude oeste. Com uma configuração geométrica que se assemelha a um grande losango, iniciado na porção agreste do estado e terminando na porção litorânea ao sul de Pernambuco, a bacia do rio Una está dentro da microrregião da Mata Meridional do Estado, (FIDEM, 2006).

3.1.1 Hidrografia

A hidrografia da bacia do rio Una (Figura 15) mostra sua nascente localizada no município de Capoeiras, na serra da Boa Vista, a uma altitude de 900 m. Tendo uma extensão total da nascente à foz de 255 km, seu escoamento é intermitente na porção do agreste, até próximo à cidade de Altinho e depois se torna perene em função do aumento dos totais pluviométricos. Seu principal afluente, o rio Pirangi, nasce no município de Quipapá, a 600 metros de altitude, correndo 72 km até o encontro do rio Una, três quilômetros a montante da cidade de Palmares.

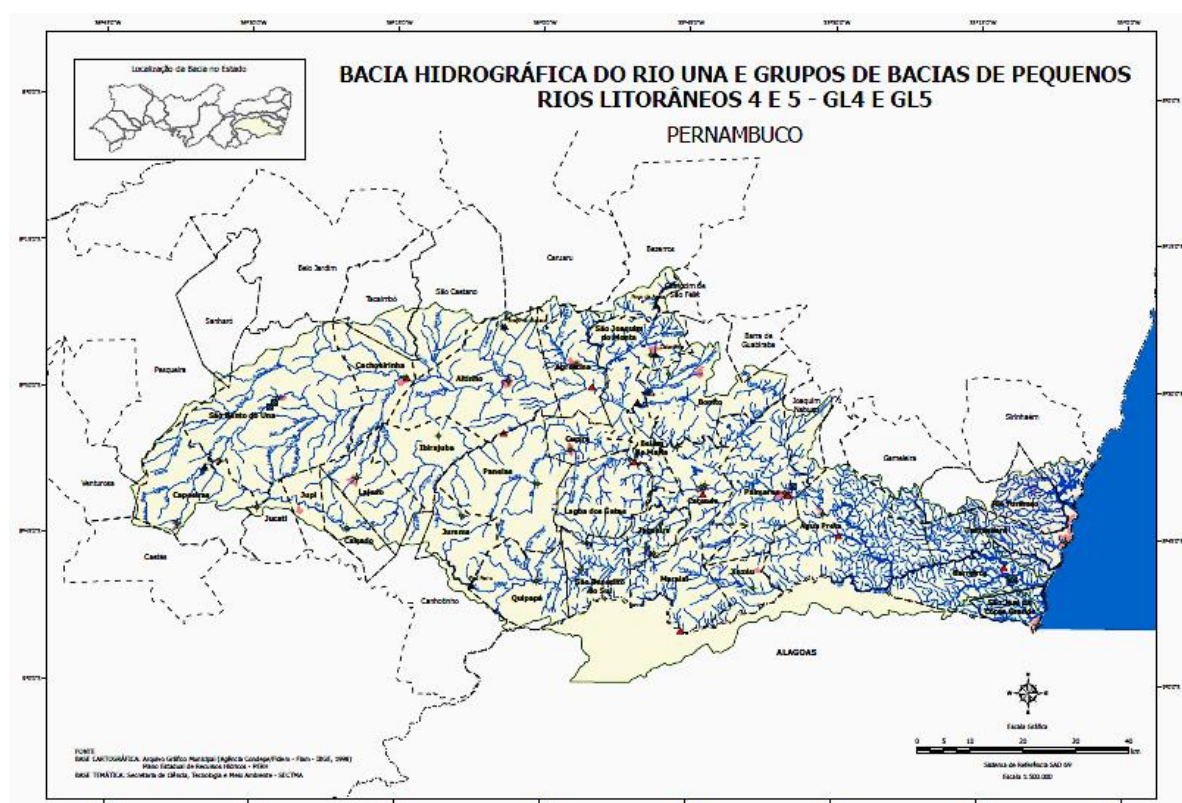


Figura 15: Mapa da bacia do rio Una, com rede hidrográfica, (SRHE, 2015).

3.1.2 Climatologia

Uma das características marcantes da bacia do rio Una é a de estar em regiões com diferentes condições climáticas, tanto no que diz respeito a dados de precipitação, como de regimes de chuva. No que tange a distribuição espacial e temporal da precipitação. Na porção oeste, no Agreste do Estado, a precipitação anual média está entre 600 e 800 mm, com chuvas mais esparsas do que as que ocorrem no sertão, e tem o mês de março como o mais chuvoso. Na parte Leste, Zona da Mata e litoral, o clima apresenta-se quente e úmido, com totais anuais de precipitação elevados (superiores a 1.000 mm). Os maiores índices pluviométricos estão distribuídos a partir de março, prolongando-se até julho/agosto. O mês mais chuvoso é junho (SECTMA, 1998).

3.1.3 Geologia

A variação climática observada na bacia interage diretamente com a geologia, predominantemente constituída de rochas cristalinas e cristalofilianas, sendo que 97.4% de sua área é constituída pelo Complexo Migmatítico-Granitóide com participação aproximadamente igual dos migmatitos e granitos. As áreas sedimentares são restritas a depósitos areno-argilosos de aluviões recentes e reduzidos resquícios da Formação Barreira, (SECTMA, 1998).

3.1.4 Geomorfologia e Relevo

A geomorfologia é formada por planícies com cotas inferiores a 100 m na faixa costeira, morros e colinas que se estendem até as proximidades do Planalto da Borborema, com altitudes que podem ir até 300 m, a partir daí têm-se superfícies aplainadas variando entre 400 a 700 metros de altitude e cotas mais elevadas, até 1000 metros, nos municípios de Capoeiras, Pesqueira e Jupi, FIDEM (2006). Com relação às características físicas, segundo Monteiro et al. (2014), a bacia do rio Una apresenta os seguintes valores: área de drenagem de aproximadamente 6.705 km²;

perímetro de 622 km; 174 km como comprimento do eixo da bacia; coeficiente de compacidade de 2,128; fator de forma de 0,22 e índice de circularidade de 0,2176.

A Figura 16, construída a partir da base de dados espaciais SRTM (Valeriano e Rossetti, 2010) da NASA (National Aeronautics and Space Administration), da região da bacia do Una, mostra a parte alta da bacia (mais clara), bem como sua hidrografia e a parte do rio (linha branca) para qual foi construído o modelo hidrodinâmico desse trabalho de pesquisa.

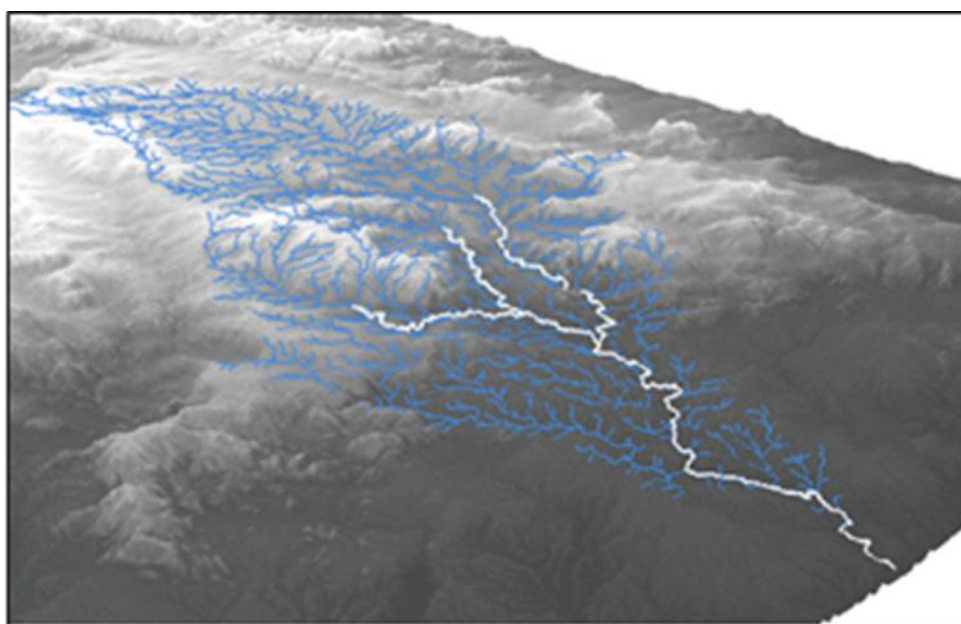


Figura 16: Relevo e hidrografia da região da bacia do rio Una.

3.1.5 Solo, Vegetação e Uso das Águas

As resultantes de solo-vegetação na bacia do rio Una seguem a diversidade geomorfológica, predominando solos mais desenvolvidos na zona da mata-litoral, onde a vegetação natural de mata atlântica aparece em restritas porções, explicitando a devastação ocorrida, expondo os solos aos períodos de maior erodibilidade das chuvas e eliminando o papel de contribuinte aos processos de infiltração da água no solo. Já no agreste os solos possuem menor desenvolvimento e maiores restrições de uso, possuindo como vegetação dominante a Caatinga, também significativamente alterada pela atividade de pecuária extensiva, que substitui a caatinga por pastos. Estas condições de vegetação acarretam grandes impactos ambientais sobre os recursos hídricos da bacia, (FIDEM, 2006). Quanto

aos usos de água na região da bacia do Una, destacam-se o abastecimento público e a irrigação. Nesse último uso, evidencia-se a irrigação de cana de açúcar e fruteiras, feitas a partir de pequenos afluentes e riachos, (ITEP, 2011).

3.1.6 Socioeconomia

A bacia, dentro do estado de Pernambuco, abrange uma superfície de 6.295,77 Km², ocupando espaços, total ou parcialmente, de 42 municípios (Tabela 1), dentre os quais 19 possuem sua sede em áreas da bacia, que também conta com grande número de pequenos povoados, inseridos em sua área (FIDEM, 2006).

Tabela 1: Municípios da bacia do Una.

MUNICÍPIOS	Sede Localizada na UP	Área do Município		
		Total km ²	Pertencente à UP	
			km ²	%
1 AGRESTINA	*	198,0	198,0	100,0
2 ÁGUA PRETA	*	532,0	477,2	89,7
3 ALTINHO	*	452,6	447,2	98,8
4 BARRA DE GUABIRABA		118,1	5,0	4,2
5 BARREIROS	*	229,8	195,1	84,9
6 BELÉM DE MARIA	*	63,8	63,8	100,0
7 BEZERROS		545,7	63,8	11,7
8 BONITO	*	392,9	284,1	72,3
9 CACHOEIRINHA	*	183,2	181,2	98,9
10 CAETES		324,2	25,0	7,7
11 CALÇADO	*	56,0	39,7	70,9
12 CAMOCIM DE SÃO FÉLIX		50,9	13,6	26,7
13 CANHOTINHO		423,0	36,4	8,6
14 CAPOEIRAS	*	344,3	253,1	73,5
15 CARUARU		932,0	11,2	1,2
16 CATENDE	*	160,9	160,9	100,0
17 CUPIRA	*	104,2	104,2	100,0
18 GAMELEIRA		260,8	33,1	12,7
19 IBIRAJUBA	*	218,0	218,0	100,0
20 JAQUEIRA	*	90,9	90,9	100,0
21 JOAQUIM NABUCO	*	115,6	67,9	58,7
22 JUCATI	*	109,4	22,0	20,1
23 JUPI	*	151,2	86,5	57,2
24 JUREMA	*	147,0	139,4	94,8
25 LAGOA DOS GATOS	*	189,2	189,2	100,0
26 LAJEDO	*	208,9	206,2	98,7
27 MARAIAL	*	217,3	217,3	100,0
28 PALMARES	*	376,2	376,2	100,0
29 PANELAS	*	369,6	369,6	100,0
30 PESQUEIRA		1.036,0	17,6	1,7
31 QUIPAPÁ	*	225,6	225,6	100,0
32 RIO FORMOSO		235,0	15,7	6,7
33 SANHARÓ		247,5	0,0	0,0
34 SÃO BENEDITO DO SUL	*	209,3	209,3	100,0
35 SÃO BENITO DO UNA	*	715,9	638,6	89,2
36 SÃO CAETANO		373,9	105,4	28,2
37 SÃO JOAQUIM DO MONTE	*	230,6	218,8	94,9
38 SÃO JOSÉ DA COROA GRANDE		75,0	18,7	24,9
39 TACAIMBO		210,9	55,3	26,2
40 TAMANDARÉ		205,0	92,3	45,0
41 VENTUROSA		326,1	3,6	1,1
42 XEXÉU	*	116,5	116,5	100,0
TOTAL	27		6.292,9	

Fonte: (SECTMA, 1998).

3.1.7 Impactos Ambientais

Os principais impactos ambientais que afetam os recursos hídricos e que de maneira mais direta, podem contribuir para o agravamento do fenômeno das

enchentes na bacia são: retirada de areia e pedras do leito de vários rios da bacia; construção de edificações próximas aos cursos d'água e nas áreas de proteção dos barramentos (nas margens e a montante); plantio de cana-de-açúcar e outras culturas às margens dos rios; desmatamento das áreas de nascentes e das matas ciliares; presença de lixões nas proximidades de cursos d'água; aterramento em áreas da foz dos rios, (FIDEM, 2006). Além do fato de que a influência da ZICT (Zona de Convergência Inter-Tropical) na bacia do rio Una faz com que o comportamento das enchentes na bacia seja variável e cíclico, o processo de uso e ocupação do solo nas áreas rurais e o crescimento desordenado das cidades transformam o fenômeno natural em um desastre de severas proporções, (SECTMA, 1998).

3.2 Conjuntos de Dados Utilizados

Na análise estrutural dos dados necessários à construção dos procedimentos computacionais para alerta de enchentes, foram identificados três domínios de conhecimento que compõem o hidro-sistema que se deseja integrar com o uso dos modelos. Esse conjunto de domínios, representado na Figura 17, contempla os dados usados pelo sistema, os quais são detalhados a seguir:



Figura 17: Os três domínios de utilização de dados pelo sistema.

3.2.1 Dados Meteorológicos

Foram utilizados dados meteorológicos de chuvas correspondentes a três tipos de informações quer sejam: (1) dados observados, provenientes de estações pluviométricas automáticas do tipo PCD (Plataforma de Coleta de dados); (2) dados estimados a partir de sensores embarcados em satélites e; (3) dados de previsões de chuvas gerados por modelos meteorológicos de mesoescala.

Esses dados têm formatos (resoluções espaciais e temporais) distintos e graus de confiabilidade também diferentes, sendo que os dados observados são os mais confiáveis, porém apresentam por vezes falhas em sua geração e tem distribuição irregular de estações.

Já os dados estimados têm relativo grau de confiabilidade, mas requerem alguma outra informação para seu ajuste. Os dados de previsões, por sua vez, representam probabilidades e necessitam maiores procedimentos de correção, visando sua utilização. A seguir são detalhados esses tipos de dados e suas fontes.

3.2.1.1 Dados Observados em Estações Telemétricas

Os dados observados usados no sistema são obtidos em servidores da ANA (Agência Nacional de Águas) e fornecem valores de chuva, nível e vazão, com resolução temporal de 15 minutos. Nesse estudo são utilizadas as oito estações telemétricas automáticas (Tabela 2), operantes na bacia do rio Una.

Tabela 2: Estações automáticas PCDs usadas no estudo.

NomeEstacao	CodEstacao	Bacia	SubBacia	Operadora	Responsavel	Municipio-UF	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Data Início
CACHOEIRINHA	39530000	3	39	CPRM	ANA	CACHOEIRINHA-PE	-8.4839	-36.2331	531	01/11/1999
SÃO BENEDITO DO SUL	39540750	3	39	CPRM	ANA	SÃO BENEDITO DO SUL-PE	-8.8161	-35.9339	369	30/01/2012
BELÉM DE MARIA	39541000	3	39	CPRM	ANA	BELÉM DE MARIA-PE	-8.6247	-35.8414	225	01/12/2002
CATENDE	39550000	3	39	CPRM	ANA	CATENDE-PE	-8.6786	-35.7233	154	01/08/2002
SÍTIO CACHOEIRA	39571000	3	39	CPRM	ANA	MARAIAL-PE	-8.8967	-35.7678	150	01/01/2009
PALMARES	39560000	3	39	CPRM	ANA	PALMARES-PE	-8.6794	-35.5769	112	01/11/1976
JACUÍPE	39580000	3	39	CPRM	ANA	JACUÍPE-PE	-8.8411	-35.4469	61	01/01/1989
BARREIROS	39590000	3	39	CPRM	ANA	BARREIROS-PE	-8.7992	-35.205	13	01/12/2002

3.2.1.2 Dados Estimados com Sensores de Satélites

Para os dados de estimativas de satélites foi feito um estudo durante o estágio de doutorado (sanduíche) na Universidade do Arizona, nos Estados Unidos, no sentido de se obter conhecimento sobre os procedimentos e viabilidade do uso de dados provenientes de algoritmos geradores de estimativas de chuva a partir de sensores embarcados em satélites. Inicialmente foram estudados três mecanismos de estimativas de chuva por satélites: o Hydroestimator; o CMORPH (Climate Prediction Center Morphing Technique) e o TRMM, sendo que os que apresentam melhores resultados foram o CMORPH e o TRMM. Para esta avaliação foram utilizados dados das enchentes de 2010 e 2011 na mata sul de Pernambuco, cujas imagens, colorida e infravermelho estendida, do satélite GOES12 (Geostationary Operational Environmental Satellite - 12) são apresentadas na Figura 18 e 19, para os dias 17 de junho de 2010 e 3 de maio de 2011.

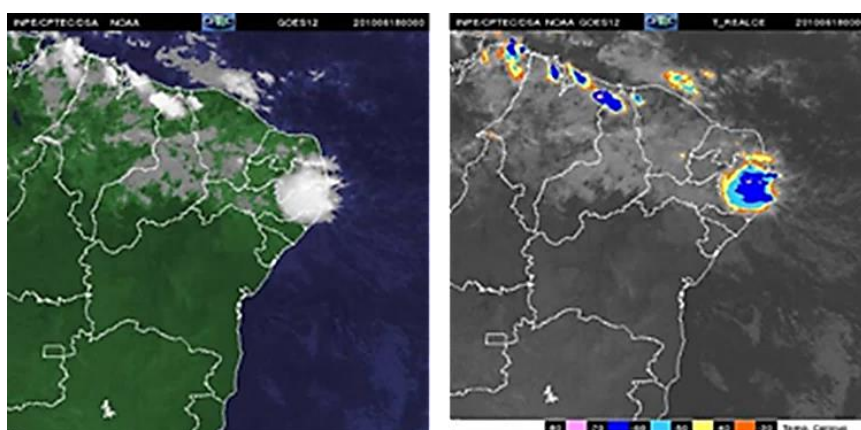


Figura 18: Imagens do satélite GOES12, durante a enchente de 2010.

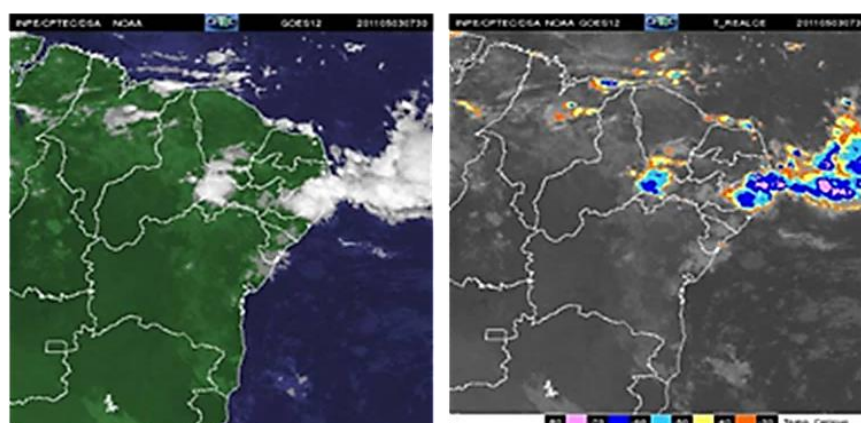


Figura 19: Imagens do satélite GOES12, durante a enchente de 2011.

O algoritmo Hydroestimator é um programa criado pelo NOAA STAR (Satellite Applications and Research) que interpreta as imagens infravermelho dos satélites GOES, entre as latitudes 69,9 e -69,9, gerando uma grade de dados de $0,045^\circ \times 0,0045^\circ$, representada por 8000 (longitude) x 3111 (latitude) pontos. Os dados são gerados com intervalo de 1 hora e são disponibilizados em arquivos ASCII (American Standard Code for Information Interchange) no endereço:

<ftp://ftp.star.nesdis.noaa.gov/pub/smcd/emb/f/hydroest/world/world/>

O CMORPH é um algoritmo criado pelo NOAA CPC (Climate Prediction Center) no sentido de ajustar os dados de emissões infravermelhas com o uso de micro-ondas passivas. Esta técnica melhora consideravelmente os resultados obtidos com o uso das imagens infravermelho. A resolução espacial da grade de dados CMORPH é de 0.07277° de Latitude/Longitude, com resolução temporal de 30 minutos, ou resolução espacial de 0.25° de Lat/Long com resolução temporal de 3 horas e diária. O formato dos arquivos é binário. A grade de dados CMORPH usada nesta pesquisa é de 0.07277° de Latitude/Longitude - 30 minutos e o endereço de obtenção dos dados é:

ftp://ftp.cpc.ncep.noaa.gov/precip/CMORPH_V0.x/RAW/8km-30min/

O TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) é um projeto experimental conjunto entre a NASA e a JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency) para geração de dados meteorológicos a partir dos satélites utilizando cinco sensores, quais sejam: radar de precipitação; imagens de micro-ondas; varredura infravermelho e visível; energia radiante da terra e das nuvens; imagens de descargas elétricas atmosféricas. A varredura dos satélites TRMM é feita entre 35° e -35° de Latitude, a resolução espacial de sua grade de dados é $0,25^\circ$ de Lat/Long. Sua resolução temporal é de três horas e o endereço de busca dos dados é:

<ftp://trmmopen.gsfc.nasa.gov/pub/merged/>

A precisão observada nos dados de estimativas de satélites está relacionada a vários fatores, os quais mostram maior correspondência com os dados observados apenas em certas épocas do ano. Além disso, recomenda-se que sua utilização seja feita em conjunto com outra fonte de dados de maior confiabilidade, tal como dados de pluviômetros ou de radares meteorológicos.

3.2.1.3 Dados de Previsões de Modelos Meteorológicos

Nesta pesquisa são utilizados os dados de previsão de chuvas, gerados pelos modelos ETA, BRAMS e WMF. Esses dados são gerados como regionalizações de resultados de modelos de circulação global nos supercomputadores do INPE/CPTEC e da APAC (Agência Pernambucana de Águas), sendo organizados em arranjos tridimensionais de grades de pontos. As grades do ETA e BRAMS trazem dados da América do Sul e os dados WMF são reprocessados e trazem apenas dados para o estado de Pernambuco. O acesso a esses dados é feito por meio de sites FTP (File Transfer Protocol), com acesso livre. Todos os horários de rodadas dos modelos e dos dados são GMT (Greenwich Meridian Time). No caso do ETA, o CPTEC executa duas "rodadas" diárias do modelo. Os dados gerados são disponibilizados em pastas com nomes no formato <AAAAMMDDHH>, onde HH é a hora da rodada (00 ou 12). Estas pastas contêm 72 conjuntos de registros com os dados de previsão de chuvas para os próximos três dias, com resolução temporal de 3 horas. Esses dados estão no formato compactado GRIB1 (GRIdded Binary 1 or General Regularly-distributed Information in Binary form 1) em uma grade de resolução horizontal e vertical de 15 km. O endereço de obtenção dos dados é:

<ftp://ftp1.cptec.inpe.br/modelos/io/tempo/regional/Eta15km/grib/>

Para o BRAMS, os arquivos têm os nomes no mesmo formato do ETA, com rodadas também às 0h e 12h, mas os arquivos contêm quatro dias de dados, com resolução temporal de 6 horas. O formato dos dados é GRIB2 (GRIdded Binary 2 or General Regularly-distributed Information in Binary form 2), com grade de dados de resolução horizontal/vertical de 5 km. O endereço em que os dados podem ser obtidos é:

<ftp1.cptec.inpe.br/modelos/io/tempo/regional/BRAMS05km/grib/>

Já o WMF tem resolução temporal de 1 hora e resolução espacial de 12 km. São disponibilizados em arquivos com sete dias de dados em formato ASCII, com dados de uma rodada do modelo por dia, sempre às 22h. Seu endereço de obtenção dos dados é:

http://www.apac.pe.gov.br/meteorologia/imagens_modelo/ASCII.txt

3.2.2 Dados Hidrológicos

Os dados hidrológicos (vazão) utilizados na modelagem são gerados a partir do procedimento de transformação chuva-vazão realizado pelo modelo hidrológico utilizado no presente estudo. Sendo assim, os valores de vazões, para a bacia em estudo, são distribuídos em sub-bacias, trechos e afluências, de forma dinâmica e temporária. Além disso, o sistema também busca dados de vazões associados às estações telemétricas, apresentadas na Tabela 2.

3.2.3 Dados Geográficos

Os dados geomorfológicos usados nesta pesquisa são representados por um modelo digital do terreno (MDT) do tipo LIDAR, com resolução de 50 cm x 50 cm para a maior parte da bacia. O modelo digital LIDAR foi obtido pela Secretaria e Recursos Hídricos de Pernambuco e, inicialmente cobriu a calha do rio Una, a partir da estação de Capivara até à foz. Incluiu também os rios Piranji e Panelas, tendo a extensão de aproximadamente 750 metros para cada lado a partir das margens dos rios. O modelo digital de terreno do tipo LIDAR é um produto obtido por meio de levantamento topográfico realizado com uma varredura de pulsos de laser e tem seus instrumentos embarcados em aeronaves. Seu mecanismo de funcionamento utiliza uma alta frequência de geração de pulsos, que são georreferenciados por GPS (Global Position System). Os componentes principais do LIDAR consistem de um equipamento laser, unidades de GPS e um sistema de navegação inercial, formado por acelerômetros e giroscópios, (Giongo et al, 2010).

Para representação georreferenciada dos objetos dos modelos no sistema utilizam-se componentes KML. Esses objetos são: (1) do modelo hidrológico, o contorno e hidrografia da bacia e; (2) do modelo hidrodinâmico, o conjunto de seções. Segundo Ying-Jun, Chong-Chong e Jie (2009), KML é uma linguagem de representação e armazenamento de informações georreferenciadas, desenvolvida pela Google para uso no Google Earth, mas que veio a se tornar um padrão mundial, unificando outros padrões. Esta linguagem propicia uma forma singular e eficiente de se representar figuras geométricas associadas a mapas e programas de geoprocessamento em ambiente Web.

4 Metodologia e Estrutura do Sistema de Modelagem Integrada

A metodologia descrita a seguir, apresenta os procedimentos realizados, com vias a interligação entre as informações relativas aos domínios físicos: meteorológico, hidrológico e hidrodinâmico, através da utilização de modelos matemáticos com o objetivo da criação de uma ferramenta para auxílio ao gerenciamento de enchentes.

4.1 Análise do Problema

Como primeira abordagem, procedeu-se à identificação de aspectos preponderantes do gerenciamento de eventos de enchentes, que possam ser otimizados com o uso de um sistema de informação orientado ao monitoramento. Uma premissa no desenvolvimento da pesquisa foi estabelecer um direcionamento prático, buscando-se a efetiva utilização tanto dos resultados como das ferramentas computacionais desenvolvidas.

Para efetivação da coleta de informações a respeito dos procedimentos executados no enfrentamento de situações de enchentes, foram realizadas reuniões com técnicos da SRHE-PE (Secretaria de Recursos Hídricos e Energéticos) e da APAC, onde foi identificada a necessidade de um sistema de informações que pudesse antever, com algumas horas de antecedência, os efeitos de chuvas intensas na região do estado mais castigada por eventos de enchentes.

Durante estas reuniões, foram sendo firmadas parcerias informais entre as várias instituições associadas (Figura 20) ao tema das águas e do clima, quer sejam: SRHE-PE, APAC, Instituto de Tecnologia de Pernambuco (ITEP), CPRM e a Universidade Federal de Pernambuco, com o apoio do CNPq (Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento), através do Projeto Redeclima. Estas reuniões foram importantes para a troca de informações a respeito de quais dados cada instituição poderia dispor e também, de quais seriam as informações mais importantes a serem fornecidas por uma ferramenta de apoio ao gerenciamento de eventos de enchentes.

Nestas visitas pôde-se fazer também uma verificação dos níveis alcançados pelas duas últimas cheias ocorridas em Palmares, gerando-se dados usados posteriormente para ajustes dos modelos.

4.2 Estruturação do Sistema Computacional

Um sistema de monitoramento eficiente deve ser configurável para se adaptar a um conjunto razoável de situações de alerta. Esses alertas devem ser escalonáveis por tipos de usuários e criticidade da informação. Além disso, eles devem ser dados pelos meios cabíveis, quer sejam: e-mail, SMS (Short Message System), ou redes sociais. Sendo assim, analisando as possíveis utilizações do sistema e considerando como função principal a interligação de informações relevantes e agentes decisores, foi determinado que o mecanismo a ser criado fosse implementado sobre a plataforma Web. O uso de ferramentas para a internet, as quais diferem consideravelmente das usadas no desenvolvimento de sistemas “desktop”, traz a imensa vantagem do acesso “não-localizado”, isto é, o usuário não necessita estar em um centro de informações para acessar o sistema.

Para que sejam representadas as informações torna-se necessário construir uma base de dados contendo tabelas para os seguintes conjuntos de informações: bacias em estudo; estações automáticas de monitoramento telemétrico; dados de chuva, nível e vazão obtidos de estações automáticas; fontes de dados de previsão meteorológica (grades); dados de chuva obtidos de grades de previsão. Como o sistema deve funcionar constantemente com funções de monitoramento, devem-se obter de forma automatizada a partir de endereços na internet, dados observados de chuva, nível e vazão de estações automáticas telemétricas pertencentes às bacias em estudo. Esses dados são armazenados segundo estrutura padrão em uma base de dados única.

Para efeitos de cálculo de resposta da bacia a cenários futuros, o sistema deve obter, também de forma automatizada a partir de endereços na internet, dados de pluviosidade, resultantes de modelos de previsão meteorológica a respeito das bacias em estudo. Deve ser possível também a composição de conjuntos de dados envolvendo valores de chuva observados e previstos para as bacias estudadas. Para facilitar a análise visual da composição das chuvas nas bacias, o sistema deve

disponibilizar gráficos auto-atualizáveis com os dados do monitoramento das estações automáticas, bem como dados de previsão meteorológica.

Essas informações devem poder ser acessadas diretamente do mapa, selecionando-se a estação ou um ponto de dados de grades de previsão ou estimativas de satélites. Com base no que foi entendido das situações de enfrentamento de enchentes e do funcionamento dos modelos hidroclimatológicos, foi criado também um modelo (Figura 21) de interrelação entre os atores (pessoas) envolvidos nesta problemática, para facilitar a geração e compilação de informações sobre o estado geral das bacias em estudo, com respeito ao risco de enchentes.

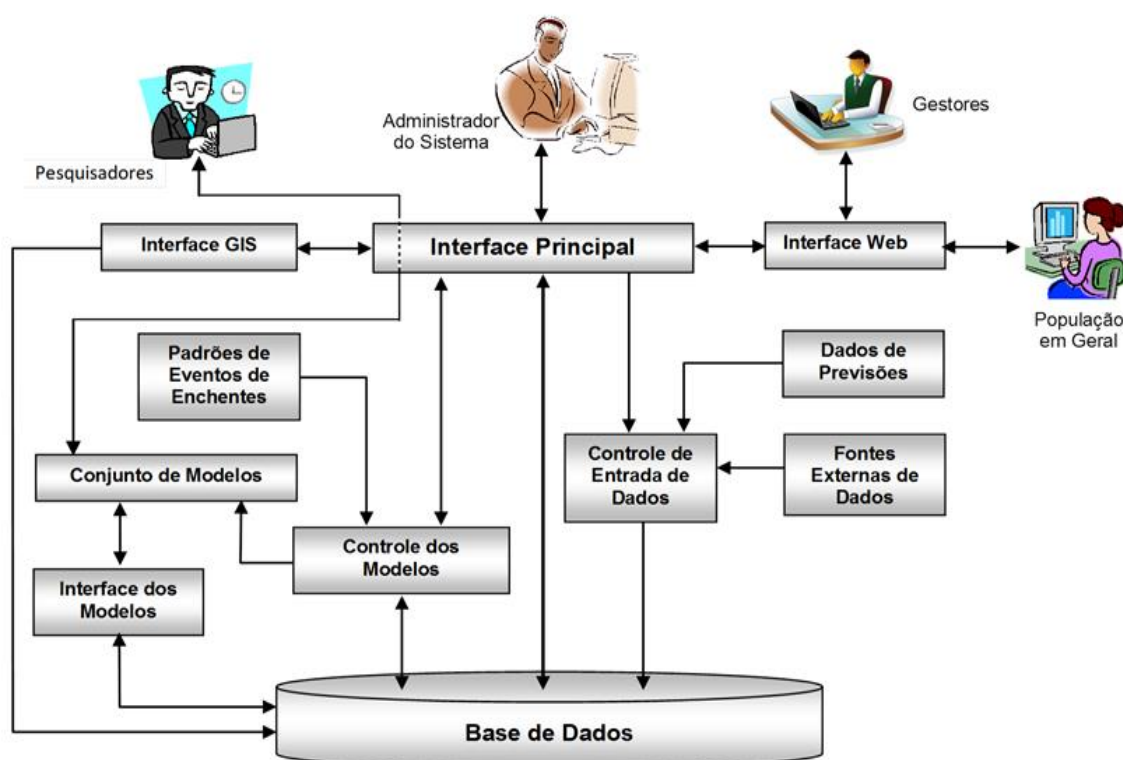


Figura 21: Modelo de estrutura de informações do sistema desenvolvido.

O sistema computacional desenvolvido nesta pesquisa denomina-se MAVEN (Monitor Avançado de Enchentes) e suas funcionalidades são apresentadas em sequência. O MAVEN é um sistema construído para interpretar informações hidrometeorológicas e a partir delas avaliar, inclusive em tempo real, vazões e níveis da água ao longo dos rios, gerando subsídios para os especialistas auxiliarem os gestores de recursos hídricos no enfrentamento de eventos de enchentes.

O MAVEN realiza esta função em duas frentes, quer sejam: (1) monitoramento automático de condições de tempo, analisando os dados que chegam de várias fontes, em busca de condições que possam indicar possibilidade de enchentes, emitindo alertas caso estas condições sejam verificadas; (2) simulação do comportamento hídrico das bacias, perante várias situações climáticas, observadas, estimadas, previstas ou criadas, com base em modelos construídos e validados por especialistas.

O sistema se baseia em um modelo que preconiza a interação entre as organizações de gestão e de pesquisa, responsáveis pela administração das questões públicas, associadas às enchentes. Essas organizações compartilharam dados, relatórios, conhecimentos técnicos, pessoal, infraestrutura e aportes financeiros para tornar viável e real, a construção de um sistema de informação integrado, obtido por meio de um esforço conjunto.

4.2.1 Definição da Estrutura de Dados e Procedimentos

A partir da análise sistêmica das necessidades de informações das equipes técnicas encarregadas do gerenciamento de enchentes e da disponibilidade de dados a partir das diversas instituições envolvidas, foi definido o mecanismo central de funcionamento do sistema, composto por um núcleo de simulação hidrológico-hidrodinâmica integrada, utilizando como entrada, dados de previsão de chuvas, gerados por modelos meteorológicos. A esse mecanismo foram incorporados componentes de controle de tarefas, para que os processos possam ser automatizados em um conjunto único, fornecendo uma plataforma confiável para a utilização dos conhecimentos técnico-científicos a respeito do comportamento hídrico das bacias hidrográficas em estudo.

Para efetivação da capacidade de previsão do sistema foi definido o requisito da possibilidade de utilização de várias fontes de dados de chuva, gerados por previsões meteorológicas, a serem utilizados como cenários com probabilidades de acontecimento. Esses dados de previsão devem ser “acoplados” a dados atuais das chuvas, medidos por estações automáticas (PCDs), podendo esses serem unificados também por dados de estimativas, gerados por modelos que utilizam imagens de satélites. A estrutura geral do sistema é mostrada na figura 22.

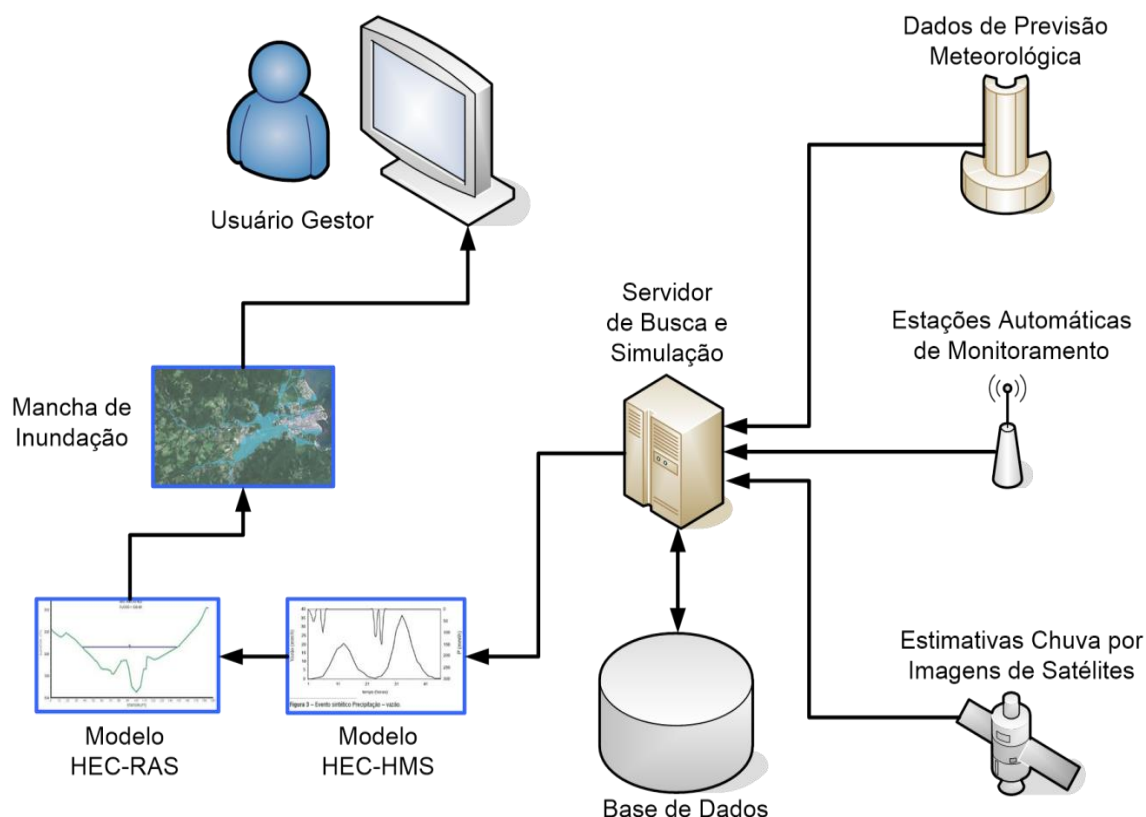


Figura 22: Esquema geral do Sistema de Monitoramento Avançado de Enchentes.

Todos esses dados devem ser coletados de seus servidores e armazenados em um banco de dados, gerenciado e disponibilizado por interfaces apropriadas. Os dados são utilizados para verificação de compatibilidade com os critérios de alerta e são constantemente capturados de suas bases originais.

Caso se verifique alguma combinação com determinado grau de possibilidade de geração de enchentes, os procedimentos de simulação hidrológica e hidrodinâmica são ativados para analisar aquela determinada combinação de dados.

Para exercer esta função, o MAVEN captura, armazena e utiliza múltiplas fontes e formatos de dados simultaneamente, estas são: estações hidroclimatológicas automáticas (PCDs); estações hidroclimatológicas convencionais; estimativas de chuva por imagens de satélites; previsões de chuva efetuadas por modelos regionais ou globais, além de cenários hipotéticos de chuva, compostos por séries de valores para cada estação da bacia.

4.2.2 Definição da Arquitetura Geral do Sistema

A arquitetura do sistema foi pensada em módulos que trocam informações entre si, de acordo com comandos dos usuários, manualmente ou automaticamente, pelo usuário especial MAVEN. O núcleo do sistema é um conjunto de modelos hidrológicos e hidrodinâmicos das bacias em estudo.

Também foi pensado outro mecanismo que controlasse a obtenção de dados de forma automática, já que se mostrou interessante que o sistema estivesse acessando os dados de forma contínua. Por último, foi definido um mecanismo de interface do usuário, que permitisse a apresentação dos resultados das simulações.

A arquitetura do sistema propicia que ele possa ser utilizado como ferramenta de apoio à decisão em momentos de enfrentamentos de enchentes, mas também como uma ferramenta de pesquisa, para desenvolvimento de modelos hidrológicos e hidrodinâmicos, nos períodos em que não houver riscos iminentes de enchentes.

Esta característica de flexibilidade requer uma estrutura de dados que possa ser associada aos usuários, pois esses estarão fazendo seus experimentos no sistema e precisam ter seus dados, parâmetros e resultados armazenados e disponíveis para efeitos de análises, o que confere ao MAVEN uma gama de aplicações maior, que um simples sistema de monitoramento.

Então, como um sistema de informações desenvolvido em ambiente acadêmico, O MAVEN propicia uma série de possíveis experimentos de monitoramento e simulação hidrológica e hidrodinâmica, transferindo os resultados e metodologias que apresentem avanços para o ambiente de gestão, fornecendo mecanismos ajustados para que as questões referentes ao entendimento das possíveis consequências de eventos extremos de pluviosidade nas bacias em estudo. Sendo assim, módulos e interligações do sistema foram desenvolvidos refletindo um fluxo contínuo e acumulativo de dados, além de um mecanismo automático de utilização destes dados em conformidade com os modelos criados e ajustados para as bacias.

Desta maneira, a estrutura básica do sistema é apresentada na Figura 23, com seus componentes e interligações. Na sequência, os blocos da estrutura são detalhados, em suas funcionalidades.

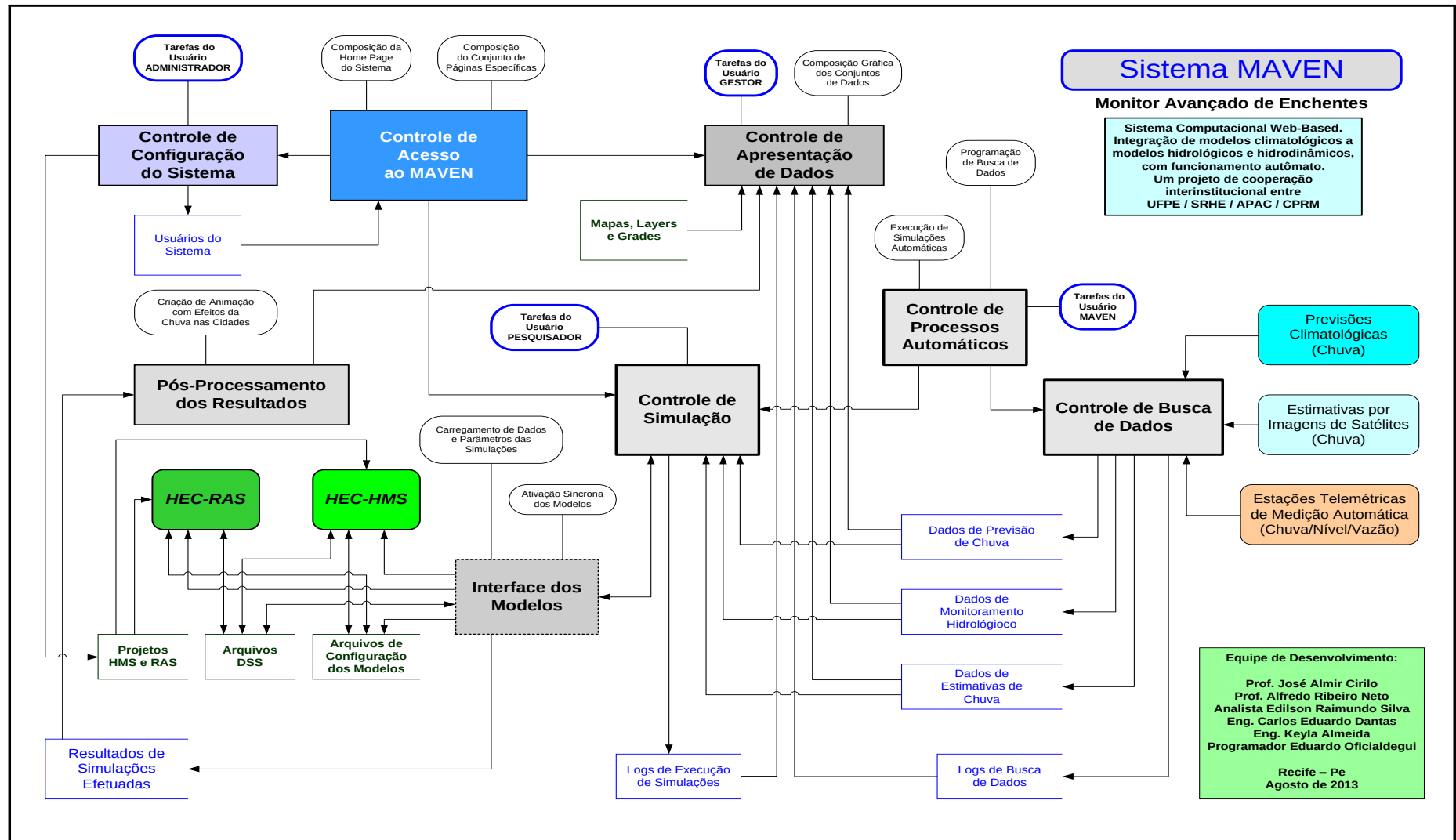


Figura 23: Estrutura geral do MAVEN, com blocos de processos e conjuntos de dados interligados, além de atribuições de usuários.

4.2.2.1 Controle de Busca de Dados

Esse componente tem a responsabilidade de acessar e obter os dados externos fornecidos pelos sistemas de outras organizações. Os dados acessados podem ser de fontes de Web Services, FTP, dentre outras. Dependendo do formato da informação é necessário aplicar um pós-processamento prévio à atualização desses no banco de dados, a exemplo do processamento de arquivos em formato GRIB, texto, XML, etc. Estas funções também são associadas ao componente.

4.2.2.2 Controle de Processos Automáticos

Componente responsável pela coordenação e sincronização dos processos de atualização de dados e execução de simuladores. Basicamente se constitui de uma série de processos com temporizadores e disparadores, buscando dados periodicamente e analisando esses dados para, eventualmente disparar eventos de simulação e (ou) alertas.

4.2.2.3 Controle de Simulação

Componente com as funções de controlar a execução de uma simulação, configurar os arquivos prévios à simulação, detectar erros, reexecutar processos, controlar e ativar transições na sequência de estados de execução de uma simulação. Esse módulo é responsável pela sincronização entre as execuções dos modelos, garantindo que um modelo já tenha concluído sua geração de dados antes de ativar o outro modelo.

4.2.2.4 Interface dos Modelos

Esse componente fornece suporte para incorporar novas fontes de dados e lançar a execução dos modelos usando diferentes fontes de dados de maneira homogênea, compondo um conjunto de interfaces e abstrações, permitindo a

execução dos modelos com dados observados ou com dados de previsão, Também define os tipos de arquivos temporais ou de compartilhamento de dados entre cada etapa de execução.

4.2.2.5 Modelos de Execução (HEC-HMS, HEC-RAS)

Representam componentes criados externamente, mas integrados no sistema por meio de rotinas de ativação e da composição de conjuntos de dados. São executados de forma automática ou manual, trabalhando sobre dados baseados nas configurações das bacias hidrográficas e nas condições do contexto hidrometeorológico observado, estimado, previsto, ou arbitrado, gerando resultados, em termos de valores de níveis de água em cidades ribeirinhas, que depois são armazenados na base de dados.

4.2.2.6 Controle de Configuração do Sistema

Componente que fornece um conjunto de mecanismos para fazer a manutenção dos dados na base do sistema, tais como gerenciamento de bacias, estações, usuários, etc. Esse módulo controla também as funcionalidades acessíveis a cada usuário, provendo a segurança do sistema e a capacidade de registro das operações efetuadas.

4.2.2.7 Pós-Processamento dos Resultados

Esse componente tem a funcionalidade de gerar dados de visualização, tais como manchas de inundação utilizando como base os resultados dos modelos e integrando com outras ferramentas, como ArcGIS e outras.

4.2.2.8 Controle de Apresentação de Dados

Componente encarregado de gerar gráficos de visualização, mapas interativos, exportação de dados, disponibilização de dados em webservices e outros meios de disseminação de informações.

4.2.2.9 Base de Dados

A base de dados que se utilizou para armazenar os dados do sistema é o PostgreSQL. Esta base de dados, além de ser um software livre, caracteriza-se pela robustez e facilidade de manutenção, simples de usar e integrar com outras tecnologias.

4.2.2.10 Plataforma Web

Todo o funcionamento do sistema MAVEN é baseado na internet (Web). Para isto foram desenvolvidos mecanismos de aplicação em um servidor dedicado, com capacidades de processamento e armazenamento elevadas, fazendo com que o sistema possa ser executado independentemente de operador e de local de sua utilização. Isto é, os usuários do sistema podem estar em qualquer lugar que tenha acesso à internet por uma conexão de banda larga. Esse princípio de funcionamento, “Web-based”, fornece também a capacidade de manutenção remota do sistema.

Para o desenvolvimento do sistema Web escolheu-se o Framework Spring, que é um conjunto de funcionalidades para suporte ao desenvolvimento de aplicações em JAVA. O Spring resolve satisfatoriamente os seguintes problemas comuns da maioria dos aplicativos Web, tais como: acesso a dados; gerenciamento de transações; model-view-controller; acesso remoto a serviços de terceiros; convenções na configuração; autenticação, autorização e segurança; gerenciamento remoto; gerenciamento de mensagens; testagem e notações.

4.2.2.11 Elementos da Estrutura Operacional

As características operacionais do sistema se baseiam na estrutura Cliente-Servidor, sendo construído com tecnologias livres, cujas principais são: JAVA, PostgreSQL e Google Maps. Apresenta um modo de monitoramento em gráficos, com janelas abertas e atualizadas simultaneamente, independentes do navegador. O MAVEN realiza captura de dados automática, em websites FTP ou webservices e

utiliza os modelos HEC-HMS, HEC-RAS, com estrutura de dados HEC-DSS (Hydrologic Engineering Center - Data Storage System).

4.2.3 Captura de Dados Externos.

O MAVEN realiza o monitoramento contínuo de dados de chuva, nível e vazão através de busca automática a esses dados no Webservice e FTP. O Webservice executa tarefas de consistência dos dados e geração de valores de vazão, mediante a aplicação da curva-chave sobre os valores de nível recebidos da estação.

4.2.3.1 Dados de Estações Telemétricas

Os dados do pluviômetro e do sensor de nível de água das estações automáticas são acessados automaticamente de 5 em 5 minutos pelo sistema, via Webservice e FTP da ANA. O endereço do Webservice da ANA é composto por um link da Internet com uma expressão com os parâmetros da consulta, no seguinte formato (valores sem os colchetes):

<http://telemetriaws1.ana.gov.br/ServiceANA.asmx/DadosHidrometeorologicos?....>
...codEstacao=[Código da Estação]&dataInicio=[Data Inicial]&dataFim=[Data Final]

Os dados obtidos do Webservice da ANA chegam em formato de arquivos XML. Esses dados contêm registros com intervalo de 15 minutos, de chuva, vazão e nível, para as estações buscadas. Eventualmente os valores das variáveis podem chegar em branco, ou seja, vazios. Nesse caso, o sistema preenche a referida combinação "estação-data-hora" com o valor -1 diretamente na Base de Dados. Desta maneira um valor -1 corresponde a "valor faltante", ou falha na disponibilização do dado.

Outra maneira de obter os dados de observação das estações é por meio de arquivos disponibilizados pela ANA em um servidor FTP com acesso restrito. O acesso aos dados do FTP da ANA é feito através do usuário <ftp.pcd>, no endereço <ftp.gov.ana.br>.

A frequência com que esses dados chegam é analisada para apresentação da situação de funcionamento das estações na tela principal de monitoramento do sistema. Os estados de uma estação podem ser: amarelo: Alerta, a estação indica que está acontecendo um evento de chuva alta; azul: Normal, a estação está operando normalmente; cinza: Falha em dados, os dados da estação estão chegando parcialmente; preto: Fora de serviço, a estação aparece “off-line”, ou fora de serviço.

4.2.3.2 Dados de Estimativas de Satélites

Os dados de estimativas de satélites são buscados de maneira automática nos servidores do NOAA, nos Estados Unidos. Os arquivos são recebidos em formato binário, com um arquivo por hora, contendo dois grupos de registros de dados, um para cada meia hora. Seu mecanismo de acesso localiza a posição relativa à mesma “área de recorte” (definida a seguir) dos dados de previsão.

4.2.3.3 Dados de Modelos de Previsão

Os dados de previsão utilizados são também capturados nos endereços dos servidores de suas instituições fornecedoras e têm seus dados extraídos por meio de procedimentos específicos para leitura de arquivos GRIB1 e GRIB2, sendo que os dados do modelo WRF são extraídos a partir de arquivos ASCII. As rotinas de extração capturam só os dados contidos em cada uma das “áreas de recorte” definidas no sistema.

4.2.3.4 Área de Recorte de Dados de Previsão

A partir desse conjunto de dados de previsão capturados dos servidores do CPTEC e da APAC é “extraída” uma área, denominada “Área de Recorte” que contém os dados de previsão passíveis de estudo pelo sistema.

Cada grade cadastrada no sistema pode possuir uma ou mais áreas de recorte, definidas pelas coordenadas de longitude (mínima e máxima) e latitude

(mínima e máxima). Os dados de chuva dos pontos da grade pertinentes à área de recorte (da grade) são constantemente buscados nos servidores externos e armazenados na base de dados do MAVEN. Para a grade que está sendo utilizada atualmente nesse trabalho, as coordenadas da área de recorte (Figura 24), denominada “NordestePE”, são:

Latitudes: -10° (inf) e -7° (sup) / Longitudes: -38° (esq) e -34° (dir)



Figura 24: Área de recorte para extração dos dados de previsão de chuvas.

As áreas de recorte devem ser definidas como polígonos (retângulo) de proporções muito superiores às das bacias em estudo para prover dados em uma escala maior que a bacia, com a intenção de propiciar estudos mais abrangentes, sobre os aspectos meteorológicos das enchentes, que envolvam a análise de movimentações de massas atmosféricas.

4.3 Mecanismos de Integração de Modelos e Dados

Para a criação de um modelo de integração dos modelos e dos conjuntos de dados, as entradas e saídas dos modelos e os formatos de cada conjunto de dados foram estudados com a intenção da especificação de interfaces e de mecanismos

de transformação em um formato comum, a ser armazenado em base de dados. Os formatos estudados foram convertidos através destas interfaces e, além de serem armazenados, foram analisados para verificação de compatibilidade com os valores de alerta, definidos pelos pesquisadores com base nas características específicas de cada bacia.

Com base nos estudos efetuados sobre os conjuntos de dados, especificando seus formatos, periodicidade, localização, níveis de consistência e outras características de confiabilidade, foram construídos procedimentos de gerenciamento desses dados, de processos automáticos e manuais, interfaces e conexões externas, de maneira que o mecanismo como um todo possa operar simultaneamente com vários usuários, várias bacias e várias configurações de esquema de interligação entre os modelos, isto é, deve ser possível utilizar-se diferentes fontes de dados, constituindo esses, diferentes cenários de simulação, de acordo com a análise desejada, seja ela manual ou automática.

4.3.1 Escolha dos Modelos, Hidrológico e Hidrodinâmico

Dando continuidade aos estudos realizados pelo grupo de pesquisas em modelagem hidrológica e hidrodinâmica do Departamento de Engenharia Civil da UFPE, foram escolhidos os modelos HEC-HMS e o HEC-RAS do USACE (US Army Corp of Engineers) para representação das fases hidrológica e hidrodinâmica, respectivamente, do ciclo hidrológico.

Esta escolha foi feita devido à intenção de seguir aprimorando o conhecimento sobre estas duas ferramentas de modelagem já estudadas em experimentos no grupo, a partir dos eventos de enchentes ocorridos na mata sul e agreste meridional do estado de Pernambuco em 2010 e 2011, (Dantas, 2012) e (Santos, 2013).

O modelo HEC-HMS é um modelo hidrológico semi-distribuído desenvolvido pelo USACE, cujo mecanismo de geração de escoamento se baseia no método da curva número (CN – Curve Number) do SCS (Soil Conservation Service), dos Estados Unidos.

O HEC-HMS foi desenvolvido para representar as fases do ciclo hidrológico, no seu aspecto do balanço hídrico no solo, o qual é constituído pela interação solo-

vegetação, pelas transições da propagação do escoamento subterrâneo, escoamento superficial, na calha dos rios e nos lagos (Dantas, 2012).

Segundo Anderson et al. (2002) o modelo HEC-HMS utiliza uma interface gráfica especialmente desenvolvida para facilitar a construção de um modelo de bacia hidrográfica, auxiliando na configuração das variáveis de controle e parâmetros da simulação.

Segundo Feldman (2000), o HEC-HMS utiliza “sub-modelos” específicos para cada fase do processo de escoamento superficial, são eles: (1) modelo que computa o volume do escoamento; (2) modelo que computa o escoamento direto; (3) modelo do fluxo de base; (4) modelo do fluxo nos canais. O HEC-HMS calcula a precipitação média sobre a bacia com base nas séries de dados das estações constantes em seu modelo meteorológico segundo a Equação 1.

$$P_{MAP} = \frac{\sum_i [w_i \sum p_i(t)]}{\sum_i w_i} \quad [1]$$

Onde P_{MAP} é a precipitação média sobre a bacia, $p_i(t)$ é a precipitação da estação i no tempo t e w_i é o peso da estação i . O peso w da estação i pode ser calculado por meio da média aritmética, pelo polígono de Thiessen ou pelas isoietas. Para o cálculo da distribuição temporal da precipitação o HEC-HMS utiliza a expressão:

$$P_{MAP} = \left[\frac{p_{pattern}(t)}{\sum_i p_{pattern}(t)} \right] P_{MAP} \quad [2]$$

Onde $p_{pattern}(t)$ é o padrão de precipitação no tempo t e é calculado pela expressão:

$$p_{pattern} = \frac{\sum w_i(t) p_i(t)}{\sum w_i(t)} \quad [3]$$

A representação do procedimento para cálculo do escoamento superficial na bacia, pelo HEC-HMS, é mostrada na Figura 25.

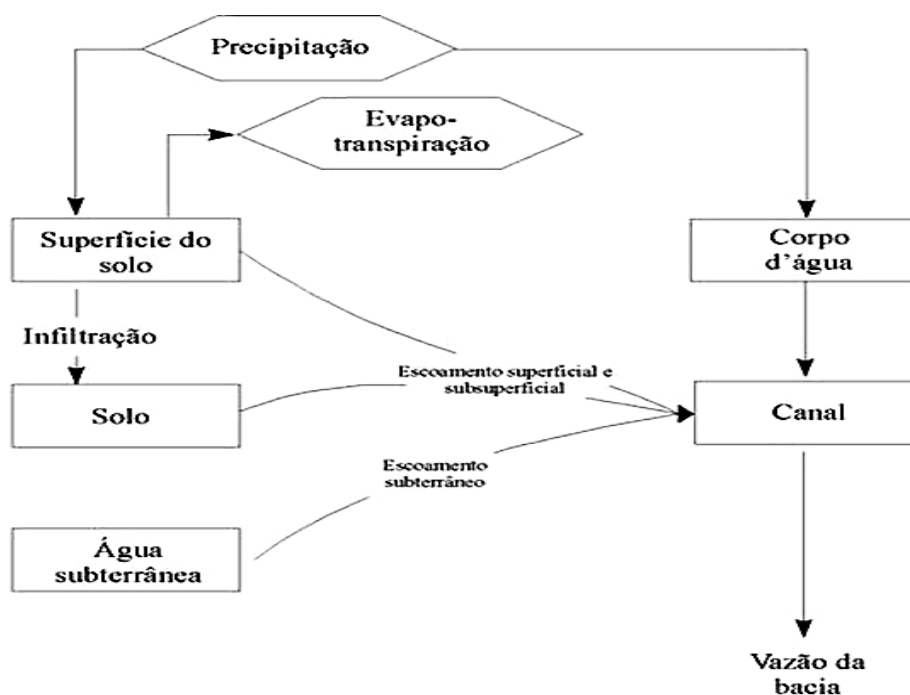


Figura 25: Representação do cálculo do escoamento pelo HEC-HMS, adaptado de Feldman (2000).

Por sua vez, o modelo HEC-RAS é um procedimento computacional que permite o cálculo das variáveis hidráulicas associadas ao fluxo hídrico em uma dimensão e regime permanente ou não-permanente, bem como o cálculo do transporte de sedimentos em canais, (Hasani, 2013). Segundo Brunner (1995), o HEC-RAS apresenta também a capacidade de tratar com questões relativas à análise de qualidade de água. O HEC-RAS utiliza um componente de geometria como elemento principal de representação espacial dos canais, sendo esse componente considerado a base para todos os cálculos hidráulicos. A seguir são apresentadas as formulações básicas para os cálculos do HEC-RAS, iniciando pela equação de conservação da energia, mostrada na Equação 4.

$$Z_2 + Y_2 + \frac{a_2 V_2^2}{2g} = Z_1 + Y_1 + \frac{a_1 V_1^2}{2g} + h_e \quad [4]$$

Onde Z_1 e Z_2 são elevações do canal principal, Y_1 e Y_2 representam a profundidade da água nas seções do modelo, V_1 e V_2 correspondem às velocidades médias, a_1 e a_2 são coeficientes de peso das velocidades, g é a aceleração da gravidade e h_e corresponde à perda de carga de energia no processo. Na Figura 26

é mostrada uma representação dos elementos constituintes da equação de perda da energia.

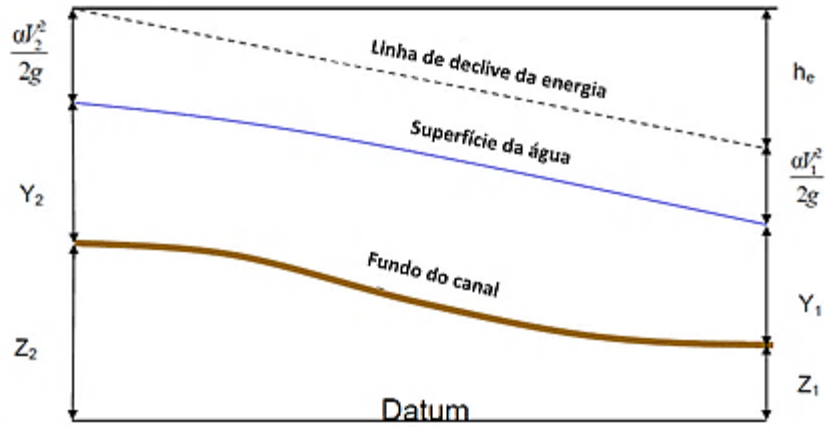


Figura 26: Componentes da equação de perda da energia, adaptação de Brunner (1995).

Nesse caso, o componente correspondente à perda de carga da energia (h_e) é calculado pela Equação 5.

$$h_e = L\bar{S}_f + C \left| \frac{a_2 V_2^2}{2g} - \frac{a_1 V_1^2}{2g} \right| \quad [5]$$

Onde L é o comprimento do trecho da descarga ponderada, $\bar{S}_f$ é o coeficiente de atrito entre duas seções e C é a expansão ou contração do coeficiente de carga. No caso, o comprimento do trecho da descarga ponderada (L) é dado pela expressão:

$$L = \frac{L_{lob}\bar{Q}_{lob} + L_{ch}\bar{Q}_{ch} + L_{rob}\bar{Q}_{rob}}{\bar{Q}_{lob} + \bar{Q}_{ch} + \bar{Q}_{rob}} \quad [6]$$

Onde L_{lob} , L_{ch} e L_{rob} são os comprimentos dos trechos entre as seções, para a margem esquerda, para o canal e para a margem direita, respectivamente.

Outra razão sendo considerada para escolha desses modelos é que, em seu desenvolvimento, eles já foram projetados para facilitar a interligação entre si, com o uso de uma estrutura de dados única, representada por arquivos DSS (Data Storage System). Esta é uma grande vantagem, pois diminui sensivelmente a necessidade de procedimentos para conversões de formato, endereçamento e indexação. O fato desses modelos contarem com pequenos mecanismos computacionais, do tipo

“script”, para sua ativação independentemente da interface, também contribuiu para a sua escolha. Apesar das razões acima colocadas terem contribuído para a escolha desses modelos na representação das etapas (hidrológica e hidrodinâmica), dos eventos de enchentes, seus históricos de utilização em simulações do comportamento hídrico das bacias em situações de enchentes, constituiu a razão preponderante para sua escolha. Além disso, verificou-se, através da literatura consultada, que esses modelos são adequadamente aplicados às bacias com as dimensões e propriedades da bacia em estudo nesse trabalho, propiciando também seu emprego em outras bacias, o que é uma das metas do sistema. Sendo assim, a metodologia e os conjuntos de dados utilizados na bacia em estudo, serão utilizados pelo sistema também para monitoramento e simulação de outras bacias.

4.3.2 Integração de Modelos de Simulação

A integração dos modelos corresponde ao núcleo da aplicação em desenvolvimento nesta tese. A integração dos modelos foi implementada pelo mecanismo que gerencia o fluxo, no qual um modelo recebe os dados fornecidos pelo outro modelo. Um dos aspectos que estão diretamente associados à integração de procedimentos computacionais é o tratamento dos conjuntos de dados do processo por inteiro, ou seja, um único fluxo de dados. Nesse estudo foi possível identificar as interfaces (estruturas comuns) de dados e procedimentos.

O sistema de monitoramento automático e modelagem integrada para alerta de enchentes é uma estrutura computacional que foi projetada para ser um “middleware”, isto é, ela conecta e ativa softwares, para executar simulações hidrológicas e hidrodinâmicas em bacias hidrográficas, de forma integrada e sincronizada, com ênfase na observação das mudanças dos níveis dos rios em áreas de interesse, que são as cidades ribeirinhas.

Desta maneira, foi construído um “núcleo” lógico, integrador de dados de diferentes instituições, os quais são codificados em diferentes formatos, apresentam diferentes resoluções espaciais e temporais, diferentes graus de confiabilidade e também diferentes fatores de disponibilidade em tempo real. Esse mecanismo é, na realidade, um conjunto de conversores (interfaces) que transformam algum

determinado formato de representação da informação em um formato comum, simples, a ser armazenado na base de dados.

A partir desse formato comum, o mecanismo integrador de dados do MAVEN pode então reconverter os dados para os formatos requeridos pelos modelos, pelas janelas de análise, pelo mecanismo de avaliação de alertas, pelas consultas de exportação, pela geração de séries compostas de dados de previsão, etc.

4.3.2.1 Estrutura de Dados Comum entre os Modelos

A partir dos estudos sobre os conjuntos de dados necessários ao funcionamento dos modelos HEC (USACE) foi identificado um mecanismo de interface entre esses dados. Esse mecanismo é a própria estrutura de dados usada pelos modelos HEC para armazenamento de seus dados, o HEC-DSS. O HEC-DSS é uma estrutura de dados que permite o referenciamento das séries de dados armazenadas, fornecendo assim uma maneira de se intercambiar informações entre um modelo e outro. O HEC-DSS é um sistema de banco de dados projetado para armazenar e recuperar dados científicos, que normalmente são sequenciais, de forma eficiente e segura. Esses dados incluem, mas não estão limitados, a dados de séries temporais, dados de curvas, dados de grades espacialmente orientados, entre outros. O HEC-DSS foi projetado para armazenar, recuperar e facilitar o acesso aos dados, para usuários e programas aplicativos, estando incorporado à maioria dos programas de aplicação do HEC.

O HEC-DSS utiliza um bloco de dados sequenciais como a unidade básica de armazenamento. Esse conceito resulta em um acesso mais eficiente de séries temporais ou outros dados relacionados sequencialmente. Cada bloco contém uma série de valores de uma única variável ao longo de um intervalo de tempo adequado para a maioria das aplicações. O conceito básico associado ao HEC-DSS é a organização dos dados em registros de elementos contínuos, relacionados às aplicações, ao contrário de itens de dados individualmente endereçáveis. Esta abordagem é mais eficiente para aplicações científicas que um sistema de banco de dados convencional, pois evita a sobrecarga de processamento e armazenamento necessário na montagem de um registro equivalente de um sistema convencional.

O HEC-DSS é implementado em arquivos que armazenam um ou mais blocos ou registros, em um único arquivo com a extensão “dss”. Cada registro no arquivo tem informações de cabeçalho que identificam as unidades, data de início e/ou o tempo de início das informações no registro. Cada registro é identificado por um identificador único chamado de PATH ou “caminho”. Entender os PATHs dos arquivos DSS significa entender como usá-los. Referenciam-se conjuntos de dados ou registros DSS, por seus caminhos. Caminhos DSS podem consistir de até 391 caracteres e são, por convenção, separados em seis partes (delimitadas por barras “/”), que podem ter até 64 caracteres cada. Suas partes (de “A” a “F”), são representadas na Tabela 3, como se segue:

Tabela 3: Partes dos percursos (PATHs) de acesso aos dados dos arquivos DSS.

Parte	Descrição
A	Projeto, rio ou nome da bacia
B	Local
C	Parâmetro associado ao tipo do dado
D	Data inicial do bloco de dados, em formato “ddmmaaaa”
E	Passo de tempo
F	Informação adicional opcional para descrição do dado

Com o uso desta estrutura de dados, os resultados (em valores de vazão) produzidos pelo modelo HEC-HMS, são transferidos como condições de contorno para o modelo HEC-RAS.

4.3.2.2 Arquivos de Controle dos Modelos

Além do uso do HEC-DSS e da estrutura de conexão entre os modelos, verificou-se que, para integrar os modelos de simulação ao sistema e, para que esses sejam executados automaticamente, faz-se necessário executar os modelos em modo de lotes (batch) e, para ativação correta dos modelos, é necessária a manipulação do conteúdo dos arquivos de controle do HEC-HMS e do HEC-RAS. O conteúdo desses arquivos define detalhes das simulações a serem feitas e fornece uma maneira do MAVEN gerenciar a interligação de dados e procedimentos associados à execução síncrona dos modelos. Sendo assim, os arquivos, sua descrição e campos manipulados são apresentados na Tabela 4 para o HMS e na Tabela 5 para o RAS.

Tabela 4: Arquivos e campos de controle do HEC-HMS, alterados pelo MAVEN.

Arquivo	Função	Campos alterados durante a configuração do modelo	Campos alterados em tempo de execução
*.hms	Parâmetros do projeto de simulação	Project, DSS File Name, Precipitation/FileName, Basin/FileName, Control/FileName.	Nenhum
*.basin	Descrição da bacia	Last Modified Data, Last Modified Time	Nenhum
*.met	Informações sobre o modelo meteorológico	Metereology, Last Modified Data, Last Modified Time, Use Basin Model.	Estações são substituídas por pontos de previsão, quando simulando com dados de previsões
*.gage	Informações sobre dados das estações de chuva	Gage Manager, Gage, Código, Nome, Last Modified Data, Last Modified Time.	Latitude Degrees, Longitude Degrees, DSS File, Pathname.
*.control	Parâmetros para execução do modelo	Control, Last Modified Data, Last Modified Time.	Start Date, Start Time, End Date, End Time, Time Interval, State Grid Write Interval.

Tabela 5: Arquivos e campos de controle do HEC-RAS, alterados pelo MAVEN.

Arquivo	Função	Campos alterados durante a configuração do modelo	Campos alterados em tempo de execução
*.prj	Projeto RAS	Proj Title.	DSS Start Date, DSS Start Time, DSS End Date, DSS End Time.
*.pNN	Plano de execução	Plan Title, DSS File.	Simulation Date
*.uNN	Parâmetros de contorno da simulação em regime não-permanente (Unsteady).	Flow Title, Interval	DSS File, DSS Path, Use DSS.

4.4 Operacionalidade do Sistema

O sistema MAVEN foi idealizado para ser utilizado por operadores através de uma interface Web, fornecendo consultas, dados e análises sobre os parâmetros hidroclimáticos em evidência em situações de enchentes. No entanto, o sistema também opera de maneira automática contínua, ou seja, o sistema está rodando a todo tempo e realizando buscas e análises de dados. Quando os dados indicarem situações de possíveis enchentes, o sistema emite alertas para usuários cadastrados e aciona os módulos dos modelos hidrológicos e hidrodinâmicos para avaliar a situação e, possivelmente emitir outros alertas. Desta maneira, convém destacar os dois modos de operação do MAVEN, automaticamente, pelo usuário MAVEN e, manualmente, pelos usuários registrados no seu cadastro.

4.4.1 Automação de Tarefas e o Usuário MAVEN

Dentro de sua característica de funcionamento automático, o MAVEN se comunica com seus usuários: (a) gestores, mediante as situações possíveis de enchentes, com informações sumarizadas; (b) pesquisadores, com relatos de possíveis falhas nos modelos, históricos de funcionamento ou necessidade de ajuste de parâmetros; (c) administradores, com relatos de possíveis falhas do sistema, relatórios de atividades dos módulos, etc.

O sistema poderá trabalhar com diferentes fontes e formatos de dados de previsão. No momento, o sistema está trabalhando com dados em formato grade do modelo ETA, e GRIB2 do modelo BRAMS. Para outros formatos de dados, tornar-se-á necessária a implementação de interface e a determinação de suas áreas de recorte.

O sistema MAVEN gera automaticamente, avisos em situações de risco de enchentes, mediante o envio de mensagens, inicialmente via e-mail, posteriormente via SMS. Isto é, quando um evento de alerta acontece, os usuários gestores e administradores são informados no e-mail ou no telefone, cadastrado na conta de usuário do sistema.

4.4.2 Interação dos Usuários com a Interface Web

A entrada no sistema MAVEN se faz através do endereço: www.maven.ufpe.br/redeclima, o qual acessa o servidor de aplicação Web, instalado no Laboratório de Modelagem Computacional do Departamento de Engenharia Civil da UFPE, no CTG (Centro de Tecnologia e Geociências). O servidor então apresenta a home-page do MAVEN (Figura 27).

A funcionalidade do sistema é exercida por cinco tipos de usuários, quais sejam: população em geral; administradores de situações de enchentes; pesquisadores modeladores das bacias; administradores do sistema e o usuário MAVEN, que executa funções automáticas do sistema. O MAVEN é capaz de efetuar simulações do comportamento hidrológico e hidrodinâmico de várias bacias simultaneamente, de forma manual e automática, apresentando dados e resultados através de tabelas e gráficos em páginas e janelas (pop-up) na internet.

O sistema poderá gerar planícies de inundação em áreas de interesse e servir de plataforma para o desenvolvimento de modelos hidrológicos e hidrodinâmicos para bacias hidrográficas em qualquer lugar do mundo, desde que estas possam ser simuladas pelos modelos utilizados.



Figura 27: Web-page de entrada no sistema MAVEN.

A Figura 27 também apresenta o acesso ao nível geral do sistema, isto é, o nível em que a população em geral poderá acessar o sistema e obter algumas informações relativas ao estado geral das bacias em estudo. Esta tela também controla o acesso dos usuários administradores, pesquisadores, especialistas e gestores, ao sistema.

A identificação dos usuários foi considerada um elemento importante, pois as operações de cada usuário do MAVEN são registradas em um histórico (Log), facilitando tarefas de administração. Além disso, o histórico de simulações efetuadas no sistema é dividido e referenciado pelos usuários que as executaram, efetivando um mecanismo de controle das simulações que cria um domínio de experimentos para cada usuário. Após reconhecido o usuário e sua senha, o sistema abre a página principal do MAVEN, que é a tela de monitoramento, responsável por apresentar o estado geral das estações, fornecendo acesso ao cadastro de informações básicas, configuração do sistema, além das funções de simulação e o histórico de simulações do usuário. A tela principal e suas partes constituintes são indicadas na Figura 28. Além dessa, o sistema dispõe de várias janelas de manipulação de parâmetros.

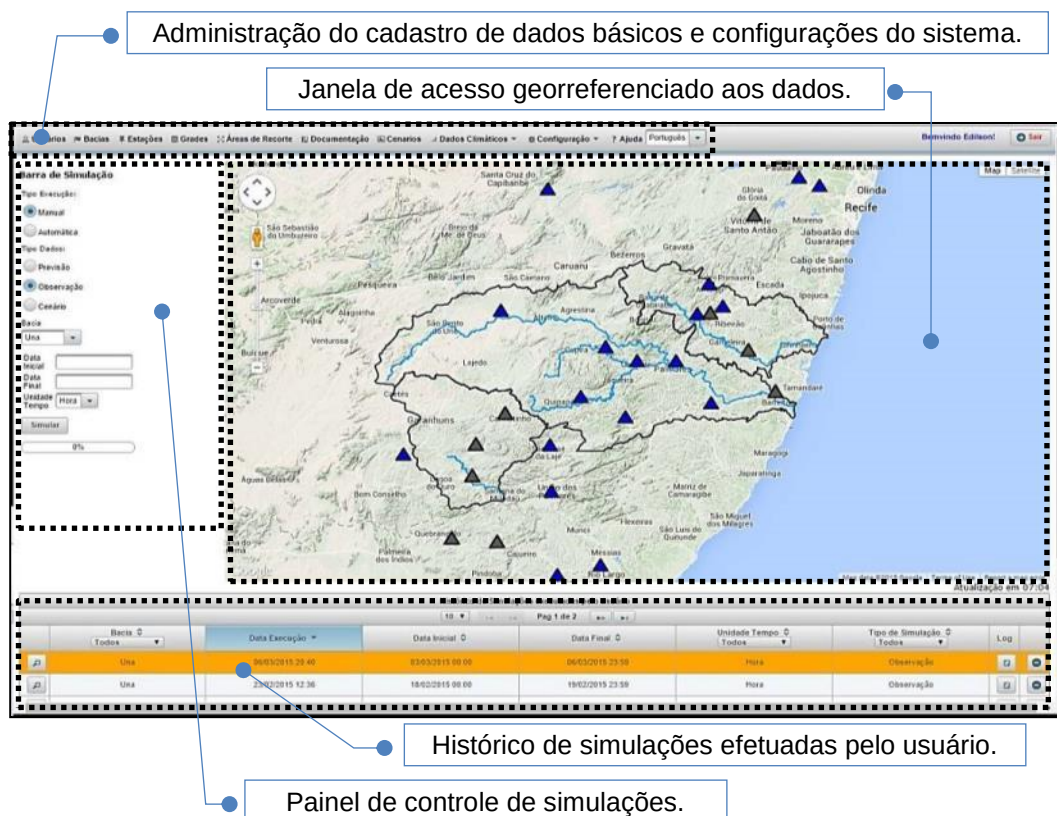


Figura 28: Tela principal do sistema e suas áreas específicas.

4.4.3 Administração do Cadastro de Informações Básicas

As tarefas de manutenção do funcionamento do sistema (Figura 29) estão sob a responsabilidade do usuário administrador e se referem ao controle de dados e parâmetros do sistema. Foram incluídos usuários dos órgãos gestores de águas (SEINFRA/SRH-PE e APAC) como avaliadores do sistema, dentro dos requerimentos estabelecidos pelos técnicos, com base nas experiências vividas nos eventos reais.

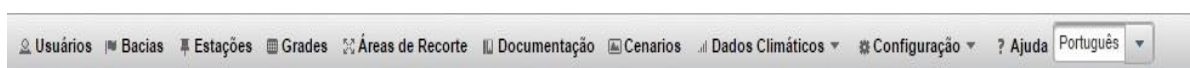


Figura 29: Área de funcionalidades do sistema

4.4.4 Monitoramento

O monitoramento é a tarefa principal do sistema MAVEN, ele é feito de forma automática ou manual. O sistema está permanentemente buscando dados

nos servidores das agências responsáveis pelas PCDs e avaliando esses dados de acordo a critérios definidos pelos usuários. O sistema realiza o monitoramento dos dados medidos pelas estações telemétricas e previsão dos modelos através de uma tela (Figura 30), que é atualizada a cada 5 minutos com o estado das estações pertencentes a uma bacia. Diferentes estados das estações são visualizados com cores diferentes.

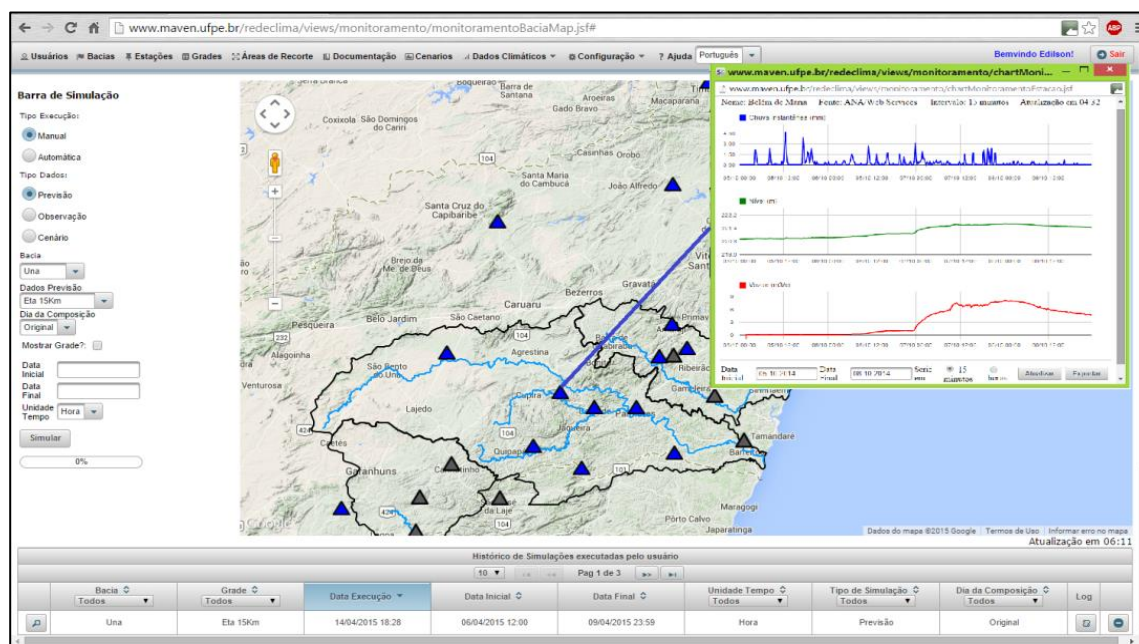


Figura 30: Tela de monitoramento do MAVEN e janela de consulta de dados hidrológicos.

Os estados de uma estação (triângulos) podem ser: (1) alerta, indicando que está acontecendo possível evento de emergência; (2) normal, indicando que a estação está operando normalmente; (3) falha em dados, mostrando que os dados da estação estão chegando parcialmente e; (4) fora de serviço, onde a estação aparece off-line ou fora de serviço.

4.4.4.1 Monitoramento dos Dados das PCDs

O MAVEN serve de ferramenta de consulta dos dados gerados pelas PCDs de forma manual, com abertura de janelas visualizadoras automáticas de gráficos. Estas janelas são do tipo “pop-up” e tem atualização automática, de acordo com a chegada dos dados (Figura 31).

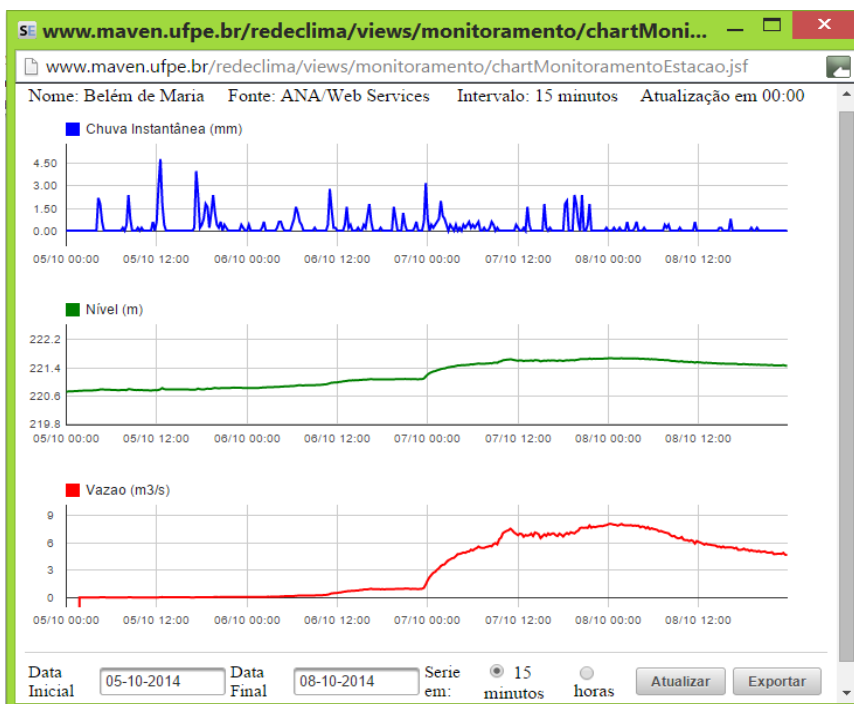


Figura 31: Exemplo dos dados obtidos no Web Service da ANA.

Os dados observados para uma estação são apresentados de forma gráfica comparativa em janelas separadas, auto-atualizadas a cada 5 minutos. Os dados de monitoramento das estações podem ser mostrados em séries temporais de 15 minutos de intervalo (frequência original de geração do dado) ou em séries horárias (agregação da frequência original).

Falhas nas séries recebidas são apresentadas como o valor negativo -1. Através da tela de monitoramento também são disponibilizados os dados da série de valores observados a partir da fonte FTP, sendo que a diferença para com as séries anteriores é que os dados da fonte FTP são valores de chuva (acumulada) e nível.

4.4.4.2 Monitoramento dos Dados de Previsões

O monitoramento do MAVEN realiza também a captura de dados de grades de previsão de chuvas, bastando apenas para isto, o cadastramento das referidas grades no sistema. Esses dados são apresentados conforme a disposição das

grades na Figura 32. Os pontos igualmente espaçados são os pontos da área de recorte correspondente a uma grade de previsão.

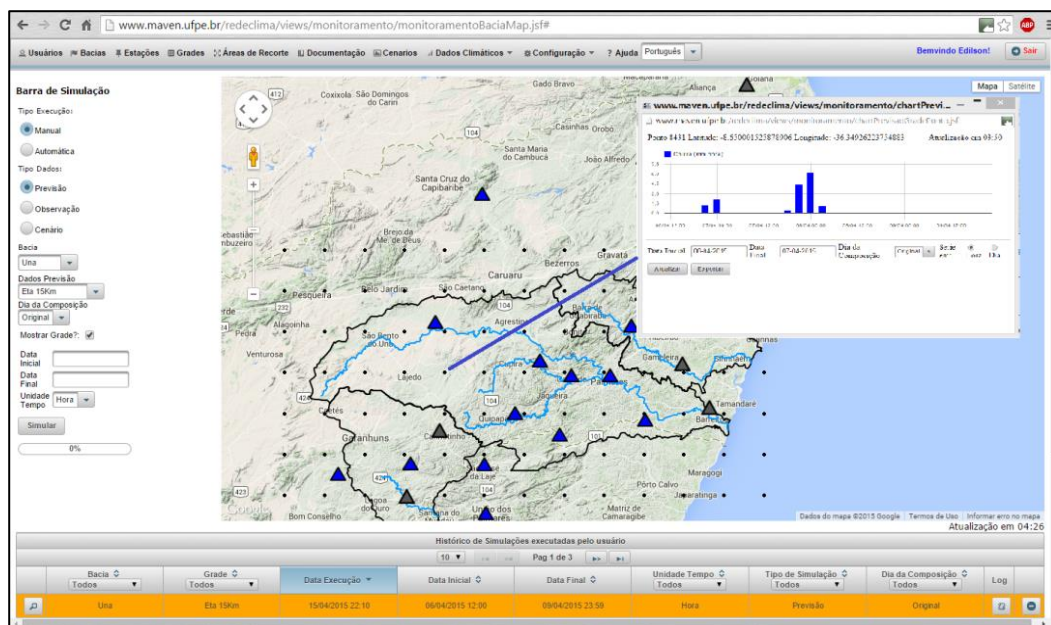


Figura 32: Tela de monitoramento do MAVEN, janela de consulta de dados de previsão de chuvas.

Pode-se também visualizar graficamente (Figura 33) os dados gerados pelos modelos de previsão, escolhendo pontos da grade mostrada sobre a bacia.

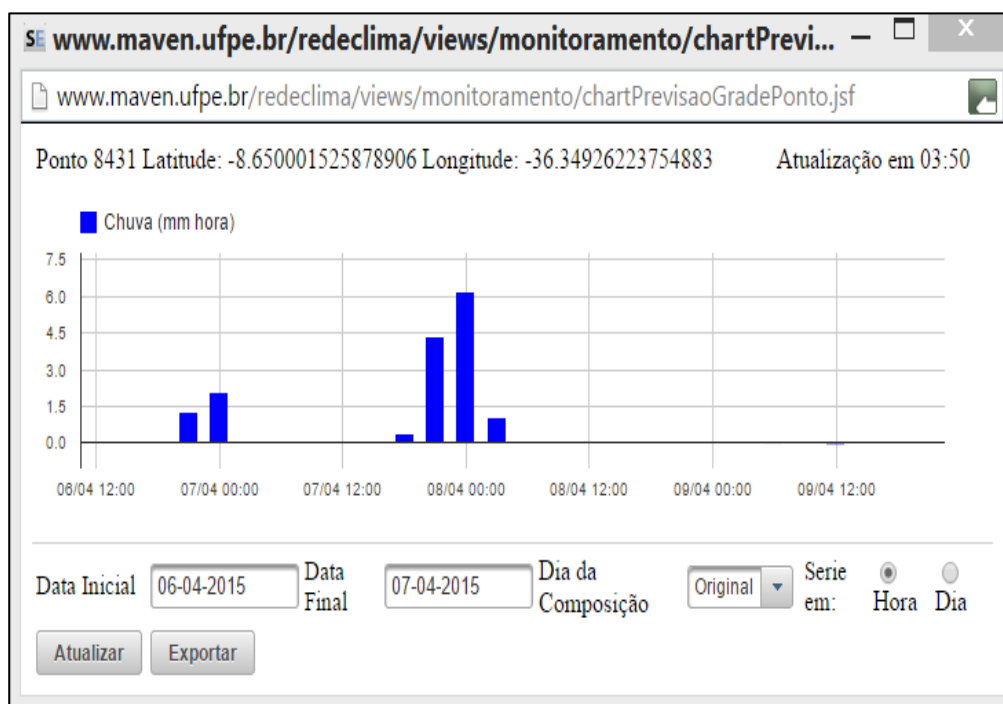


Figura 33: Exemplo dos dados de previsão para um ponto da grade.

4.4.5 Execução de Modelos de Simulação Integrados

A tela de monitoramento, mostrada anteriormente, também é responsável pelos procedimentos de simulação e análises de condicionantes dos eventos estudados. Isto é, a partir dela podem ser escolhidos os parâmetros de simulação, tais como: tipo (automática/manual) da simulação; tipo dos dados (previsão/observação/cenário) a serem usados na simulação; bacia a ser simulada; fonte de dados de previsão (caso esse seja o tipo do dado escolhido); cenário a ser simulado (caso esse seja o tipo de dado escolhido); data inicial e final dos dados de chuvas a serem usados na simulação; passo de tempo (horas/dias) usado na simulação.

Para realizar a execução dos modelos de simulação HEC-HMS e HEC-RAS, primeiro são obtidos os dados de entrada do modelo de simulação hidrológica, que são basicamente a distribuição de precipitação, podendo ser esta informação de dados medidos pelas PCDs, grades de dados estimados por imagens de satélites, dados de previsões meteorológicas ou cenários hipotéticos. No caso dos dados estimados e previstos, esses correspondem a um subconjunto de pontos associados à bacia de estudo, esses pontos são definidos pelo especialista.

A comunicação entre os processos de execução dos simuladores HEC-HMS e HEC-RAS é feita por meio de arquivos com formato DSS e arquivos de controle dos modelos, os quais são alterados de acordo com os parâmetros de simulação. O resultado da simulação HEC-HMS representa a variação de níveis de água e de vazões em uma bacia.

Com a conexão dos dados gerados pelos modelos de previsão ao modelo hidrológico é possível verificar o quanto uma determinada previsão de tempo vai influenciar no estado geral das vazões e níveis dos rios da bacia. Isto é possível porque o mecanismo integrador realiza as operações de configuração dos parâmetros dos modelos de forma síncrona, apresentado o progresso da operação em mensagens ao usuário.

Desta maneira, o MAVEN realiza a integração de procedimentos de modelagem, integração de dados de várias fontes e vários formatos e, a integração de atores e instituições envolvidas no trato público, no que se refere ao enfrentamento de situações de enchentes.

5 Resultados Obtidos

5.1 Estado Operacional do Desenvolvimento do Sistema

O MAVEN – Monitor Avançado de Enchentes está em funcionamento constante desde abril de 2013. O sistema tem buscado dados gerados pelas PCDs desde março de 2012, sendo que, ao longo dos anos, os procedimentos de utilização dos dados vêm se aprimorando. O desenvolvimento do sistema foi feito de acordo com as pesquisas envolvidas na determinação dos formatos dos dados dos três domínios de conhecimento e em suas conexões, isso gerou um conjunto de interfaces necessárias nos procedimentos requeridos à utilização integrada dos modelos hidrometeorológicos.

A maioria das funções de monitoramento já foi implementada, com acesso automático e contínuo aos dados hidroclimáticos, disponibilizados pela ANA e pelo INPE/CPTEC, bem como dos dados de previsões de chuvas disponibilizados no FTP do CPTEC. O sistema está instalado em um servidor HP Proliant de 16 núcleos. Foram desenvolvidas as estruturas de interface entre os dados monitorados, dados de previsões e os modelos, estando esta parte em fase de ajustes. Como o MAVEN se constitui em uma plataforma de experimentação de simulações, o sistema está fornecendo um conjunto de informações de execução dos modelos, para que o usuário pesquisador, especialista ou gestor, possa ter uma ideia clara a respeito da sua operação no sistema. Este aspecto é importante, visto que várias vezes a composição de chuvas na bacia, no período escolhido, não é suficiente para que o modelo hidrológico gere vazões adequadas ao funcionamento do modelo hidrológico. Neste caso o processo de simulação não gera resultados.

As simulações podem ser feitas de forma automática e manual, com três tipos de dados de entrada, dando a oportunidade para que o usuário possa estudar, com base nos dados de entrada e em suas saídas, o comportamento da bacia.

No momento estão sendo implementadas as funções de acesso aos dados de estimativas de satélites e esses dados serão utilizados futuramente como elemento de distribuição dos valores de chuva por toda a bacia, o que vai tornar as simulações mais eficientes.

5.2 Modelagem Hidrológica e Hidrodinâmica da Bacia do Rio Una

As tarefas de modelagem hidrológica e hidrodinâmica da bacia do rio Una envolveram toda a equipe do grupo de modelagem hidrológica da UFPE, sendo que, apesar de terem suas tarefas divididas, nos momentos de ajustes dos modelos a equipe de trabalho interagiu entre seus componentes, com trocas de informações e recomendações sobre os experimentos e procedimentos mais adequados.

5.2.1 Modelo Hidrológico

A estruturação do HEC-HMS para a bacia do rio Una foi feita em trabalhos anteriores do grupo (Neto et al., 2015), onde se efetuou a construção e calibração do modelo com base no método SMA (Soil Moisture Accounting) para o balanço hídrico na bacia, o hidrograma unitário SCS para a propagação na superfície, o método Muskingum-Cunge para a propagação nos rios e o método do reservatório linear para a propagação de água subterrânea. Nesse trabalho, a bacia do Una foi discretizada em 51 sub-bacias, conforme a Figura 34.

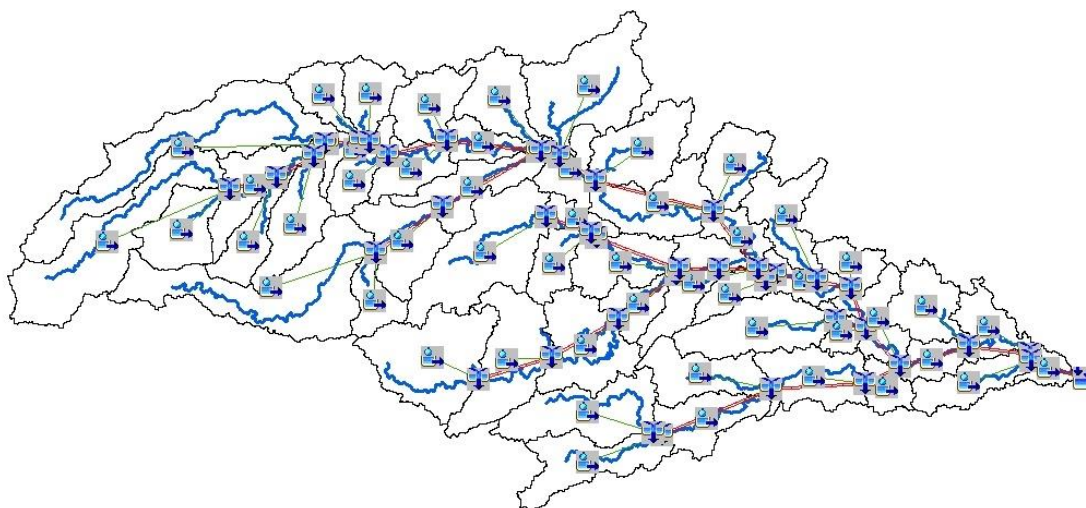


Figura 34: Discretização da bacia do Una no modelo HEC-HMS, (Neto et al., 2014).

O modelo hidrológico construído e calibrado para a bacia do rio Una foi integrado aos dados observados, previstos e criados (cenários), provendo a geração de vazões nas sub-bacias e trechos, utilizadas pelo modelo hidrodinâmico, segundo a Tabela 6.

Tabela 6: Elementos do acoplamento entre os modelos HEC-HMS e HEC-RAS

Rio	Trecho	Condição de Contorno (RAS)	Seção 1	Seção 2	Elemento HMS
Una	EstCapiv-Palmar	Flow Hydrograph	156403.3		Capivara
Una	EstCapiv-Palmar	Lateral Inflow Hydrograph	109861.1		W960
Una	EstCapiv-Palmar	Lateral Inflow Hydrograph	143186.2		W1000
Una	EstCapiv-Palmar	Lateral Inflow Hydrograph	150842.1		W790
Una	EstCapiv-Palmar	Uniform Lateral Inflow Hydrograph	110873.9	89081.6	W1070
Una	EstCapiv-Palmar	Uniform Lateral Inflow Hydrograph	142101.1	110873.9	W1050
Una	EstCapiv-Palmar	Uniform Lateral Inflow Hydrograph	154103.1	152961	W1030
Panelas	ResGatos-Catend	Flow Hydrograph	38946.86		W2250
Panelas	ResGatos-Catend	Lateral Inflow Hydrograph	25390.16		W1100
Panelas	ResGatos-Catend	Uniform Lateral Inflow Hydrograph	37863.37	407.0801	W1120
Piranji	ResIgara-Catend	Flow Hydrograph	67992.5		R590
Piranji	ResIgara-Catend	Uniform Lateral Inflow Hydrograph	36876.69	18181.81	W1500
Piranji	ResIgara-Catend	Uniform Lateral Inflow Hydrograph	66923.37	36876.69	W1250
Piranji	Catend-Palmar	Uniform Lateral Inflow Hydrograph	17750.06	1822.507	W1490
Una	Palmar-Barreir	Lateral Inflow Hydrograph	10550.48		W1340
Una	Palmar-Barreir	Lateral Inflow Hydrograph	28857.64		W1290
Una	Palmar-Barreir	Lateral Inflow Hydrograph	39648.14		W1590
Una	Palmar-Barreir	Lateral Inflow Hydrograph	41644.26		R650
Una	Palmar-Barreir	Lateral Inflow Hydrograph	51447.44		R540
Una	Palmar-Barreir	Lateral Inflow Hydrograph	52484.48		W1540
Una	Palmar-Barreir	Lateral Inflow Hydrograph	61839.95		W1230
Una	Palmar-Barreir	Lateral Inflow Hydrograph	74295.85		W1110
Una	Palmar-Barreir	Lateral Inflow Hydrograph	85278.24		W1210
Una	Palmar-Barreir	Uniform Lateral Inflow Hydrograph	12074.81	509.9336	W1690
Una	Palmar-Barreir	Uniform Lateral Inflow Hydrograph	27824.85	11972.29	W1700
Una	Palmar-Barreir	Uniform Lateral Inflow Hydrograph	40650.48	28857.64	W1320
Una	Palmar-Barreir	Uniform Lateral Inflow Hydrograph	60798.21	41644.26	W1240
Una	Palmar-Barreir	Uniform Lateral Inflow Hydrograph	83167.35	61839.95	W1220
Una	Palmar-Barreir	Stage Hydrograph	5.1533		Mareograma

5.2.2 Modelo Hidrodinâmico

O modelo hidrodinâmico da bacia do rio Una, usado como modelo piloto pelo sistema, foi igualmente estruturado pela equipe da UFPE e publicado em Dantas et al. (2014) e Neto et al. (2015). As principais tarefas do autor desta tese foram: elaborar a geometria do modelo e; participação nas tarefas de calibração. As tarefas de parametrização, calibragem e validação do modelo hidrodinâmico se encontram

em Dantas (2012) e Dantas et al. (2014). A figura 35 mostra a janela principal da ferramenta de geoprocessamento com os elementos inicialmente criados para a geometria do modelo hidrodinâmico do rio Una, no processo de identificação das margens.



Figura 35: Janela mostrando elementos da simulação.

A Figura 36 mostra o trecho do rio (Palmares) com as seções definidas entre as partes mais altas do canal. As seções foram criadas com base no critério de 100 metros de distância entre si para áreas urbanas e 1000 metros em áreas rurais.

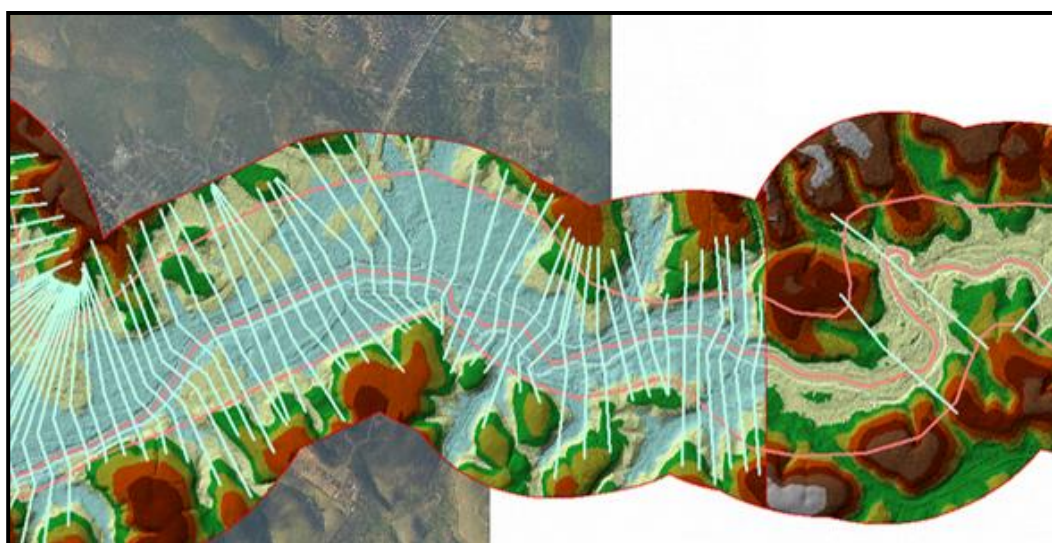


Figura 36: Janela do ArcMap com modelo TIN e seções.

A Figura 37 mostra o conjunto de total de camadas criadas para a modelagem dos rios Una (principal, na figura), Piranji (afluente do Una) e Panelas

(afluente do Piranji). Nesse modelo foram criadas camadas com 5 trechos de rio, margens para todos os trechos, linhas de percurso e 456 seções transversais.

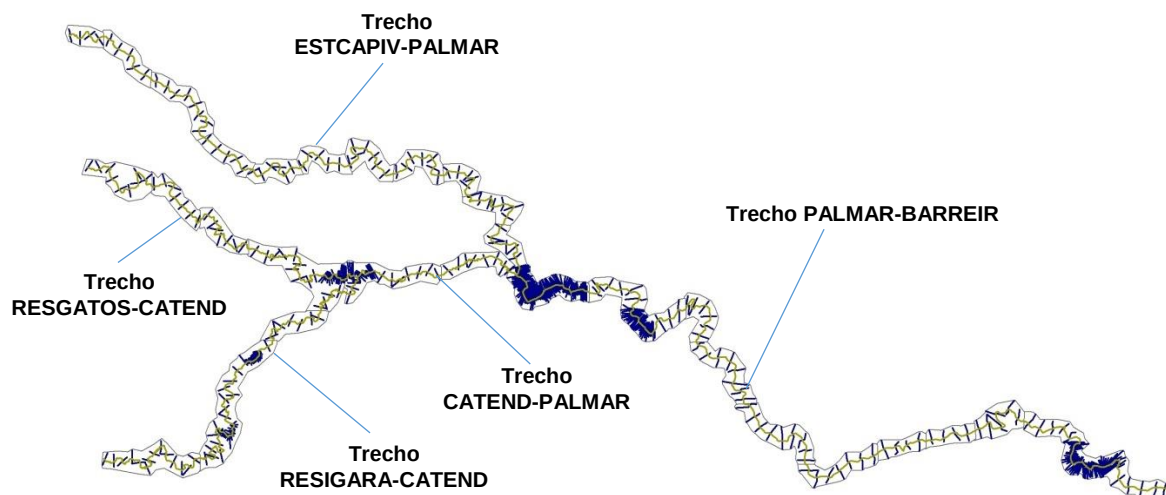


Figura 37: Modelo dos rios Una, Piranji e Panelas, com todas as seções e trechos.

Com todas as seções e demais objetos criados com o uso de ferramentas de geoprocessamento, o conjunto de objetos é transformado em arquivos de geometria do HEC-RAS, para importação pelo modelo. Depois de carregada a geometria, foram efetuados ajustes de fundo de rio e dos valores da constante de Manning (Figura 38). Esses parâmetros influenciam fortemente os resultados da simulação e, por conseguinte, na validade de seus resultados.

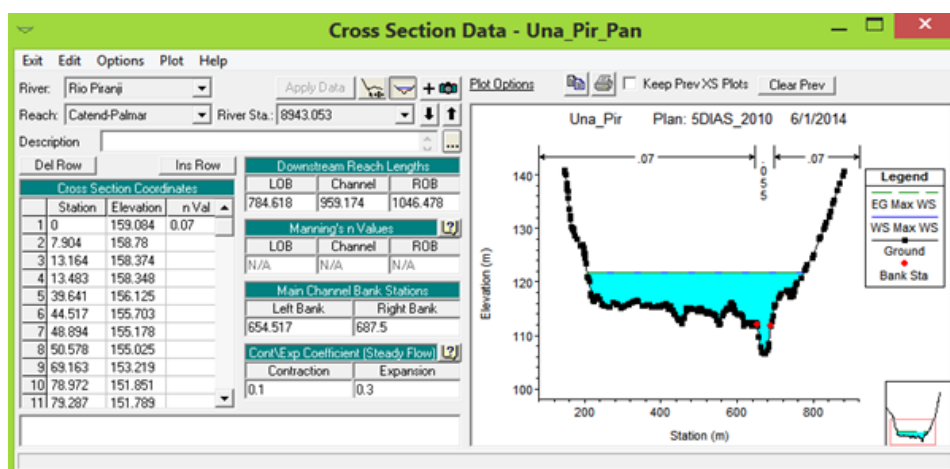


Figura 38: Janela do HEC-RAS, geometria do modelo e perfil da seção.

A princípio, os valores de Manning utilizados foram 0.055 para a calha do rio e 0.07 para as margens da calha. Os fundos do rio foram construídos utilizando-se

uma forma trapezoidal, a partir de suas margens, com profundidade variando de 2 a 8 metros, dependendo da ortoimagem do trecho, onde se localiza a seção. Como condições de contorno foram definidas vazões afluentes na seção de montante de cada trecho simulado e como entradas foram definidas as vazões de contribuição lateral ao longo de cada rio. A extremidade do sistema hídrico simulado é a foz do Una no Atlântico e a condição de jusante usada foi o mareograma local.

As condições iniciais de vazões para os trechos do modelo hidrodinâmico são definidas pelas vazões observadas em suas estações de referência, na data/hora do início das simulações. Caso alguma estação de referência apresente um valor menor que um valor “Mínimo”, para geração de vazão para o modelo hidrodinâmico, ou não tenha o dado de vazão disponível, a condição inicial de vazão do trecho, para a qual a estação é referência, será definida segundo a Tabela 7.

Tabela 7: Valores de vazão mínima, para efeitos de simulação.

Trecho	Estação de Referência	Vazão Mínima (m³/s)
RESGATOS-CATEND	Catende	30
RESIGARA-CATEND	Catende	30
CATEND-PALMAR	Palmares	80
ESTCAPIV-PALMAR	Palmares	80
PALMAR-BARREIR	Palmares	80

Um detalhe importante das simulações, que diz respeito às condições iniciais de vazões do modelo hidrodinâmico, mostra que é preciso atribuir um período variável de “aquecimento” do modelo, no qual o modelo é iniciado com vazões mínimas, se auto-ajustando posteriormente (em algumas horas) às vazões geradas pelo modelo hidrodinâmico. Isto é indicado, nos gráficos, por uma área cinza.

5.3 Simulações Executadas com o Sistema

Nesta parte são mostradas algumas simulações feitas no MAVEN, com apresentação dos dados de entrada e saída dos modelos. Os dados básicos e resultados destas simulações foram divididas em: (1) simulações com dados observados; (2) simulações com dados de previsões; (3) simulações com dados de cenários criados. A metodologia usada para avaliar o funcionamento da integração dos modelos hidrometeorológicos no MAVEN consiste em comparar a variação dos valores de chuva, observados, previstos ou criados como cenários na bacia, através

da divisão das estações e pontos de dados das grades de previsão nas partes Alta, Média e Baixa da bacia. São calculados então valores médios entre as estações ou os pontos de cada parte da bacia. Os valores simulados são verificados em seções do modelo hidrodinâmico, escolhidas em locais (Figura 39) que possam ser associados às variações de nível provocadas pelas chuvas nas três áreas da bacia.

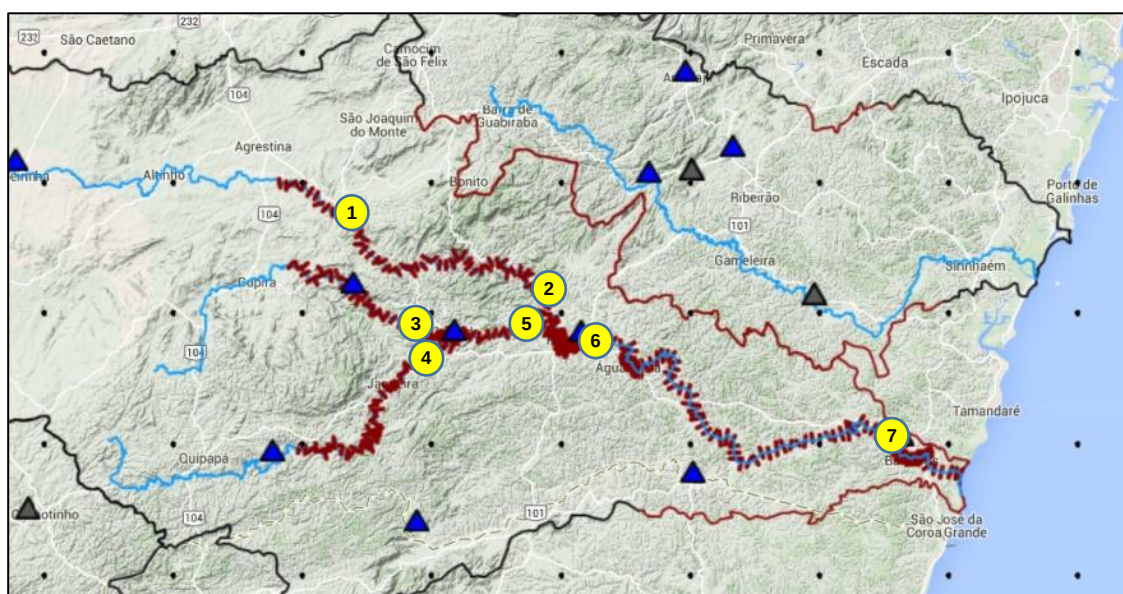


Figura 39: Localização e numeração das seções do modelo HEC-RAS usadas para avaliação dos resultados das simulações.

A Tabela 8 apresenta as seções do modelo que representam o comportamento dos trechos da bacia.

Tabela 8: Seções usadas para avaliação dos resultados da simulação

Num	Trechos	Seções	Parte Associada na Bacia
1	ESTCAPIV-PALMAR	145290	Alta
2	ESTCAPIV-PALMAR	99228	Alta e Média
3	RESGATOS-CATEND	10245	Média
4	RESIGARA-CATEND	26047	Média
5	CATEND-PALMAR	6039	Média
6	PALMAR-BARREIR	81532	Alta e Média
7	PALMAR-BARREIR	13960	Alta, Media e Baixa

5.3.1 Simulações com Dados Observados

As simulações com dados observados utilizam as oito estações automáticas (PCDs) que estão operando na bacia, às quais são mostradas na Figura 40. Estas simulações servem para o usuário verificar o funcionamento do sistema, com relação aos valores observados de nível, nas estações da bacia.

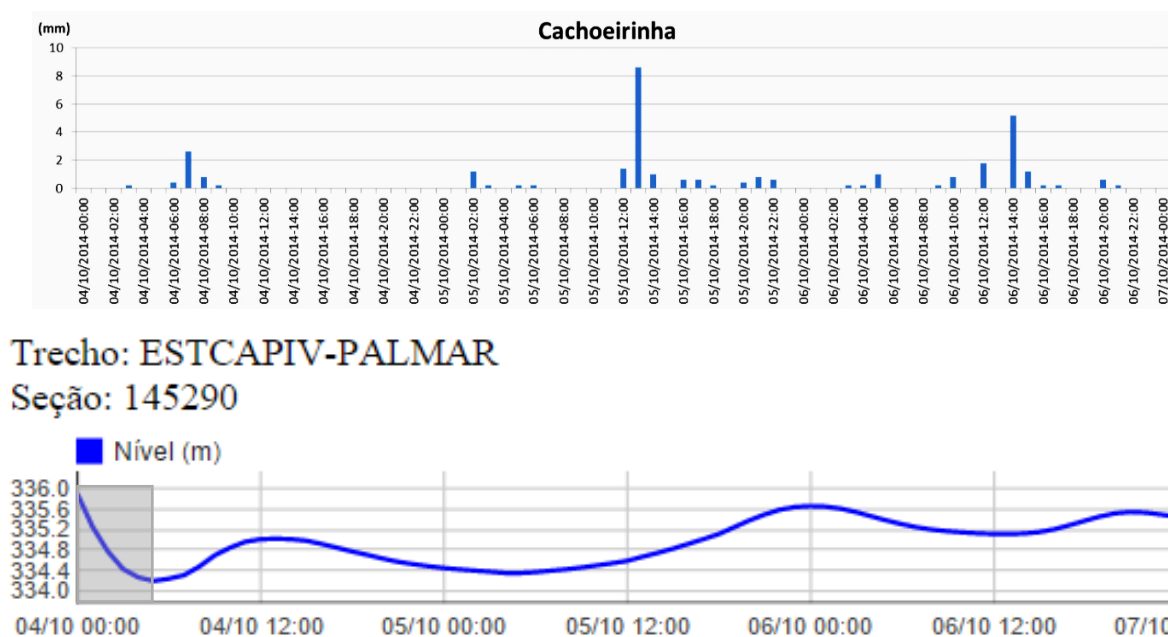


Figura 41: Variação das chuvas na parte Alta (Cachoeirinha) da bacia e variação de nível na seção associada a esta parte da bacia.

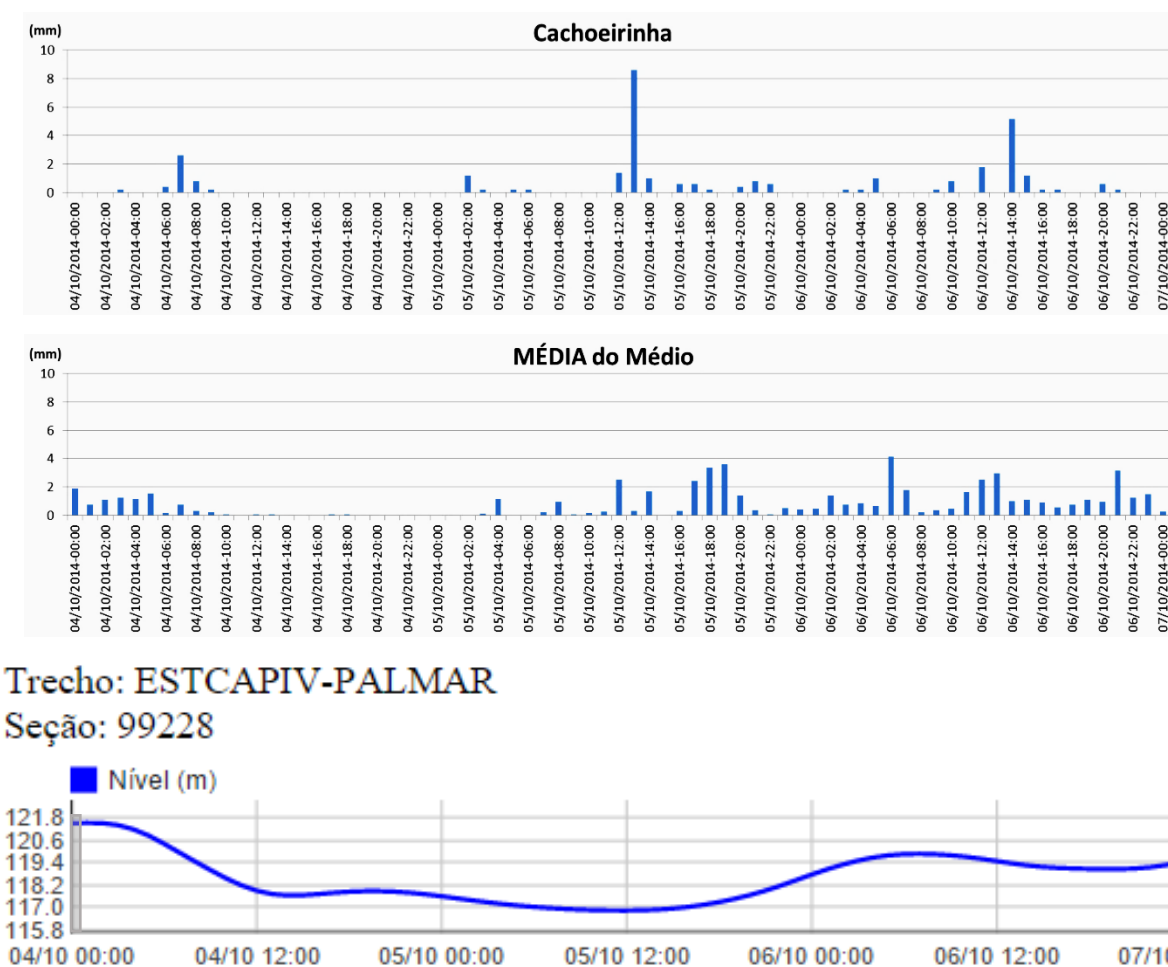
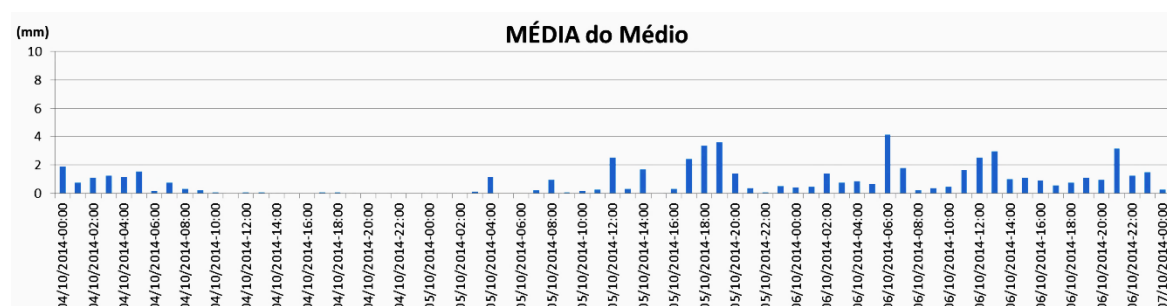
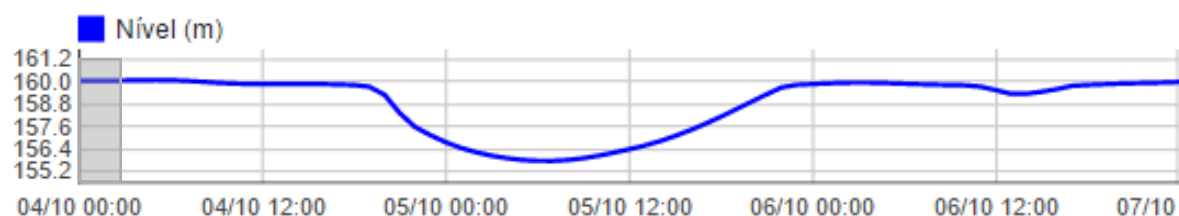


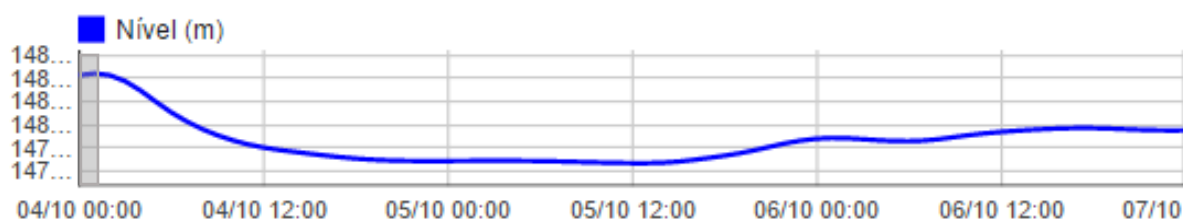
Figura 42: Variação das chuvas na parte Alta (Cachoeirinha) e Média da bacia e variação de nível na seção associada a estas partes da bacia.



Trecho: RESGATOS-CATEND
Seção: 10245



Trecho: RESIGARA-CATEND
Seção: 26047



Trecho: CATEND-PALMAR
Seção: 6039

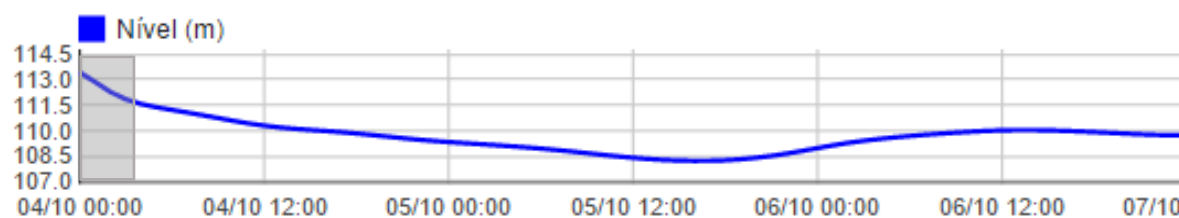
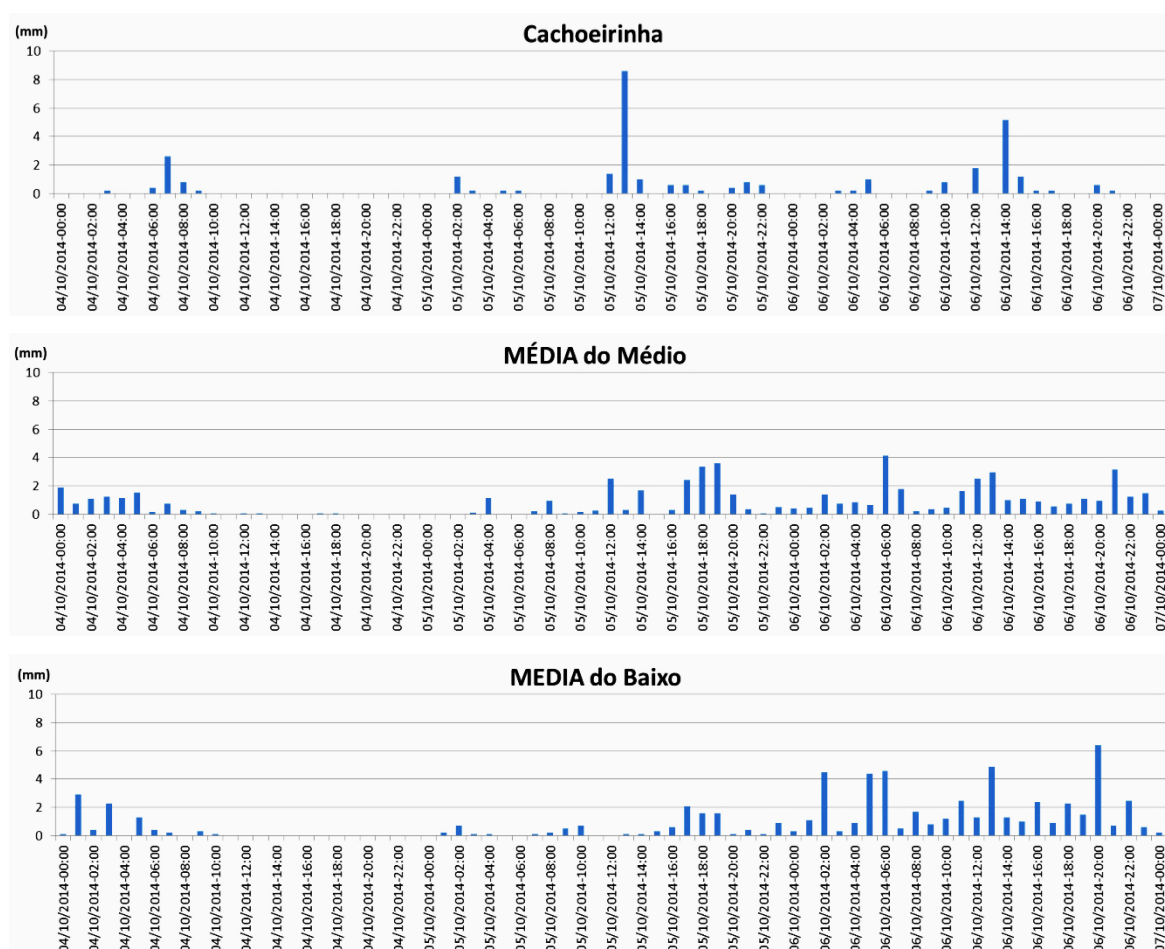
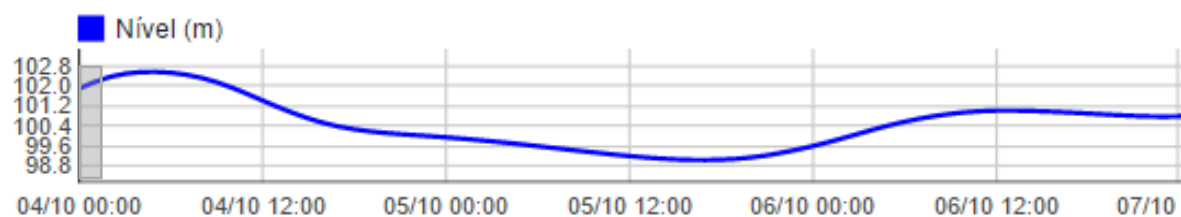


Figura 43: Variação das chuvas na parte Média da bacia e variação de nível nas seções associadas a esta parte da bacia.



Trecho: PALMAR-BARREIR
Seção: 81532



Trecho: PALMAR-BARREIR
Seção: 13960

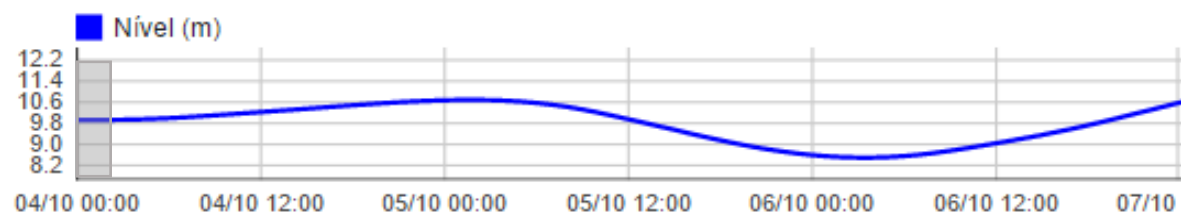


Figura 44: Variação das chuvas nas partes Alta, Média e Baixa da bacia e variação de nível nas seções associadas a estas partes da bacia.

5.3.1.2 Simulação 2

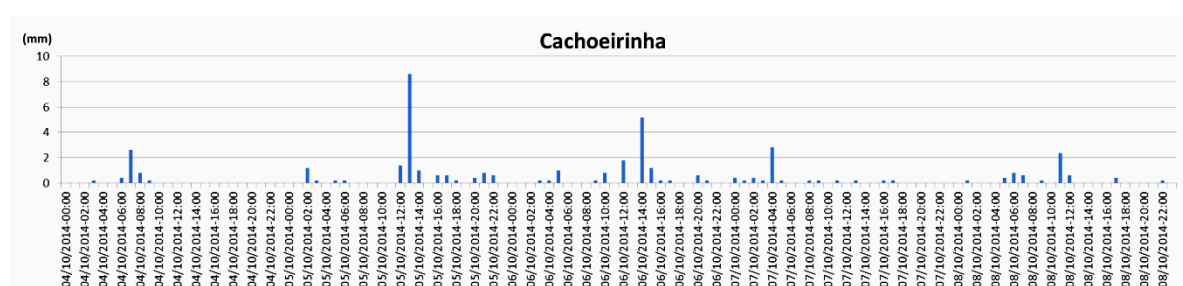
Tipo: Manual

Modelo Meteorológico: Conjunto de Estações Automáticas

Período: 04/10/2014 a 08/10/2014

Unidade de Tempo: Hora (1 Hora)

As simulações manuais com dados observados utilizam os valores de chuva medidos nas estações PCDs.



Trecho: ESTCAPIV-PALMAR

Seção: 145290

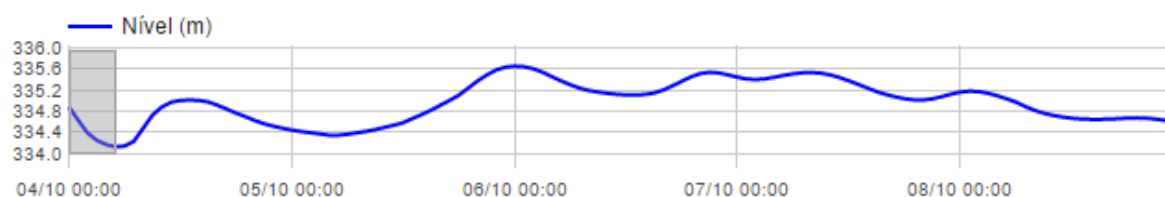
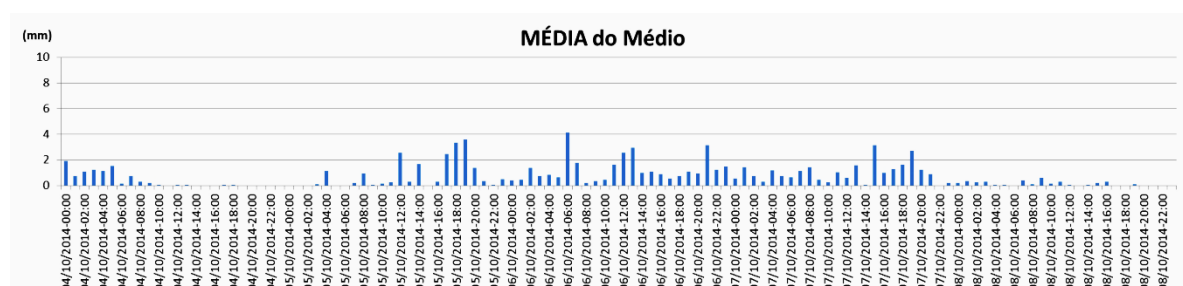


Figura 45: Variação das chuvas na parte Alta (Cachoeirinha) da bacia e variação de nível na seção associada a esta parte da bacia.



Trecho: ESTCAPIV-PALMAR

Seção: 99228

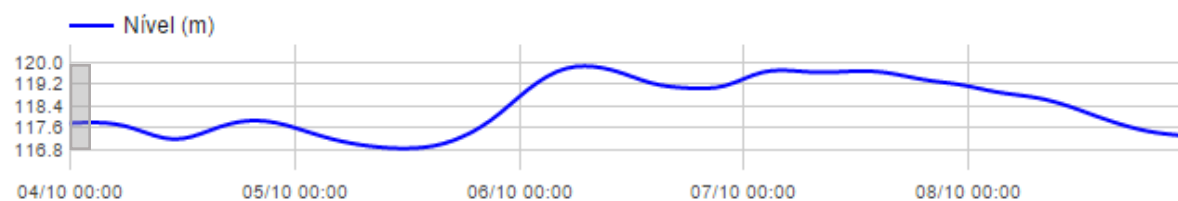
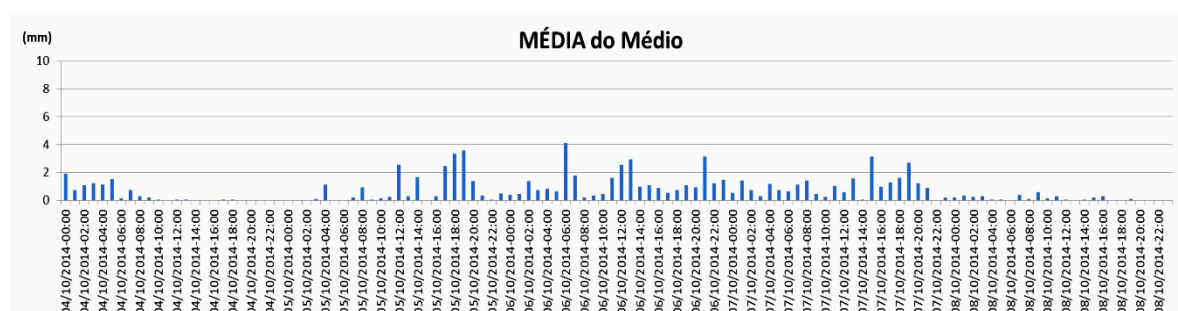
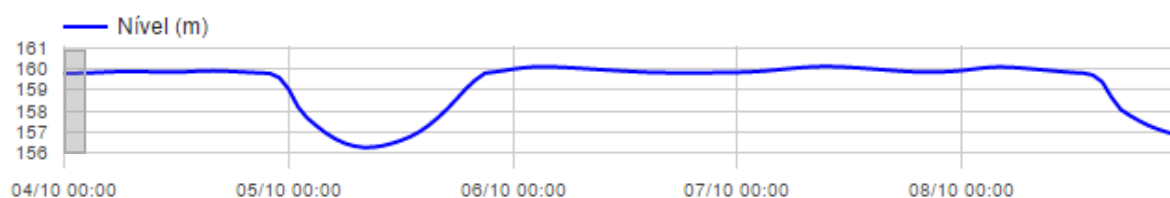


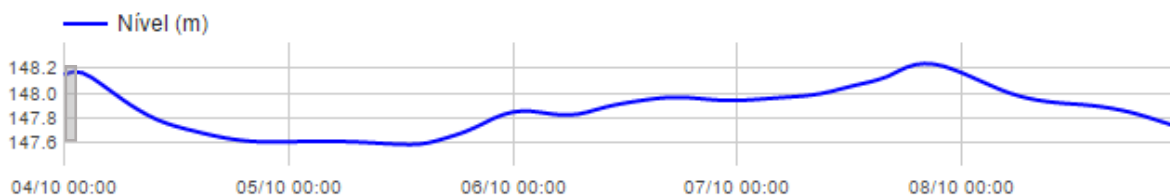
Figura 46: Variação das chuvas na parte Média da bacia e variação de nível na seção associada às partes Alta (Cachoeirinha) e Média da bacia.



Trecho: RESGATOS-CATEND
Seção: 10245



Trecho: RESIGARA-CATEND
Seção: 26047



Trecho: CATEND-PALMAR
Seção: 6039

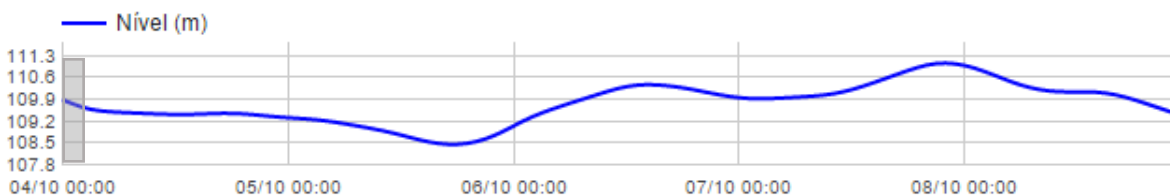
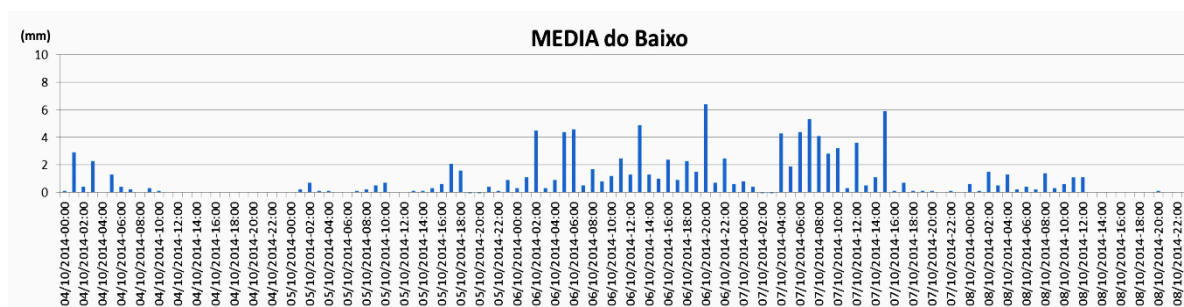
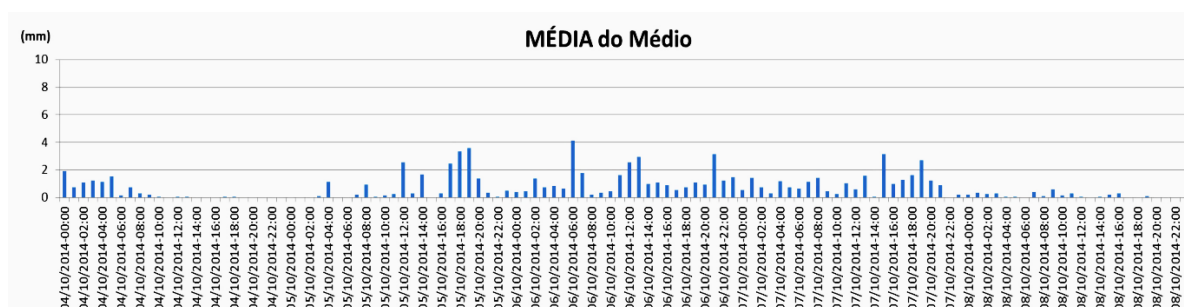
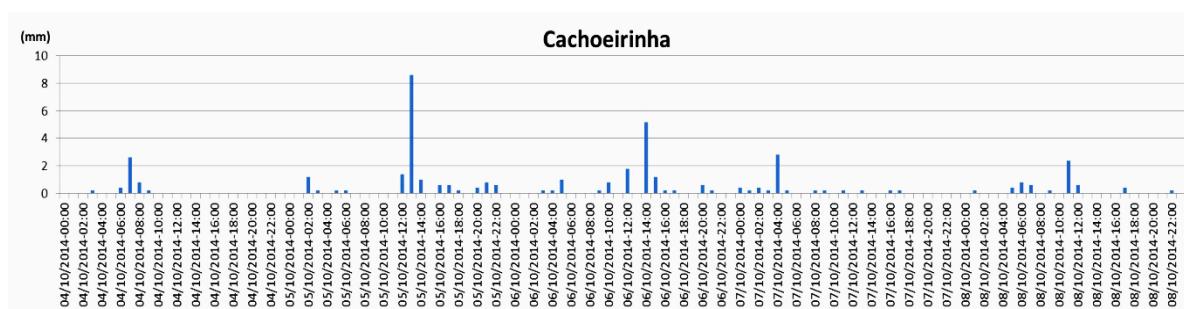
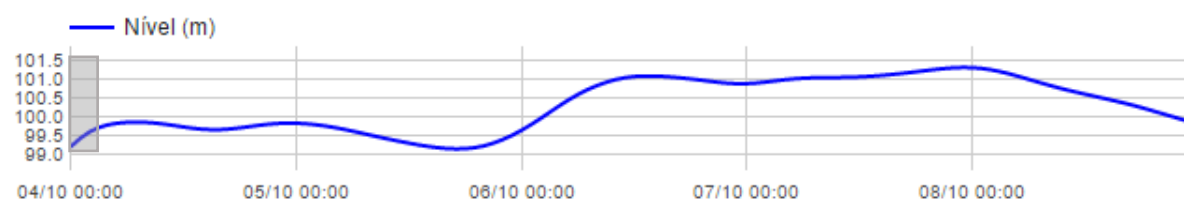


Figura 47: Variação das chuvas na parte Média da bacia e variação de nível nas seções associadas a esta parte da bacia.



Trecho: PALMAR-BARREIR
Seção: 81532



Trecho: PALMAR-BARREIR
Seção: 13960

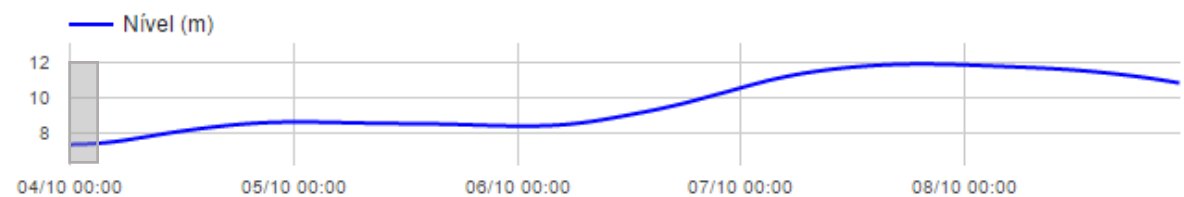


Figura 48: Variação das chuvas nas partes Alta, Média e Baixa da bacia e variação de nível nas seções associadas a estas partes da bacia.

5.3.2 Simulações com Dados de Previsões

Nas simulações com dados de previsões são utilizados os pontos das grades de dados de previsão como modelo meteorológico para a simulação chuva-vazão e o modelo HEC-HMS identifica os pontos que pertencem à bacia. No estudo do efeito das chuvas no modelo são utilizadas médias dos agrupamentos de pontos, organizados por área da bacia.

5.3.2.1 Simulação 3

Tipo: Manual

Modelo Meteorológico: Pontos do Modelo ETA, Rodada 12h.

Período: 05/10/2014 a 08/10/2014

Unidade de Tempo: Horas (3 horas)

Na Figura 49 é mostrada a grade de dados de previsão do ETA (para a bacia do Una), o conjunto de seções do modelo HEC-RAS e a divisão dos pontos da grade na bacia em: Alto, Médio e Baixo curso da bacia.

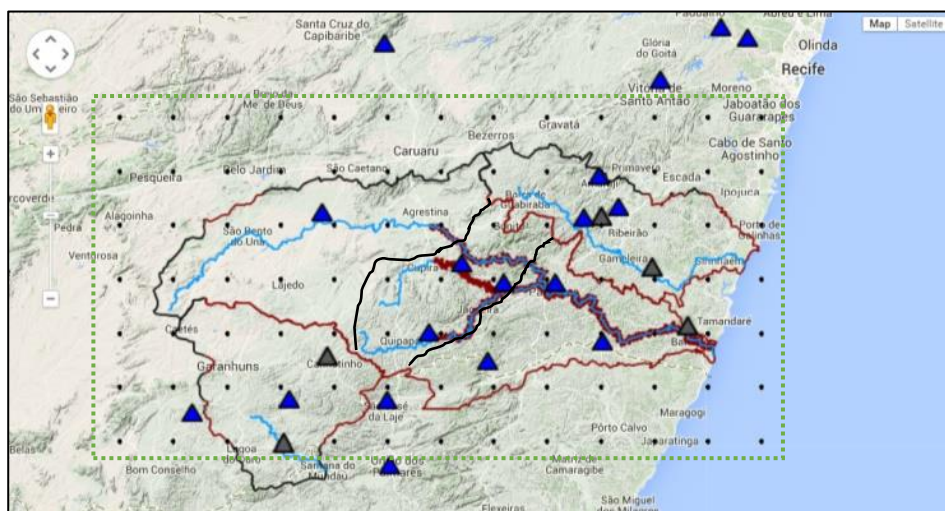


Figura 49: Janela com elementos da simulação e pontos de dados de previsão do ETA.

Na Figura 50 e 51 são mostrados os valores médios dos dados de chuva prevista do modelo ETA para as áreas Alta e Média da bacia, bem como os resultados nas seções associadas a estas partes da bacia.

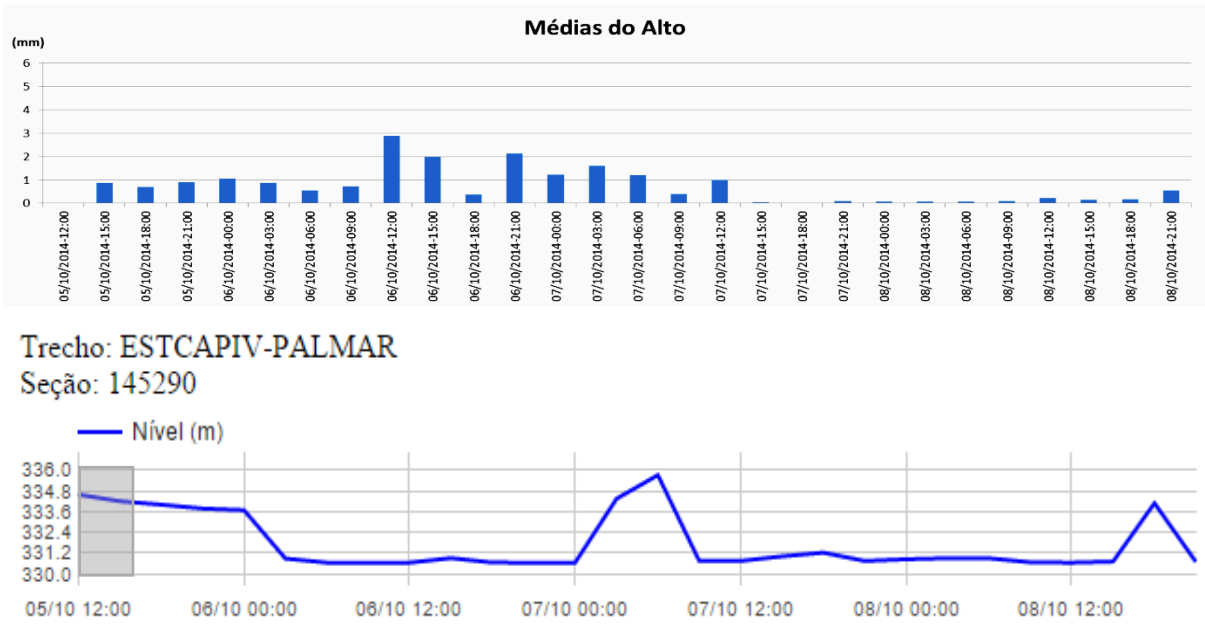


Figura 50: Previsão das chuvas (médias dos pontos) na parte Alta da bacia e variação de nível na seção associada a esta parte da bacia.

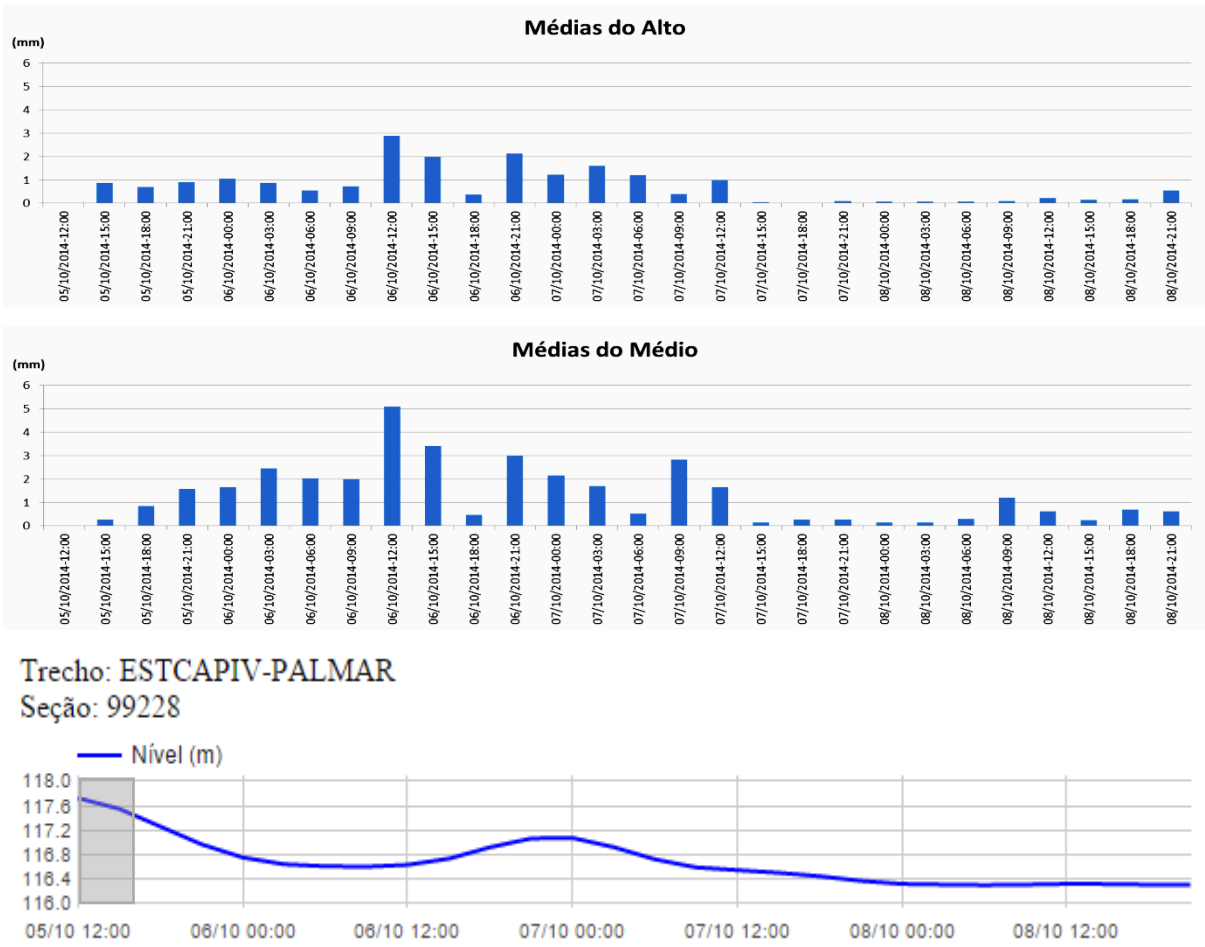
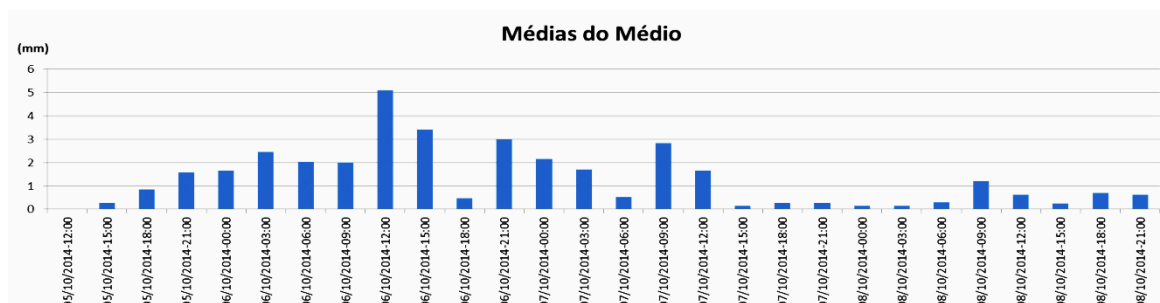
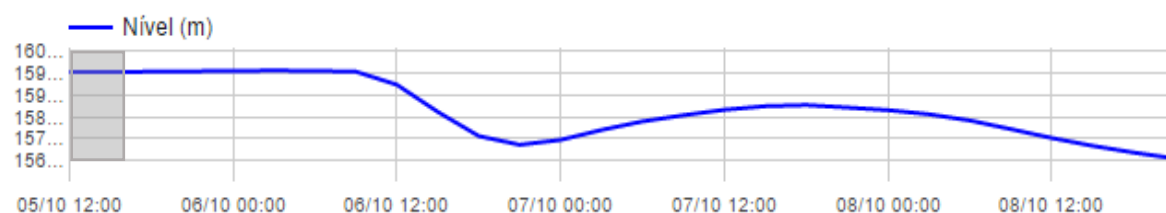


Figura 51: Previsão das chuvas (médias dos pontos) nas partes Alta e Média da bacia e variação de nível na seção associada a estas partes da bacia.



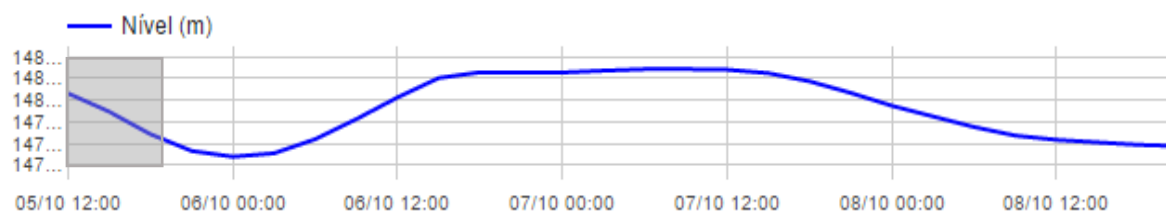
Trecho: RESGATOS-CATEND

Seção: 10245



Trecho: RESIGARA-CATEND

Seção: 26047



Trecho: CATEND-PALMAR

Seção: 6039

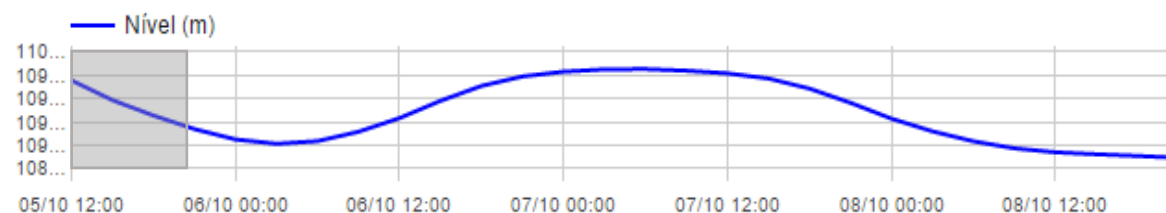
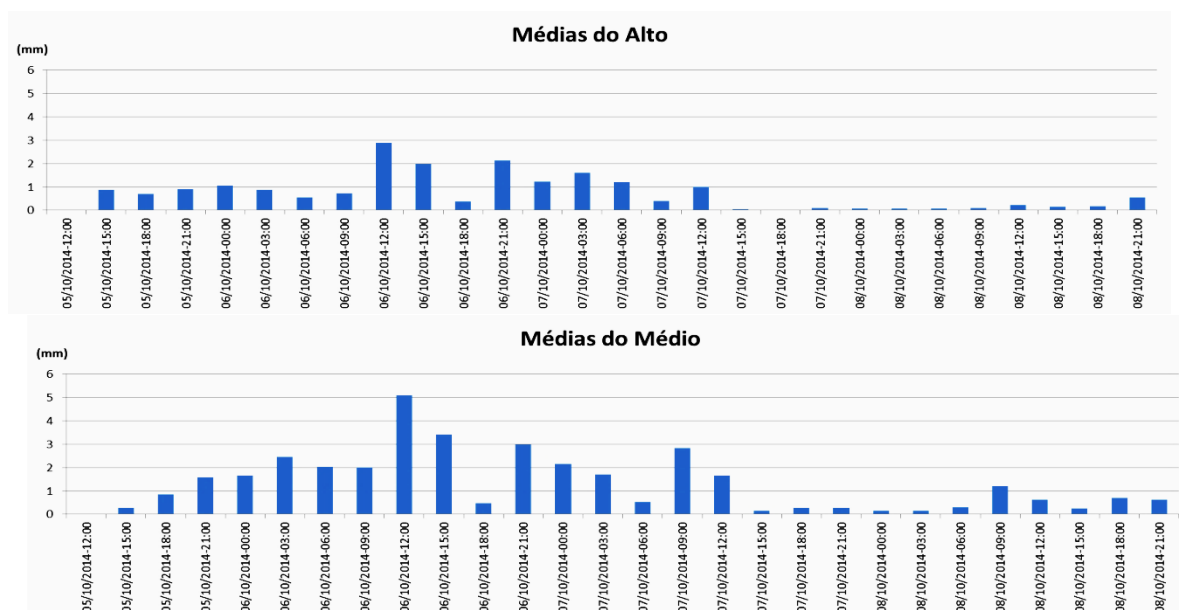


Figura 52: Variação das chuvas (médias dos pontos) na parte Média da bacia e variação de nível nas seções associadas a esta parte da bacia.



Trecho: PALMAR-BARREIR
Seção: 81532

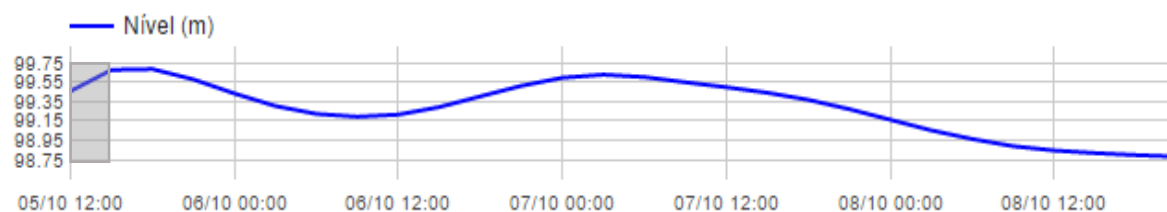
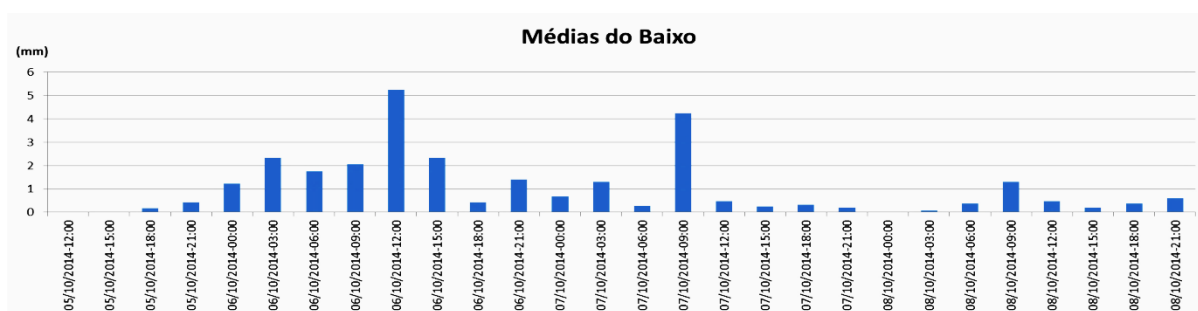


Figura 53: Variação das chuvas (médias dos pontos) nas partes Alta e Média da bacia e variação de nível na seção associada a estas partes da bacia.



Trecho: PALMAR-BARREIR
Seção: 13960

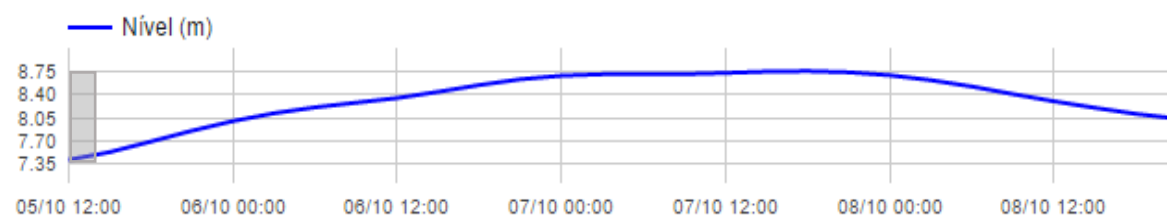


Figura 54: Variação das chuvas (médias dos pontos) nas partes Baixa da bacia e variação de nível na seção associada às partes Alta, Média e Baixa da bacia.

5.3.3 Simulações com Dados de Cenários

5.3.3.1 Simulação 4

Tipo: Manual

Modelo Meteorológico: Cenário de Chuvas em Conjunto de Estações Automáticas

Período: 04/10/2014 a 07/10/2014

Unidade de Tempo: Horas (1 hora)

As simulações com dados de cenários propiciam a experimentação de suposições de composição de chuvas na bacia. Essas simulações utilizam o conjunto de estações PCDs, atribuindo a elas os valores de chuva constantes nos cenários criados. Nas Figuras 53 a 56 são apresentados os dados e os resultados da simulação de um cenário correspondente a um evento de enchente criado em Dantas (2012), associado à situação hidrometeorológica estudada para a enchente de 2010, na Mata Sul de Pernambuco.

Importante salientar que, como o sistema busca as condições iniciais de chuva nos dados observados nas PCDs na data inicial de simulação, o período de simulação teve que ser alterado, de 17/06/2010 a 20/06/2010 para 04/10/2014 a 07/10/2014, pois o sistema começou a capturar os dados das estações em outubro de 2013.

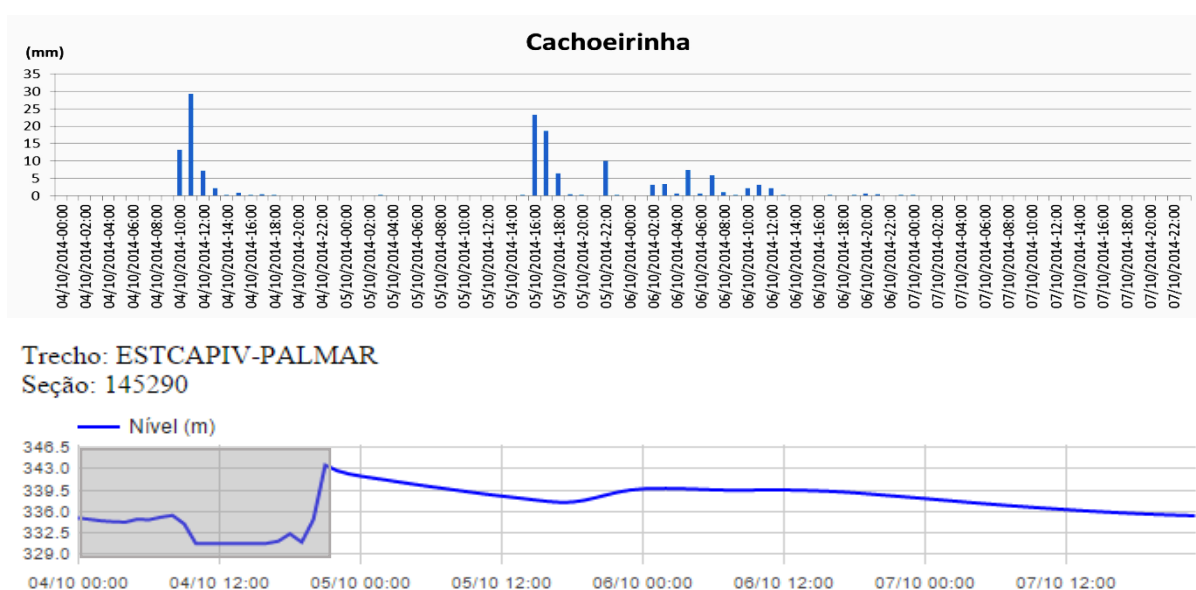
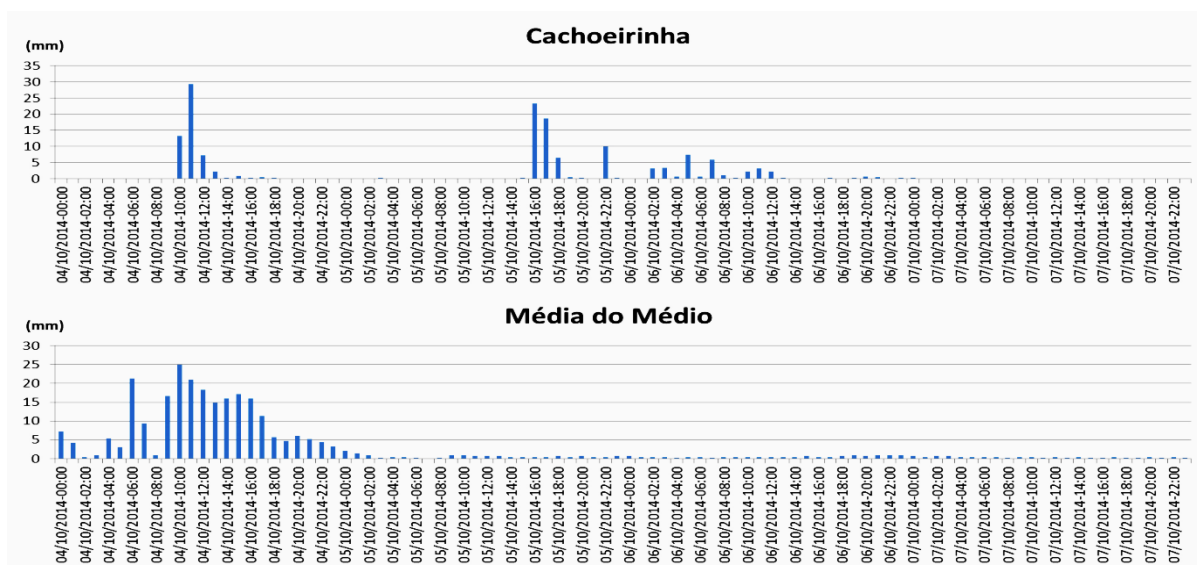


Figura 55: Variação das chuvas na parte Alta (Cachoeirinha) da bacia e variação de nível na seção associada a esta parte da bacia.



Trecho: ESTCAPIV-PALMAR
Seção: 99228

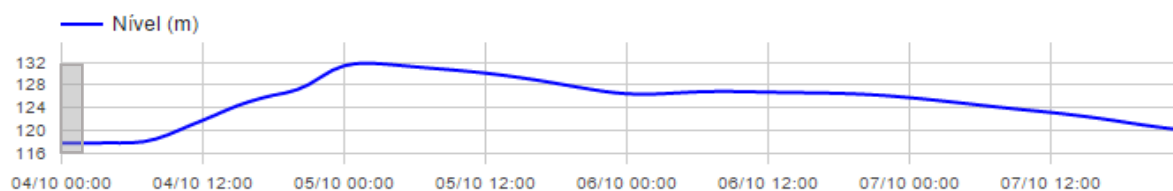
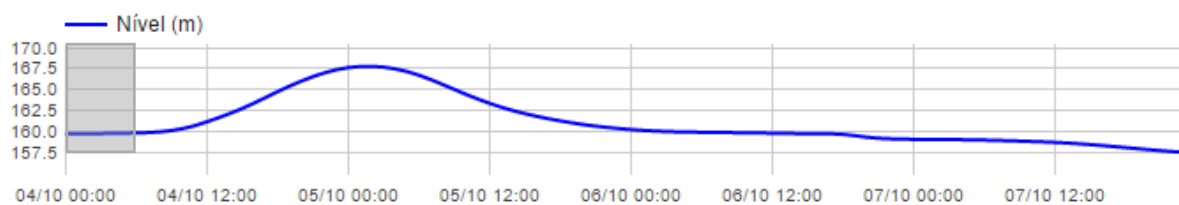
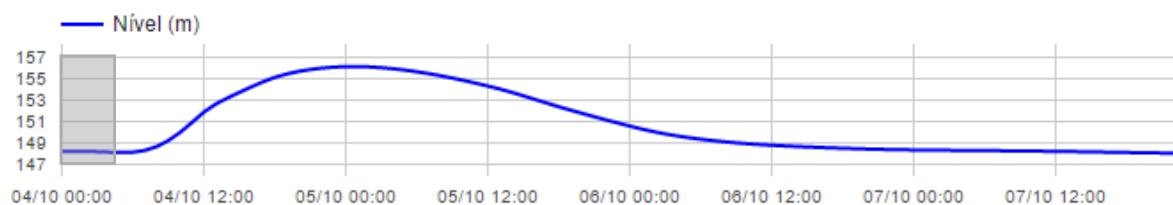


Figura 56: Variação das chuvas na parte Alta (Cachoeirinha) e Média da bacia e variação de nível na seção associada a essas partes da bacia.

Trecho: RESGATOS-CATEND
Seção: 10245



Trecho: RESIGARA-CATEND
Seção: 26047



Trecho: CATEND-PALMAR
Seção: 6039

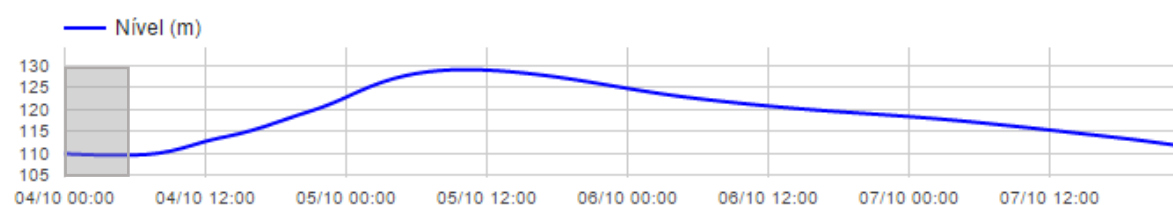
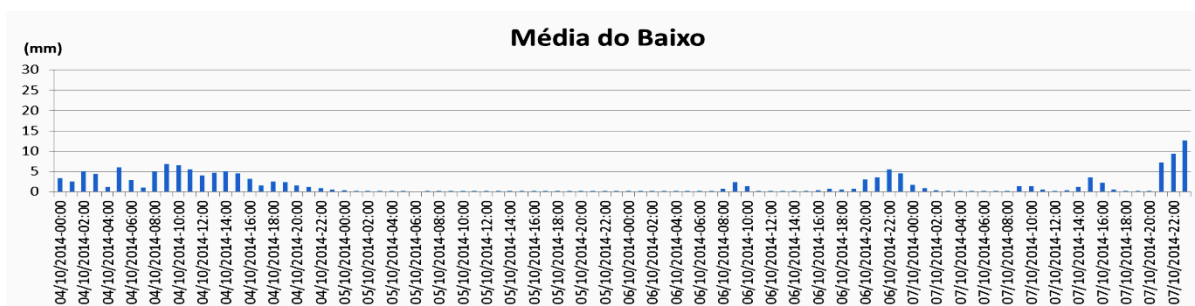
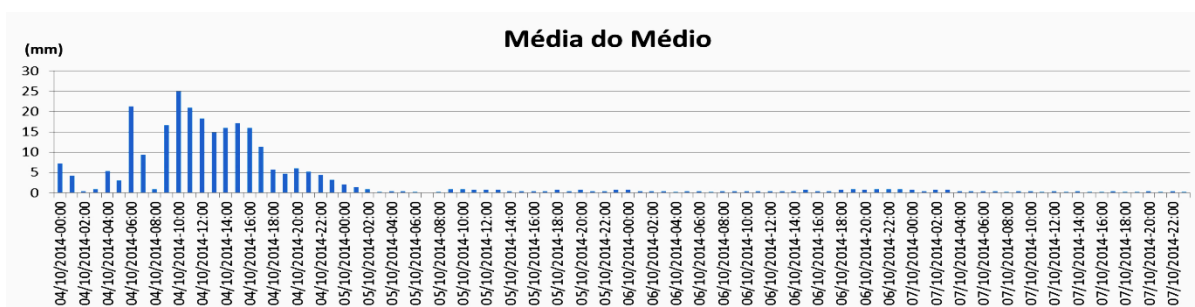
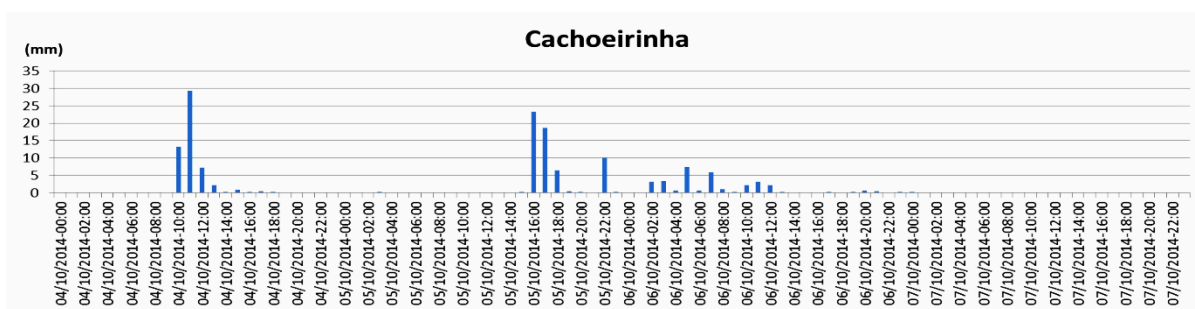


Figura 57: Variação de nível nas seções associadas à parte Média da bacia.



Trecho: PALMAR-BARREIR
Seção: 81532



Trecho: PALMAR-BARREIR
Seção: 13960

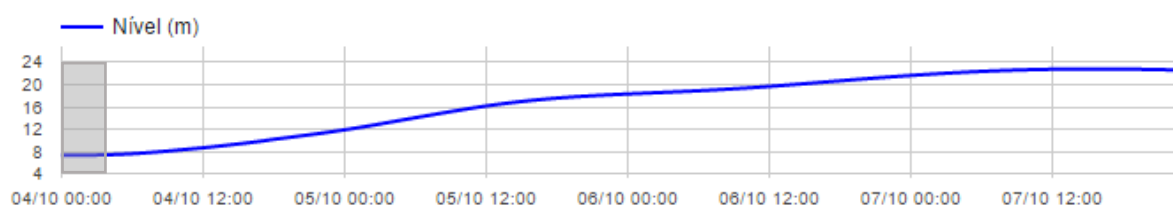


Figura 58: Variação das chuvas nas partes Alta (Cachoeirinha), Média e Baixa da bacia e variação de nível nas seções associadas a estas partes da bacia.

5.4 Análise da Viabilidade do Uso de Estimativas de Chuva de Satélites

Foram realizados estudos sobre a utilização de dados de chuva provenientes de algoritmos que se utilizam de imagens de sensores embarcados em satélites. Este trabalho foi feito com o objetivo de inserir esses dados em um processo de ajustes dos valores de chuva observados nas estações de medição e nas previsões meteorológicas, usadas como entrada no mecanismo de integração dos modelos hidrológicos e hidrodinâmicos. Foram estudados e desenvolvidos algoritmos de captação de dados para algoritmos Hydroestimator, CMORPH e TRMM.

A metodologia de avaliação dessas técnicas envolveu a comparação de seus dados com um conjunto de estações pluviométricas da bacia do rio Una, sendo que estas estações foram reunidas em “agrupamentos” (Figura 58) e esses agrupamentos foram comparados a outros agrupamentos de pontos da grade de dados dos satélites e resultou em gráficos.

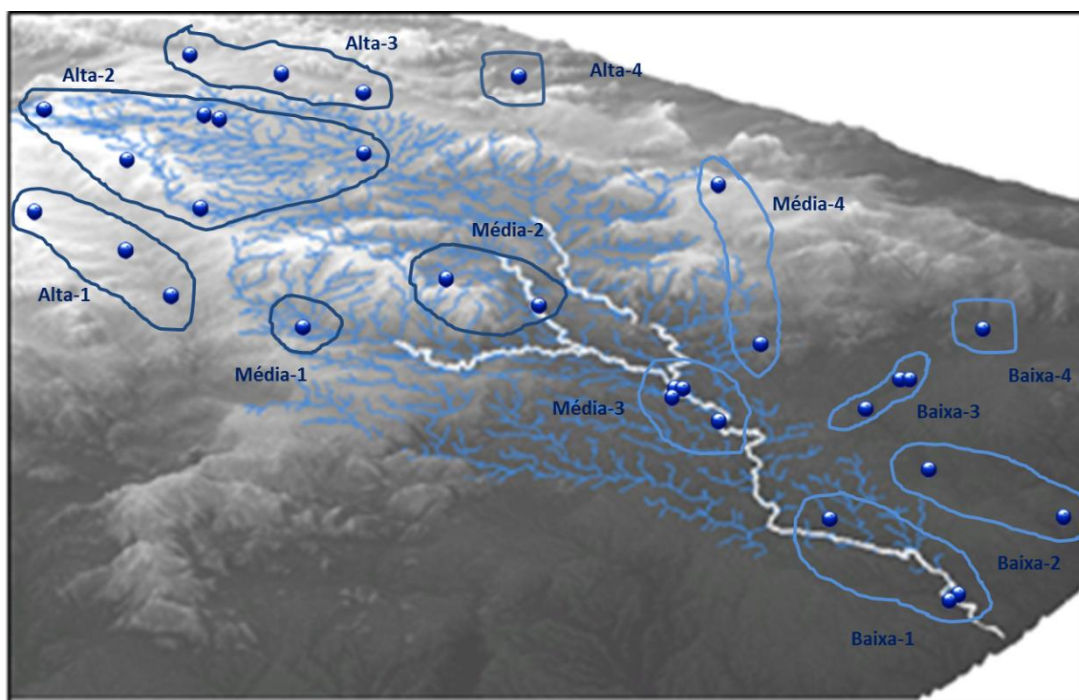


Figura 58: Agrupamentos de Estações Pluviométricas na bacia do rio Una.

Com base nestes agrupamentos de estações, foram criados agrupamentos de pontos de dados de satélites e então efetuadas médias diárias de cada agrupamento, para comparação entre si. As associações dos agrupamentos de estações com os agrupamentos de pontos são mostrados nas figuras 59 e 60.

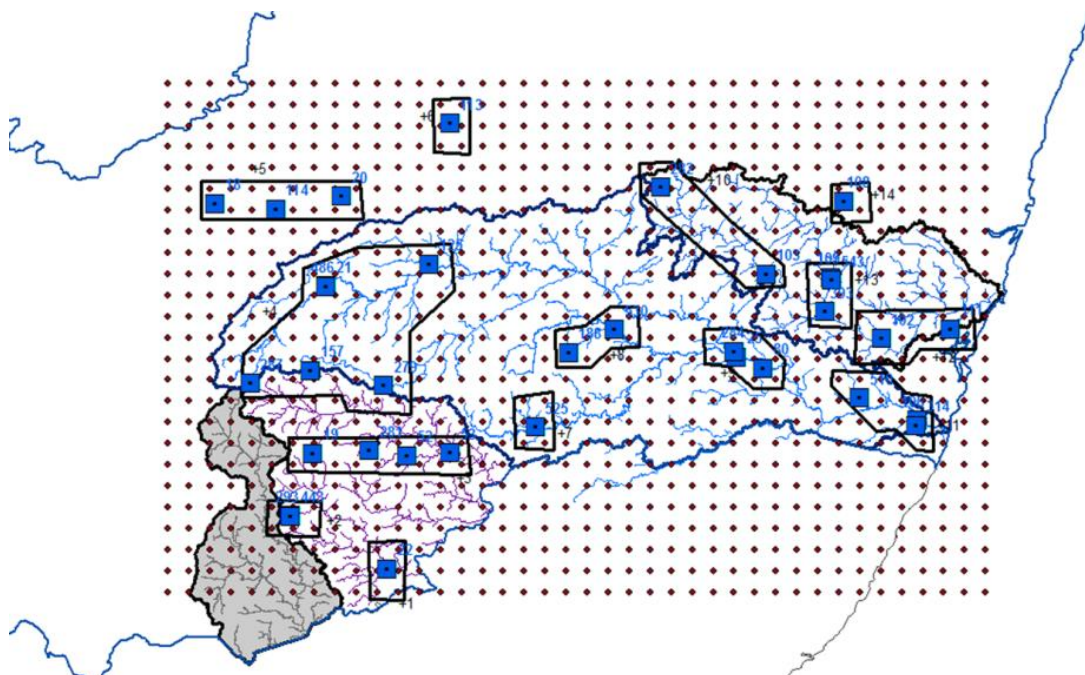


Figura 59: Esquema de agrupamento de pontos Hydroestimator.

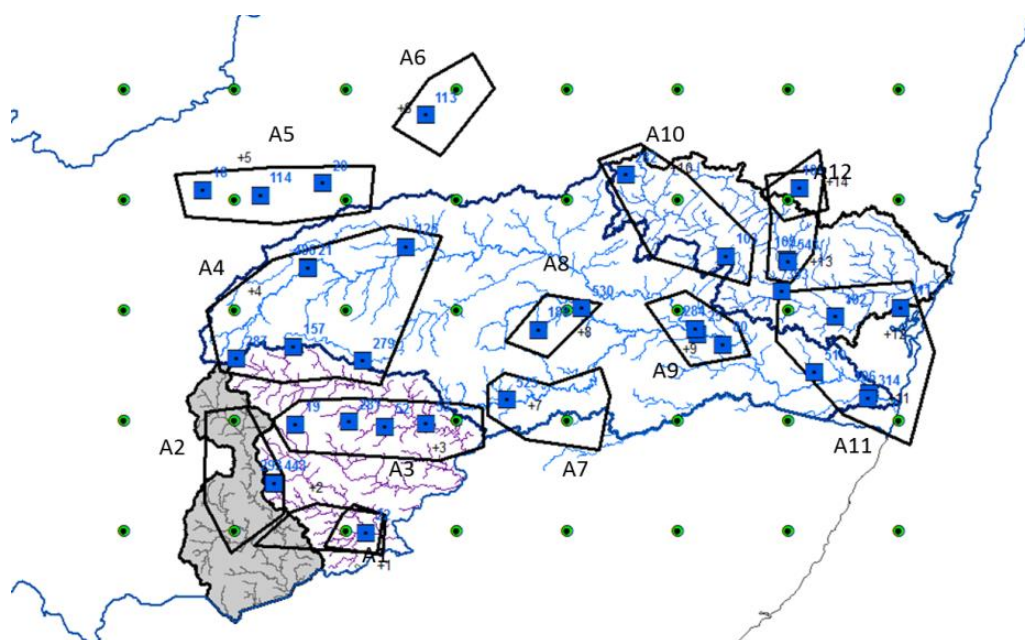


Figura 60: Esquema de agrupamento de pontos CMORPH e TRMM.

Os primeiros resultados (Figuras 61 a 63) mostraram que os métodos CMORPH e TRMM se adaptaram melhor à situação hidrometeorológica da bacia do rio Una. Nas Figuras 59 a 61 os dados de grupos de estações são dados observados e os dados de grupos de pontos são dados estimados pelos satélites.

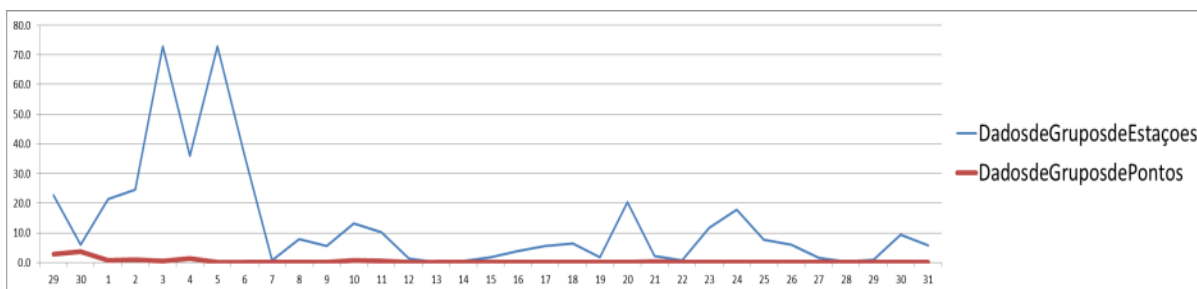


Figura 61: Comparação entre dados observados e dados de estimativas do Hydroestimator, para a enchente de 2010 na bacia do rio Una.

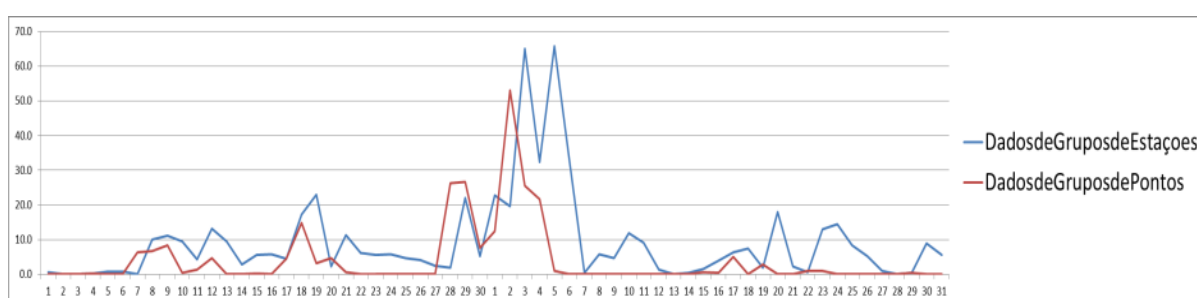


Figura 62: Comparação entre dados observados e dados de estimativas do CMORPH, para a enchente de 2010 na bacia do rio Una.

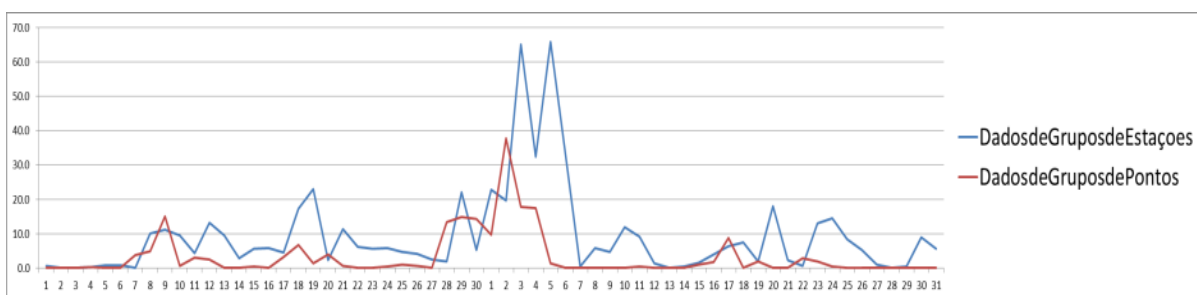


Figura 63: Comparação entre dados observados e dados de estimativas do TRMM, para a enchente de 2010 na bacia do rio Una.

Apesar dos estudos a respeito da obtenção e qualidade dos dados de estimativas de satélites terem mostrado grandes possibilidades da sua utilização, em alguns casos, como no caso do Hydroestimator, não foi verificada uma correlação satisfatória entre os valores das estimativas e os valores observados. Através de comunicação com o responsável pelo Hydroestimator, foi recomendado que fossem utilizados dados de radar para efetuar a calibração dos valores produzidos pelo algoritmo.

6 Discussão dos Resultados

Os resultados gerais foram colocados em quatro pontos, quer sejam (1) estado atual de implementação do sistema; (2) integração dos modelos, hidrológico e hidrodinâmico, construídos para a bacia do rio Una; (3) simulações efetuadas com o sistema construído sobre a integração estruturada de modelos e (4) estudos do emprego de dados de estimativas de satélites para geração de dados de chuva distribuídos na bacia.

No que diz respeito ao estado atual do sistema, o MAVEN se encontra operacional e com funcionamento considerado bom para o desenvolvimento de um protótipo. Agora sabe-se que muitos detalhes de funcionamento dos modelos, em separado, são bastante diferentes quando se pretende integrar estes modelos em um mecanismo computacional automático e flexível. O embasamento teórico foi fundamental na busca de soluções computacionais que produzissem os resultados desejados, mas várias questões da integração de modelos hidrológicos estão ligadas à prática da modelagem, ou ao “feeling”, que se consegue depois de muitos experimentos, com vários conjuntos de parâmetros. Sob este aspecto o sistema está se prestando muito bem, pois permite ao pesquisador testar os modelos e os dados, em sua utilização de forma integrada, sob várias condições e cenários.

O MAVEN, pela sua própria constituição, é um sistema dependente dos componentes de comunicação, ou seja, da internet. Sua operação toda se faz na Web, tanto nos procedimentos automáticos de busca de dados, quanto na disponibilização destes mesmos dados, dos controles das simulações e dos resultados das simulações. Todos os objetos de interesse do sistema são centralizados no servidor MAVEN e, a partir dele são disponibilizados. De maneira geral o sistema funciona satisfatoriamente, mas requer ainda uma série de ajustes, os quais devem ser feitos à medida que os experimentos forem feitos, outras bacias forem inseridas e outros pesquisadores fizerem uso do sistema. Nesse aspecto é necessário verificar como o sistema se comporta perante um uso mais constante de suas capacidades.

Com relação à construção dos modelos hidrológicos e hidrodinâmicos, esta tarefa resultou em esquemas de representação do comportamento hídrico da bacia do Una, no caso os próprios modelos, ajustados para situações de enchentes. No

processo de desenvolvimento dos modelos, talvez o maior desafio enfrentado tenha sido a alta declividade do médio curso da bacia do rio Una. Neste caso, com relação ao modelo hidrodinâmico, o ajuste do modelo foi feito para volumes de vazões consideravelmente grandes. Isto decorre por conta do processo de propagação das equações de Saint Venant, pelo HEC-RAS. Desta maneira, caso não tenha vazão suficiente nos rios, o modelo simplesmente para, apontando instabilidade no processo de propagação da onda de cheia. Quando ocorre instabilidade no modelo hidrodinâmico, as iterações são abortadas por falha no processo, o que ocorre na maioria das vezes no trecho Estação Capivara – Palmares, pois este apresenta alta declividade. Isso cria uma limitação nas simulações, que têm seus valores mínimos de vazão relacionados aos índices de declividade, observados nos trechos do modelo. Quanto maior a declividade no trecho, maiores tem que ser as vazões mínimas para que o modelo hidrodinâmico funcione.

Para superar a situação de alta declividade, na parte média da bacia em estudo, foi utilizada a solução hidrológica para geração do escoamento em algumas partes do trecho Estação Capivara – Palmares. Apesar do uso deste procedimento, se o período de simulação escolhido apresentar pequenos valores de precipitação, o modelo hidrológico irá gerar pequenas vazões, o que pode impedir o funcionamento do modelo hidrodinâmico. Este processo deve ser aprimorado para que o sistema possa simular situações não tão críticas, o que irá ampliar suas capacidades. A limitação das vazões mínimas influencia diretamente o estabelecimento das condições iniciais de vazões para o modelo. A princípio, o sistema desenvolvido irá utilizar como condições iniciais, as vazões observadas (na data inicial de simulação) nas estações automáticas, associando estas à trechos do modelo HEC-RAS. Mas, caso estas estações apresentem valores muito pequenos, ou tenham falhas de dados, o sistema assume valores de vazão pré-estabelecidos para estas condições iniciais. Isto cria um período de “aquecimento” do modelo hidrodinâmico, onde o modelo recebe as condições mínimas necessárias para iniciar o processo, se ajustando logo a seguir com base nos dados de vazões que chegam do modelo hidrológico. Foi observado que este período de aquecimento vai de duas a oito horas, dependendo das vazões observadas inicialmente nas estações. Sendo assim as simulações devem sempre ser feitas a partir do dia anterior ao dia desejado, dando certa folga para o sistema se auto-ajustar.

Os modelos agora estão operacionais, interligados entre si e às fontes de dados de observação, previsão e cenários, de forma que seu desenvolvimento deve continuar com o suporte dos mecanismos do MAVEN. Com a construção dos modelos várias situações interessantes de geração de dados foram disponibilizadas, entre elas a obtenção das curvas-chave de toda a calha modelada do rio. Este é um ponto interessante, no que diz respeito a futuros estudos que demandem este tipo de informação.

No aspecto capacidade de simulação, os resultados da utilização do sistema MAVEN foram divididos nos quatro tipos de simulações possíveis no sistema construído. Estas simulações representam as formas de utilização das funcionalidades associadas aos modelos configurados no sistema. Sendo assim, verifica-se primeiro uma simulação automática (Simulação 1) que o sistema executou porque o conjunto de vazões observadas superou os valores configurados para alerta de previsão. Neste caso a primeira seção do trecho Estcapiv-Palmares apresentou uma resposta coerente, aos valores de chuva observados na estação de Cachoeirinha. Na outra seção desse mesmo trecho, os valores de variação foram naturalmente amortecidos pela distância da parte Alta da bacia e pela entrada de vazões da parte baixa. Por sua vez, as seções que estão associadas à parte média da bacia tiveram elevação em seu nível apenas no final do período, correspondendo às chuvas na parte média, que só ocorreram no final deste período. Com relação às duas seções que avaliam o comportamento das partes Alta, Média e Baixa da bacia, as variações apresentaram-se coerentes com as variações de chuva, mostrando picos de chuva iniciando mudanças grandes nos valores de nível destas seções.

No caso da simulação 2, que foi uma simulação manual com dados observados, foi escolhido um período em que houve um volume de chuvas não muito pequeno, mas também não muito grande. Assim como na simulação automática, esta simulação mostrou valores coerentes de variação entre os níveis, nas seções e as chuvas, nas estações, representadas por suas médias. A simulação 3 é uma simulação com dados de previsão, dados estes que tem um grande diferencial dos dados observados pelo fato de estarem distribuídos em grade por toda a bacia. Neste caso o sistema consegue efetuar simulações com médias menores de chuva, apresentando resultados satisfatórios para o modelo exemplificado por esta simulação. Especificadamente esse tipo de simulação tem

um funcionamento melhorado por conta da distribuição dos dados de entrada.

A simulação 4 representou um cenário construído para as chuvas que ocorreram na enchente de 2010. Esse cenário apresentou grandes volumes de chuva concentradas na parte média da bacia. Os resultados desta simulação mostraram elevação de aproximadamente 14 metros do leito do rio na região de Palmares, o que se aproxima dos valores reais de nível observados na enchente. O período de geração dos dados do cenário foi de 17/Jun/2010 a 20/Jun/2010, mas na simulação, este cenário foi atribuído ao período 04/Out/2014 a 07/Out/2014. A razão disto ter sido feito é porque o sistema precisa buscar os dados de vazões iniciais em seu conjunto de dados atuais e neste conjunto não constam os dados de vazões da época das enchentes de 2010. Essa circunstância não chega a causar muito problema ao experimento, pois seu efeito se corrige durante o aquecimento do modelo hidrodinâmico, citado anteriormente.

Analizando a qualidade dos dados de chuva obtidos das estações automáticas, observam-se várias falhas nas séries recebidas das oito estações que operam na bacia do Una, principalmente a estação de Barreiros, que já tem um longo período sem a produção de dados. Estas falhas fazem com que o processo de simulação com dados observados seja comprometido até um certo nível, pois o modelo hidrológico tem que usar valores de outras estações, por vezes distante das estações com falhas. No caso dos dados de nível, gerados pelas estações que estão nas calhas dos rios, a quantidade de falhas observadas é ainda maior, o que dificulta os procedimentos de ajustes dos modelos. É importante salientar que, no início do processo de desenvolvimento do MAVEN, as oito estações do Una funcionavam de maneira mais descontínua do que atualmente, apresentando séries mais longas de dados contínuos de chuva, em apenas uma ou duas estações. Foi justamente como uma tentativa de melhorar da qualidade dos dados observados, que foram feitos os estudos sobre os dados de estimativas de chuvas por satélites.

Os estudos sobre as possibilidades de uso dos dados de estimativas de satélites resultaram em rotinas para captura e conversão destes dados para as três técnicas de obtenção destas estimativas. O algoritmo Hydroestimator apresentou grande dificuldade em estimar com relativa precisão os valores de chuva observados na bacia do rio Una. Esta foi uma questão que demandou muito tempo e trabalho, concluindo na necessidade de dados de radar para utilização desta

técnica. A situação verificada em que o algoritmo Hydroestimator não mostrou chuvas na bacia do rio Una, em um período em que fortes chuvas foram registradas nos pluviômetros situados na bacia, aponta para uma necessária avaliação dos aspectos específicos desta bacia, que podem ter gerado tal anomalia nos resultados fornecidos pelo Hydroestimator. Considerando que esta técnica gerou valores consideráveis de chuva em toda a região próxima à bacia, podem-se examinar as características orográficas, associadas ao período de chuvas analisado, como fatores de expressiva influencia, em relação às chuvas na bacia do rio Una. No caso das outras duas técnicas, o CMORPH e o TRMM, foi observada uma boa correlação entre os valores de chuva medidos pelos pluviômetros e os valores estimados pelas técnicas, representando uma interessante possibilidade de uso desta fonte de dados.

Com relação aos dados de previsões de chuvas para a região Nordeste, geralmente o que foi observado é que todos os modelos utilizados atualmente pelo MAVEN, ou seja, o ETA, o BRAMS e o WRF geralmente apresentam sub-estimação dos valores observados em estações de chuva (pluviômetros). Estes valores, além de sub-estimados, muitas vezes não conseguem se ajustar também no aspecto de “chuva/não-chuva”, implicando na necessidade de métodos de combinação dos prognósticos individuais (dos modelos meteorológicos) em conjuntos compostos, o que deve ser motivo de investigação futura.

Por fim, os resultados obtidos com a modelagem integrada, dos três domínios de processos físicos responsáveis pelos eventos de enchentes, mostraram que um grande caminho foi percorrido no sentido de se construir uma ferramenta de previsão de enchentes eficiente e utilizável pelos especialistas e gestores de recursos hídricos. Esses resultados apontam, não só para um bom caminho a seguir, mas também para novos desafios, em termos de melhoramento na precisão e usabilidade dos dados gerados pelo procedimento, como um todo. O principal resultado, que agrega todos os outros, está na automação (e consequente agilização) dos procedimentos de análise hidrológica de situações que apresentem riscos de enchentes em cidades ribeirinhas. Considerando que o fator “urgência de tempo” é crítico para as respostas a serem dadas pelos decisores em casos de enchentes iminentes, a utilização do conhecimento hidrometeorológico representado pela modelagem integrada, torna-se um elemento chave desse contexto gerencial.

7 Conclusões e Recomendações

Finaliza-se este trabalho de pesquisa concluindo que os anos de investigação sobre a integração de modelos hidrometeorológicos propiciaram ao autor um conjunto de conhecimentos e ferramentas que podem efetivamente auxiliar nas situações de risco e enchentes na bacia do rio Una, em Pernambuco.

Esse conjunto de conhecimentos foi utilizado para construção de uma estrutura computacional que automatiza os procedimentos de integração dos modelos, conectando suas saídas e entradas em um fluxo contínuo de dados e parâmetros de simulação. Isto foi feito de maneira a tornar as simulações utilizáveis, não só por hidrólogos, mas por todos os interessados no estudo dos eventos de enchentes.

Dentro desta perspectiva, a pesquisa foi conduzida na busca de uma abordagem que permitisse o uso da modelagem em um ambiente experimental, interligado a um sistema de monitoramento que utiliza automaticamente os resultados dos experimentos bem sucedidos de modelagem, na gestão dos eventos de enchentes, fornecendo prognósticos consistentes de forma clara e contínua.

Esta abordagem foi desenvolvida a partir de um mecanismo simples de monitoramento, onde os dados gerados por estações automáticas são capturados em seus repositórios e armazenados em uma estrutura própria, adequando-se às necessidades das simulações desejadas.

Verificou-se que, para a integração efetiva de modelos hidrometeorológicos, torna-se necessário conectar instituições parceiras, algumas das quais operam os equipamentos geradores de dados, de forma a utilizar os produtos destas fontes, sejam estes, dados ou conhecimento científico, dentro de um contexto de interação com os hidrólogos e suas demandas. No caso, as demandas observadas em um processo de enfrentamento de enchentes estão associadas à previsão de sua amplitude, velocidade e grau de comprometimento das populações estabelecidas em seu curso.

Os trabalhos para integração dos modelos envolveram principalmente o estudo de suas interfaces, mecanismos de ativação, restrições de operação e estruturas internas de dados. Esses estudos foram conduzidos de forma a gerar um conjunto síncrono de modelos, operado automaticamente ou manualmente, que se

baseia no fluxo de parâmetros físicos observados nos três domínios da aplicação, apresentados no começo deste texto.

Com relação ao desenvolvimento do sistema, conclui-se que este foi feito segundo a progressão das pesquisas sobre o conhecimento atual de modelagem hidrológica e hidrodinâmica, integrando estes modelos em um processo computacional flexível e dinâmico. Isto foi deduzido pela avaliação positiva que a disponibilização de modelos calibrados e ajustados pode trazer.

Uma questão importante no desenvolvimento do sistema diz respeito ao emprego de tecnologias livres e abertas, já consolidadas mundialmente em aplicações na internet. Este aspecto está ligado à decisão de se utilizar ferramentas de desenvolvimento que estivessem acessíveis a todos, de forma simples e direta, como Java, PostgreSQL e Google Maps.

Os resultados obtidos pelo sistema mostraram respostas consistentes à sua entrada de dados, significando que a abordagem utilizada para o desenvolvimento do procedimento de modelagem, de maneira geral, está correta, necessitando apenas ajustes de conformidade com o nível de precisão desejada. Isto deve ser feito à medida que novos e mais precisos conjuntos de dados forem gerados, mais parâmetros de comparação dos resultados forem estabelecidos e, propriamente, os modelos das bacias sejam mais aprimorados. Além disso, a própria interface com os usuários do sistema deverá ser melhorada, para facilitar a compreensão do volume de informações geradas pelo MAVEN. Isso refletirá na dinamização de suas operações visando a utilização efetiva dos dados já sistematizados, bem como de novos conjuntos de dados, como estimativas de chuva por satélites e radares.

Os estudos mostraram grandes possibilidades de utilização dos dados das técnicas estudadas para geração de estimativas de dados de chuva com o uso de satélites. A utilização dos dados de estimativas de satélites pode prover valores de chuva distribuídos em grade regular, melhorando a espacialização da informação hidrometeorológica. Dados de estimativas de satélites podem ser usados para procedimentos de consistência de dados de estações de terra, sendo que, as estimativas de satélites podem ser ajustadas por dados de chuva obtidos por radar.

Considera-se que os especialistas em recursos hídricos podem fazer uso da ferramenta de simulação hidrometeorológica construída, de forma a prever situações de elevação de níveis dos rios em cidades ribeirinhas, tendo assim

capacidade de determinar medidas de mitigação de perdas, com horizonte de previsões em dias. Necessita-se porém, melhoramento na qualidade dos dados de previsão, para que o sistema possa representar melhor e prever com maior antecedência, os acontecimentos verificados em enchentes.

Como recomendações finais do trabalho pode-se citar inicialmente a inclusão de outras bacias, além das bacias já inseridas no sistema, pois além da bacia do Una (bacia piloto), a bacia do rio Serinhaém e a parte pernambucana da bacia do rio Mundaú já estão também sendo monitoradas. No caso, a bacia do rio Paraíba do Meio também já está em fase de inserção inicial no sistema. A inserção de novas bacias só apresenta um fator limitante, que está relacionado ao espaço em disco necessário ao armazenamento de dados, principalmente os dados de previsão.

Um aspecto que se tornará mais importante, à medida que o sistema possa ser mais utilizado, é a interface com os usuários. Até então o MAVEN foi desenvolvido como um protótipo e, dentro desta escala, ele esteve sujeito a operações de laboratório, tentativas de procedimentos experimentais, mudanças de projeto e falhas.

A partir desse ponto o MAVEN deverá continuar seu desenvolvimento de forma mais permanente, se firmando como um eficiente sistema de apoio à decisão, com melhor suporte técnico e financeiro. Para que esta mudança operacional possa ser feita de maneira efetiva torna-se necessário desenvolver melhor a interface com os usuários do sistema, o que necessitará dos trabalhos de um profissional com conhecimentos de Web Design.

A utilização dos dados de estimativas de satélites deverá ter sua implementação concluída no sistema, aumentando a qualidade e quantidade dos dados de entrada dos modelos. Este passo será um grande avanço na melhoria dos resultados das simulações, pois irá propiciar melhores ajustes de funcionamento dos modelos, os quais já se mostraram em várias pesquisas, mais adequados a um volume maior de dados de entrada.

Dentro deste encaminhamento, visando a melhoria dos conjuntos de dados de entrada, também recomenda-se a utilização de dados de radar como fonte de informação na dimensão altimétrica, o que tem o potencial de ampliar bastante a precisão dos resultados da modelagem integrada.

Melhores experimentos podem ser feitos em simulações com dados de previsão, observando mais o funcionamento do sistema com relação a esse tipo de dado, levando a análises sistemáticas sobre grandes volumes de precipitação previstos e seus efeitos nos modelos que representam as cheias do rio Una.

Futuramente conjuntos de informações agregadas, sumarizadas e espacializadas, poderão ser gerados com base nos dados e resultados do MAVEN, suprimindo as redes de defesa civil, organizações sociais e a população em geral, com notícias, boletins, alertas ou observações relacionadas aos eventos de enchentes, aos quais as populações ribeirinhas possam estar sujeitas.

REFERÊNCIAS

- ABDELBASSET, M. et al. **Integration of gis and hec-ras in floods modeling of the ouergha river, northern morocco**. European Scientific Journal, v. 11, n. 2, p. 196-204, 2015.
- ABDULLAH, A. F. B. et al. **A methodology for processing raw LiDAR data to support urban flood modelling framework**. Journal of Hydroinformatics, n. 14, n.1, p. 75-92, 2012.
- ABEBE, A.; PRICE, R. **Decision support system for urban flood management**. Journal of Hydroinformatics, v. 7, p. 3-15, 2005.
- ABON, C. C.; DAVID, C. P. C.; TABIOS III, G. Q. **Community-based monitoring for flood early warning system: An example in central Bicol River basin, Philippines**. Disaster Prevention and Management: An International Journal, v. 21, n. 1, p. 85-96, 2012.
- ADRIAENSSENS, V. et al. **Fuzzy rule-based models for decision support in ecosystem management**. Science of the Total Environment, v. 319, n. 1, p. 1-12, 2004.
- AHMAD, S.; SIMONOVIC, S. P. **An intelligent decision support system for management of floods**. Water Resources Management, v. 20, n. 3, p. 391-410, 2006.
- ALBUQUERQUE, R. T. D. B.; GALVÍNCIO, J. D. **Cenários de Mudanças Climáticas na Bacia Hidrográfica do Rio Una – Pernambuco**. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 3, n. 2, p. 48-54, 2010.
- ALCOFORADO, R.G.; CIRILO, J. A. **Sistema de suporte à decisão para análise, previsão e controle de inundações**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, v. 6, n. 4, p. 133-153, 2001.
- ALI, M. et al. **Simulation of the impacts of land-use change on surface runoff of Lai Nullah Basin in Islamabad, Pakistan**, Landscape and Urban Planning, v. 102, p. 271– 279, 2011.
- ALMEIDA, C. N. et al. **Novas Tecnologias de Informações em Recursos Hídricos**, Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 14, n. 2, p. 107-116, 2009.
- ANDERSON, M. et. al. **Coupling HEC-HMS with Atmospheric Models for Prediction of Watershed Runoff**, Journal of Hydrology Engineering, v. 7, n. 4, p. 312–318, 2002.
- ARAGÃO, J.; ARAÚJO, J. G.; LACERDA, F. F. **Comparação entre as Precipitações Observadas e as Prognosticadas pelo Modelo BRAMS durante**

dois Eventos de Chuvas Fortes no Litoral de Pernambuco, Brasil. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, Edição XIV, Florianópolis - SC. 6 p., 2006.
 ARGENT, R. M.; HOUGHTON, B. **Land and water resources model integration: software engineering and beyond.** Advances in Environmental Research, v. 5, n. 4, p. 351-359, 2001.

ARGENT, R. M. **An overview of model integration for environmental applications—components, frameworks and semantics.** Environmental Modelling & Software, v. 19, n. 3, p. 219-234, 2004.

ARNELL, N. W.; GOSLING, S. N. **The impacts of climate change on river flow regimes at the global scale.** Journal of Hydrology, v. 486, p. 351-364, 2013.

ARNOLD, T. R. **Procedural knowledge for integrated modelling: towards the modelling playground.** Environmental Modelling & Software, v. 39, p. 135-148, 2013.

ASHRAF, M. A. et al. **Sand mining effects, causes and concerns: A case study from Bestari Jaya, Selangor, Peninsular Malaysia.** Scientific Research and Essays, n. 6, p. 1216-1231, 2011.

AZEVEDO, J. R. G. et al. **Processamento integrado de dados para análise hidrológica.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 2, n.2, p. 21-44, 1997.
 BALDASSARRE, G., CLAPS, P. **A hydraulic study on the applicability of flood rating curves.** Hydrology Research, v. 42, n. 1, p. 10-19, 2010.

BALICA, S. F. et al. **Parametric and physically based modelling techniques for flood risk and vulnerability assessment: a comparison.** Environmental Modelling & Software, v. 41, p. 84-92, 2013.

BASARUDIN, Z. et al. **Event-based rainfall-runoff modelling of the Kelantan River Basin.** In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, IOP Publishing, 7 p., 2014.

BASHAR, K.; KHUDAIR, B. H.; KHALID, G. **Inundation Map Development by Using Hec-Ras Hydraulic Simulation Modeling from Roseires to Khartoum cities.** Indian Journal of Research, v. 3, n. 9, p. 58-62, 2014.

BERTONI, J. C.; TUCCI, C. E.; CLARKE, R. T. **Rainfall-based real-time flood forecasting.** Journal of Hydrology, v. 131, n. 1, p. 313-339, 1992.

BLANCQ, F. L.; JOHNSON, P. **Introducing and verifying rainfall probability forecasts in a small meteorological office.** Meteorological Applications, v. 7, n. 4, p. 361-367, 2000.

BOBOC, N. et al. **Utilization of the HEC-RAS for flood wave modeling on example of the Prut River.** Geographic Information Systems. Vulnerability and risk assessment using GIS Cluj-Napoca, Romania, p. 71-76, 2012.

BOND, N.R.; COTTINGHAM, P. **Ecology and hydrology of temporary streams: implications for sustainable water management**. eWater Technical Report. eWater Cooperative Research Centre, Canberra, Australia, 35 p., 2008.

BORGA, M. et al. **Flash floods: Observations and analysis of hydro-meteorological controls**. Journal of Hydrology, v. 394, n. 1, p. 1-3, 2010.

BOUGHTON, W.; DROOP, O. **Continuous simulation for design flood estimation - a review**. Environmental Modelling & Software, v. 18, n. 4, p. 309-318, 2003.

BRAUD, I. et al. **The use of distributed hydrological models for the Gard 2002 flash flood event: Analysis of associated hydrological processes**. Journal of Hydrology, v. 394, n. 1, p. 162-181, 2010.

BRAVO, J. M. et al. **Coupled hydrologic-hydraulic modeling of the upper Paraguay River basin**. Journal of hydrologic engineering, v. 17, n. 5, p. 635-646, 2011.

BRIMICOMBE, A. **GIS, Environmental Modeling and Engineering**. CRC Press, 2^o Ed., 380 p., 2010.

BRUNNER, G. W. **HEC-RAS River Analysis System. Hydraulic Reference Manual**. Version 1.0. Hydrologic Engineering Center Davis CA, 417 p., 1995.

BUTT, M. J.; UMAR, M.; QAMAR, R. **Landslide dam and subsequent dam-break flood estimation using HEC-RAS model in Northern Pakistan**. Natural hazards, v. 65, n. 1, p. 241-254, 2013.

CALIANNO, M.; RUIN, I.; GOURLEY, J. J. **Supplementing flash flood reports with impact classifications**. Journal of Hydrology, v. 477, p. 1-16, 2013.

CALVET, J. C. et al. **Mapping surface parameters for mesoscale modeling in forested and deforested southwestern Amazonia**. Bulletin of the American Meteorological Society, v. 78, n. 3, p. 413-423, 1997.

CAPDEVILLA, A. S. **Climate Change Impacts in Hydrology: Quantification and Societal Adaptation**. Tese de doutorado, The University of Arizona, USA, 140 p., 2009.

CASTRONOVA, A. M.; GOODALL, J. L.; ERCAN, M. B. **Integrated modeling within a hydrologic information system: an OpenMI based approach**. Environmental Modelling & Software, v. 39, p. 263-273, 2013.

CHIEN, N. Q.; TAN, S. K. **Google Earth as a tool in 2-D hydrodynamic modeling**. Computers & Geosciences, v. 37, n. 1, p. 38-46, 2011.

CHNG, L. K. et al. **The effects of improved land use on the meteorological modeling in Klang Valley region Malaysia**. Environment Asia, v. 3, p. 117-23, 2010.

- CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de Sistemas Ambientais**. Edgard Blücher, 236 p., 1999.
- CIRILO, J. A. **Looking to the future: some questions and reflections on water resources management**. Water International, v. 37, p. 717-720, 2012.
- CIRILO, J. A. et al. **Processamento integrado de dados para análise hidrológica**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 2, n. 2, p. 21-44, 1997.
- CLOKE, H. L.; PAPPENBERGER, F. **Ensemble flood forecasting: a review**. Journal of Hydrology, v. 375, n. 3, p. 613-626, 2009.
- COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. **Previsão Sazonal de vazão na bacia do rio Uruguai 1: Ajuste e verificação do modelo hidrológico distribuído**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 10, n. 4, p. 43-59, 2005.
- COLLISCHONN, W. et al. **Forecasting River Uruguay flow using rainfall forecasts from a regional weather-prediction model**. Journal of Hydrology, v. 305, n. 1, p. 87-98, 2005.
- COLLISCHONN, W. et al. **The MGB-IPH model for large-scale rainfall—runoff modelling**. Hydrological Sciences Journal, v. 52, n. 5, p. 878-895, 2007.
- COLLISCHONN, B. et al. **Modelagem Hidrológica de Uma Bacia com Uso Intensivo de Água: Caso do Rio Quaraí-RS**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 16, n. 4, p. 119-134, 2011.
- CÔRTEZ, J. M. **Sistemática de Auxílio à decisão para a Seleção de Alternativas de Controle de Inundações Urbanas**. Tese de doutorado, Universidade de Brasília/PTARH, 342 p., 2009.
- CPRM. **Sistema de Alerta Contra Enchentes do Rio Doce**, página disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/alerta/site/>>. Acesso em 12/03/2015.
- CRUZ, J. C. **Estudo de Previsão de Cheias em Tempo Real com Modelos Empíricos e Semi-Conceitual**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro/COPPE, 147p, 1987.
- DANTAS, C. E. O. **Previsão e Controle de Inundações em Meio Urbano com Suporte de Informações Espaciais de Alta Resolução**. Tese de doutorado, Universidade Federal de Pernambuco, 223p, 2012.
- DANTAS, C. E. O. et al. **Caracterização da Formação de Cheias na Bacia do Rio Una em Pernambuco: Análise Estatística Regional**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 19, n. 4, p. 239-248, 2014.
- DARBY, S. E. **Effect of riparian vegetation on flow resistance and flood potential**. Journal of Hydraulic Engineering, v. 125, n. 5, p. 443-454, 1999.

DE SILVA, M.; WEERAKOON, S.; HERATH, S. **Modeling of Event and Continuous Flow Hydrographs with HEC-HMS: Case Study in the Kelani River Basin, Sri Lanka**. Journal of Hydrology Engineering, v. 19, n. 4, p. 800–806, 2014.

DUCROCQ, V.; TZANOS, D.; SÉNÉSI, S. **Diagnostic tools using a mesoscale NWP model for the early warning of convection**. Meteorological Applications, v. 5, n. 4, p. 329-349, 1998.

FCTH. **Sistema de Alerta a Inundações de São Paulo**, página disponível em: <<http://www.saisp.br/estaticos/sitenovo/home.xml>>. Acesso em 14/03/2015.

FELDMAN, A. D. **Hydrologic modeling system HEC-HMS: technical reference manual**. US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, 158 p., 2000.

FERRAZ, F. F. B.; MILDE, L. C. E.; MORTATTI, J. **Modelos Hidrológicos Acoplados a Sistemas de Informações Geográficas: um Estudo de Caso**. Revista de Ciência & Tecnologia, v. 14, p. 45-56, 1999.

FIDEM. **Bacia hidrográfica do rio Una, quarto e quinto grupos de bacias hidrográficas de pequenos rios litorâneos – GL 4 e GL 5**. Série Bacias Hidrográficas de Pernambuco, n. 3, 85 p., 2006.

FOTOPOULOS, F.; MAKROPOULOS, C.; MIMIKOU, M. A. **Flood forecasting in transboundary catchments using the Open Modeling Interface**. Environmental Modelling & Software, v. 25, n. 12, p. 1640-1649, 2010.

FRENCH, J. R. **Airborne LiDAR in support of geomorphological and hydraulic modelling**. Earth Surface Processes and Landforms, v. 28, n. 3, p. 321-335, 2003.

FUCHENG, S.; YUANJUN, Y.; MANHUA H. **Investigation and verification of extraordinarily large floods on the Yellow River**. Journal of Hydrology, v. 96, n. 1, p. 69-78, 1987.

GETIRANA, A. C. V. et al. **Hydrological modelling and water balance of the Negro River basin: evaluation based on in situ and spatial altimetry data**. Hydrological processes, v. 24, n. 22, p. 3219-3236, 2010.

GIBSON, S. A.; PAK, J. H.; FLEMING, M. J. **Modeling Watershed and Riverine Sediment Processes with HEC-HMS and HEC-RAS**. Watershed Management Conference, p. 1340-1349, 2010.

GICHAMO, T. Z. et al. **River cross-section extraction from the ASTER global DEM for flood modeling**. Environmental Modeling & Software, v. 31, p. 37-46, 2012.

GIONGO, M. et al. **LiDAR: princípios e aplicações florestais**. Pesquisa Florestal Brasileira, v. 30, n. 63, p. 231-244, 2010.

GIZ. **Local Flood Early Warning Systems**, Manila, Filipinas, 54 p., Disponível em: <http://www.preventionweb.net/files/29230_29230gizphilippineslocalfloodearlyw.pdf> Acesso em 20/10/14, 2002.

GOÉS, V. C. **Simulação Hidrológico-Hidrodinâmica Integrada ao Geoprocessamento para Avaliação da Macrodrenagem em Centros Urbanos.** Tese de doutorado, Universidade Federal de Pernambuco, 170 p., 2009.

GOODALL, J. L.; ROBINSON, B. F.; CASTRONOVA, A. M. **Modeling water resource systems using a service-oriented computing paradigm.** Environmental Modelling & Software, v. 26, n. 5, p. 573-582, 2011.

GOODELL, C. R. **Dam Break Modeling for Tandem Reservoirs — A Case Study Using HEC-RAS and HEC-HMS.** Impacts of Global Climate Change, ASCE, p. 1-11, 2005.

GRH. **Sistema de apoio à decisão para o gerenciamento dos Recursos hídricos da bacia do rio Paraguaçu: Instrumentos de apoio à decisão.** Relatório Executivo, UFBA/DEA/GRH, Salvador, 49 p., 2004.

GRUNTFEST, E.; RIPPS, A. **Flash floods: warning and mitigation efforts and prospects.** Floods, v. 1, p. 377-390, 2000.

GUL, G. O.; HARMANCIOGLU, N.; GUL, A. **A combined hydrologic and hydraulic modeling approach for testing efficiency of structural flood control measures.** Natural hazards, v. 54, n. 2, p. 245-260, 2010.

HAILE, A. T. **Integrating hydrodynamic models and high resolution DEM (LIDAR) for flood modeling.** Dissertação de mestrado, International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation, Holanda, 84 p., 2005.

HALWATURA, D.; NAJIM, M. M. M. **Application of the HEC-HMS model for runoff simulation in a tropical catchment.** Environmental Modelling & Software, v. 46, p. 155-162, 2013.

HARVEY, A. M. **Seasonal flood behavior in a clay catchment.** Journal of Hydrology, v. 12, n. 2, p. 129-144, 1971.

HASANI, H. **Determination of Flood Plain Zoning in Zarigol River Using the Hydraulic Model of HEC-RAS.** International Research Journal of Applied and Basic Sciences, v. 4, n. 0, p. 4300-4304, 2013.

HEJAZI, M.; MARKUS, M. **Impacts of Urbanization and Climate Variability on Floods in Northeastern Illinois.** Journal of Hydrology Engineering, v. 14, n. 6, p. 606-616, 2009.

HENONIN, J. et al. **Real-time urban flood forecasting and modelling—a state of the art.** Journal of Hydroinformatics, v. 15, n. 3, p. 717-736, 2013.

HERNÁNDEZ, F. M.; BÁ, K. M.; GUERRA-COBIÁN, V. H. **Estimación del hidrograma de crecientes con modelación determinística y precipitación derivada de radar.** Agrocienca, v. 47, n. 8, p. 739-752, 2013.

HILL, C. et al. **The architecture of the earth system modeling framework.** Computing in Science & Engineering, v. 6, n. 1, p. 18-28, 2004.

INEA. **Sistema de Alerta de Cheias do Rio de Janeiro**, página disponível em: [<http://www.inea.rj.gov.br/Portal/MegaDropDown/Monitoramento/Centrodemonitdedesastresamb/Alertadecheias/index.htm&lang=>](http://www.inea.rj.gov.br/Portal/MegaDropDown/Monitoramento/Centrodemonitdedesastresamb/Alertadecheias/index.htm&lang=>). Acesso em 14/03/2015.

ITAJAÍ. **Sistema de Alerta de Cheias da Bacia do Itajaí**, página disponível em: [<http://www.comiteitajai.org.br/alerta/>](http://www.comiteitajai.org.br/alerta/>). Acesso em 14/03/2015.

ITEP. **EIA/RIMA da barragem do Serro Azul**. Disponível em: http://www.cprh.pe.gov.br/ARQUIVOS_ANEXO/Rima%20Serro%20Azul;2803;20111020.pdf>. Acesso em 12/02/2015, 41 p., 2011.

KAMANBEDAST, A. A.; GHAHREMANI, A. **Evaluation of Scour Around Bridge Pile in Flood with Hec-Ras Software**. Journal of River Engineering, v. 2, 4 p., 2014.

KNEBL, M. R. et al. **Regional scale flood modeling using NEXRAD rainfall, GIS, and HEC-HMS/RAS: a case study for the San Antonio River Basin Summer 2002 storm event**. Journal of Environmental Management, v. 75, n. 4, p. 325-336, 2005.

KRAFT, P. et al. **CMF: a hydrological programming language extension for integrated catchment models**. Environmental modelling & software, v. 26, n. 6, p. 828-830, 2011.

KRAGT, M. E. et al. **An integrated approach to linking economic valuation and catchment modelling**. Environmental Modelling & Software, v. 26, n. 1, p. 92-102, 2011.

KRAGT, M. E.; ROBSON, B. J.; MACLEOD, C. J. A. **Modellers' roles in structuring integrative research projects**. Environmental Modelling & Software, v. 39, p. 322-330, 2013.

KRAUS, K.; PFEIFER, N. **Advanced DTM generation from LIDAR data**. International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences, v. 34, n. 3/W4, p. 23-30, 2001.

KUZMIN, V. A.; SEED, A. W.; WALKER, J. P. **Australian Government Bureau of Meteorology forecast and real-time observational hydrometeorological data for hydrologic forecasting**. eWater Technical Report, eWater Cooperative Research Centre, Canberra, Australia, 29 p., 2007.

LANIAK, G. F. et al. **Integrated environmental modeling: a vision and roadmap for the future**. Environmental Modelling & Software, v. 39, p. 3-23, 2013.

LARSON, J.; JACOB, R.; ONG, E. **The Model Coupling Toolkit: A new Fortran90 toolkit for building multiphysics parallel coupled models**. International Journal of High Performance Computing Applications, v. 19, n. 3, p. 277-292, 2005.

- LYNCH, P. **The origins of computer weather prediction and climate modeling.** Journal of Computational Physics, v. 227, n. 7, p. 3431-3444, 2008.
- LYRA, G. B. et al. **Coeficiente de rugosidade de Manning para o rio Paracatu.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 14, n. 4, p. 343-350, 2010.
- MAGALHÃES, L. P. C. **Modelo integrado para simulação de sistemas hídricos.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 122 p., 2005.
- MAIDMENT D. R. **Towards a Global Water Information System.** In: 14th Congress of the WMO Commission for Hydrology, Center for Research in Water Resources. University of Texas at Austin, 46 p., 2012.
- MALIK, M. I.; AHMAD, F. **Flood Inundation Mapping and Risk Zoning of the Swat River Pakistan using HEC-RAS Model.** Lasbela. Uni. J. Sci., Tech., v.3, p. 45-52, 2014.
- MALLERON, N. et al. **On the use of a high-performance framework for efficient model coupling in hydroinformatics.** Environmental Modelling & Software, v. 26, n. 12, p. 1747-1758, 2011.
- MARCHI, L. et al. **Characterisation of selected extreme flash floods in Europe and implications for flood risk management.** Journal of Hydrology, v. 394, n. 1, p. 118-133, 2010.
- MARENGO, J. A. **Água e mudanças climáticas.** Estudos Avançados, v. 22, n. 63, p. 83-96, 2008.
- MARK, O. et al. **Potential and limitations of 1D modelling of urban flooding.** Journal of Hydrology, v. 299, n. 3, p. 284-299, 2004.
- MARMOOD, K.; YEVJEVICH, V. **Unstead Flow in Open Channels.** Water Resources Publications, Fort Collins, Colorado, USA, v. 1, 484 p., 1975.
- MCINTOSH, B. S. et al. **Environmental decision support systems (EDSS) development—challenges and best practices.** Environmental Modelling & Software, v. 26, n. 12, p. 1389-1402, 2011.
- MEENU R.; REHANA S.; MUJUMDAR, P. P. **Assessment of hydrologic impacts of climate change in Tunga–Bhadra river basin, India with HEC-HMS and SDSM,** Hydrological Processes, v. 27, p. 1572-1789, 2013.
- MOMO, M. R.; REFOSCO, J. C. **Arquitetura computacional baseada em computação GRID, aplicada a sistemas de informação geográfica na gestão de risco e alerta da bacia do rio Itajaí.** In: Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto-SBSR, Curitiba, PR, p. 8865-8872, 2011.
- MONTEIRO, K. A. et al. **Parâmetros morfométricos aplicados à bacia do rio Una (Pernambuco-Brasil) para identificar susceptibilidade a enchentes.** Revista Geográfica de América Central, v. 1, n. 52, p. 163-177, 2014.

MOORE, R. J.; BELL, V. A.; JONES, D. A. **Forecasting for flood warning.** Comptes Rendus Geoscience, v. 337, n. 1, p. 203-217, 2005.

MOTALLEBIAN, M.; HASSANPOUR, F. **A study of the locus of the erosion and sedimentation in Sistan River using HEC-RAS model.** International Journal of Scientific & Engineering Research, v. 4, n. 10, p. 1377-1387, 2013.

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.

NAOT, D.; NEZU, L; NAKAGAWA, H. **Towards the modelling of the hydrodynamic forces in compound open channel with vegetated flood plain.** In: Proceedings of Hydraulic Engineering - JSCE, v. 38, p. 437-442, 1994.

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.

NETO, A. R. et al. **Caracterização da Formação de Cheias na Bacia do Rio Una em Pernambuco: Simulação Hidrológica-Hidrodinâmica.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 20, n. 2, 2015. No prelo.

PIELKE, R. A. **Mesoscale Meteorological Modeling.** 3^a Ed., Academic Press, Fort Collins, USA, 693 p., 2002.

PIELKE, R. A. et al. **A Comprehensive Meteorological Modeling System – RAMS,** Meteorology and Atmospheric Physics, v. 49, p. 69-91, 1992.

PISTOCCHI, A.; MAZZOLI, P. **Use of HEC-RAS and HEC-HMS models with ArcView for hydrologic risk management.** In: Proc. Conference IEMSS, p. 24-27, 2002.

PLATE, E. J. **Flood risk and flood management.** Journal of Hydrology, v. 267, n. 1, p. 2-11, 2002.

POCH, M. et al. **Designing and building real environmental decision support systems.** Environmental Modeling & Software, v. 19, n. 9, p. 857-873, 2004.

PORTO, R. L. L., AZEVEDO, L. G. T. **Técnicas quantitativas para o gerenciamento de recursos hídricos,** Editora Universidade/UFRGS/ABRH, p. 15-95, 1997.

PRAMANIK, N.; PANDA, R. K.; SEN, D. **One dimensional hydrodynamic modeling of river flow using DEM extracted river cross-sections.** Water Resources Management, v. 24, n. 5, p. 835-852, 2010.

PRASKIEVICZ, S.; CHANG, H. **A review of hydrological modelling of basin-scale climate change and urban development impacts.** Progress in Physical Geography, v. 33, n. 5, p. 650-671, 2009.

RAHMAN, H. (Ed.). **Data mining applications for empowering knowledge societies**. IGI Global, 357 p., 2008.

RAO, K. H. V. D. et al. **Kedarnath flash floods: a hydrological and hydraulic simulation study**. Current Science, v. 106, n. 4, p. 598-603, 2014.

REDLER, R.; VALCKE, S.; RITZDORF, H. **OASIS4 – a coupling software for next generation earth system modelling**. Geoscientific Model Development, v. 3, n. 1, p. 87-104, 2010.

REMESAN, R. et al. **Effect of data time interval on real-time flood forecasting**. Journal of Hydroinformatics, v. 12, n. 4, p. 396-407, 2010.

REUSCH, B. (Ed.). **Computational Intelligence, Theory and Applications**. In: International Conference 8th Fuzzy Days, Dortmund, Alemanha, 769 p., 2004.

RODRIGUEZ, M. T. **Acoplamento do modelo hidrológico MGB ao modelo atmosférico WRF visando estimar vazão na bacia do rio Paraíba do Meio – AL/PE**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Alagoas, 103 p., 2012.

ROZANTE, J. R.; GONÇALVES, L. G. G.; VILA, D. A. **Combining TRMM and surface observations of precipitation: technique and validation over South America**. Weather and Forecasting, v. 25, n. 3, p. 885-894, 2010.

RUIN, I. et al. **Human exposure to flash floods–Relation between flood parameters and human vulnerability during a storm of September 2002 in Southern France**. Journal of Hydrology, v. 361, n. 1, p. 199-213, 2008.

SALAJEGHEH, A. et al. **Floodplain mapping using HEC-RAS and GIS in semi-arid regions of Iran**. Desert, v. 14, n. 1, p. 83-93, 2010.

SAMARASINGHE, S. M. J. S. et al. **Application of remote sensing and GIS for flood risk analysis: A case study at Kalu-Ganga River, Sri Lanka**. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science, v. 38, n. Pt 8, p. 110-115, 2010.

SANTILLAN, J. R. et al. **Development of a HEC RAS Model for Near--Real Time Flood Extent Monitoring in Marikina River, Philippines**. In: 1st Philippine Geomatics Symposium, University of the Philippines, 23-24 de Novembro, Diliman, Filipinas, 8 p., 2012.

SANTOS, I.; KOBIYAMA, M. **Aplicação do TOPMODEL para zoneamento hidrológico da bacia do rio Pequeno, São José dos Pinhais-PR**. In: Simpósio Brasileiro de Desastres Naturais, v. 1, p. 188-202, 2004.

SANTOS, K. A. **Modelagem do acompanhamento e controle de cheias em bacias hidrográficas de grande variação de altitude. Estudo de caso: Bacia do Rio Mundaú**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Pernambuco/PPGEC, 126 p., 2013.

SECTMA. **Plano Estadual de Recursos Hídricos de Pernambuco**, v. 8, Recife, 264 p., 1998.

SHARKEY, J. K. **Investigating Instabilities with HEC-RAS Unsteady Flow Modeling for Regulated Rivers at Low Flow Stages**. Dissertação de mestrado, University of Tennessee - USA, 117 p., 2014.

SHU, L.; FINLAYSON, B. ***Flood management on the lower Yellow River: hydrological and geomorphological perspectives***. Sedimentary Geology, v. 85, p. 285-296, 1993.

SIFONTES, V. E.; MOYA, R. M. P. **Modelación hidrológica con HEC-HMS en cuencas montañosas de la región oriental de Cuba**. Ingeniería Hidráulica y Ambiental, v. 33, n. 1, p. 71-80, 2012.

SILVA, B. C.; TUCCI, C. E. M.; COLLISCHONN, W. **Previsão de Vazão com Modelos Hidroclimáticos**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 11, n. 3, p. 15-29, 2006.

SILVA, B. C. et al. **Previsão hidroclimática de vazão de curto prazo na bacia do rio São Francisco**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 12, p. 31-47, 2007.

SILVA, E. R. **Abordagem multicriterial difusa como apoio ao processo decisório para a identificação de um regime de vazões ecológicas no baixo curso do rio São Francisco**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal da Bahia, 170 p., 2010.

SIMON, U.; BRUGGEMANN, R.; PUDENZ, S. **Aspects of decision support in water management—example Berlin and Potsdam (Germany) I—spatially differentiated evaluation**. Water Research, v. 38, n. 7, p. 1809-1816, 2004.

SIMONOVIC, S. P.; CARSON, R. W. **Flooding in the Red River Basin—Lessons from post flood activities**. Natural Hazards, v. 28, n. 2-3, p. 345-365, 2003.

SIMONOVIC, S. P. **Managing water resources: methods and tools for a systems approach**. Vodoprivreda, v. 40, p. 157-165. 2008.

SIMONOVIC, S. P. **A new methodology for the assessment of climate change impacts on a watershed scale**. Current Science, v. 98, n. 8, p. 1047-1055, 2010.

SOROOSHIAN, S. **Synthesis of hydrologic and system sciences in the development of rainfall-runoff models**. Applied mathematics and Computation, v. 17, n. 4, p. 279-298, 1985.

SOUZA, C. F.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. **Simulação hidrodinâmica via aquisição remota de dados**. In: Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 7 p., 2007.

SRDJEVIC B., **Advanced decision support tools in agriculture and water management**. In: International Conference on Sustainable Agriculture and European Integration Processes, Novi Sad, Serbia, 7 p., 2004.

SRHE. Atlas de Bacias - Hidrografia da Bacia do Rio Una, disponível no endereço: <http://www.srhe.pe.gov.br/documentos/PDF_Mapas/Bacias/Una_GL4_GL5_atlas2006.pdf>. Acesso em 10/02/2015.

SURIYA, S.; MUDGAL, B. V. **Impact of urbanization on flooding: the Thirusoolam sub watershed—a case study**. Journal of Hydrology, v. 412, p. 210-219, 2012.

TAKEUCHI, K. **Hydrological persistence characteristics of floods and droughts-Interregional comparisons**. Journal of Hydrology, v. 102, n. 1, p. 49-67, 1988.

THIELEN, J. et al. **The European flood alert system—Part 1: concept and development**. Hydrology and Earth System Sciences, v. 13, n. 2, p. 125-140, 2009.

TOTH, E.; BRATH, A.; MONTANARI, A. **Comparison of short-term rainfall prediction models for real-time flood forecasting**. Journal of Hydrology, v. 239, n.1, p. 132-147, 2000.

TREMBACK, et al. **The regional atmospheric modelling system**, In: Proceed. of Envirosoft 86, p. 601-608, Los Angeles, USA, 1986.

TRIPATHI, R. et al. **Climate change, urban development, and community perception of an extreme flood: A case study of Vernonia, Oregon, USA**. Applied Geography, v. 46, p. 137-146, 2014.

TUCCI, C. E. M.; CLARKE, R. T. **Adaptive forecasting with a conceptual rainfall-runoff model**. Hydrological Forecasting, p. 445-454, 1980.

TUCCI, C. E. M., **Modelos Hidrológicos**, 2ª Ed., Ed. UFRGS/ABRH, 669 p., 1998.

TUCCI, C. E. M., **Flood Flow Forecasting**, 54th WMO Executive Council Session, Geneva, Switzerland, 35 p., 2002.

TUCCI, C. E. M. **Gerenciamento integrado das inundações urbanas no Brasil**. Rega/Global Water Partnership South América, v. 1,n. 1, p. 59-73, 2004.

TUCCI, C. E. M.; COLLISCHONN, W. **Flood Forecasting**. The Journal of WMO Bulletin, v. 55, n. 3, 84 p., 2006.

TUCCI, C. E. M. et al. **Comparison of flow forecasts by runoff models: a case study from southern Brazil**. International Association of Hydrological Sciences, Publication, n. 280, p. 142-148, 2003.

TUCCI, C. E. M. et al. **Short-and long-term flow forecasting in the Rio Grande watershed (Brazil)**. Atmospheric Science Letters, v. 9, n. 2, p. 53-56, 2008.

UNWIN, D. M. et al. **Combining theoretical and physical laboratory modelling in the development of real time control algorithms.** Water Practice & Technology, v. 4, n. 1, 8 p., 2009.

VALERIANO, M. M.; ROSSETTI, D. F. **TOPODATA: Seleção de coeficientes geoestatísticos para o refinamento unificado de dados SRTM.** INPE, São José dos Campos, 76 p., 2010.

VAZE, J. et al. **Guidelines for Rainfall-Runoff Modelling: Towards Best Practice Model Application.** eWater Cooperative Research Centre, 50 p., 2011.

VIVONI, E. R. et al. **Real-world hydrologic assessment of a fully-distributed hydrological model in a parallel computing environment.** Journal of Hydrology, v. 409, n. 1, p. 483-496, 2011.

VOINOV, A.; SHUGART, H. H. **'Integronsters', integral and integrated modeling.** Environmental Modelling & Software, v. 39, p. 149-158, 2013.

WALEGA, A. **Application of HEC-HMS programme for the reconstruction of a flood event in an uncontrolled basin,** Journal of Water and Land Development. v. 18, n. 9, p. 13–20, 2013.

WATT, W. E. **A relation between peak discharge and maximum twenty-four hour flow for rainfall floods.** Journal of Hydrology, v. 14, n. 3, p. 285-292, 1971.

WHEATER, H. S. **Progress in and prospects for fluvial flood modelling.** Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, v. 360, n. 1796, p. 1409-1431, 2002.

WELSH, W. D.; PODGER, G. **Australian Hydrological Modelling Initiative: River System Management Tool (AHMI: RSMT): Functionality Specifications.** eWater Cooperative Research Centre, 45 p., 2008.

WELSH, W. D. et al. **An integrated modelling framework for regulated river systems.** Environmental Modelling & Software, v. 39, p. 81-102, 2013.

WERNER, M. et al. **The Delft-FEWS flow forecasting system.** Environmental Modelling & Software, v. 40, p. 65-77, 2013.

WYRICK, J. R. et al. **Using hydraulic modeling to address social impacts of small dam removals in southern New Jersey.** Journal of Environmental Management, v. 90, p. S270-S278, 2009.

YANG, S.; YANG, T. **Uncertainty Assessment: Reservoir Inflow Forecasting with Ensemble Precipitation Forecasts and HEC-HMS,** Adv. in Meteor., 11 p., 2014.

YING-JUN, D.; CHONG-CHONG, Y.; JIE, L. **A study of GIS development based on KML and Google Earth.** In: NCM'09 Fifth International Joint Conference on IEEE, p. 1581-1585, 2009.

YU, F. et al. **Analysis of historical floods on the Yangtze River, China: Characteristics and explanations.** Geomorphology, v. 113, n. 3, p. 210-216, 2009.

ZADEH, A. L. **Fuzzy Sets**, Information and Control, v. 8, p. 338-353, 1965.

ZEILER, M. **Modeling our world: The ESRI guide to geodatabase design.** ESRI Company, 202 p., 1999.

ZHAN, C. et al. **An efficient integrated approach for global sensitivity analysis of hydrological model parameters.** Environmental Modelling & Software, v. 41, p. 39-52, 2013.

ZOCCATELLI, D. et al. **Which rainfall spatial information for flash flood response modelling? A numerical investigation based on data from the Carpathian range, Romania.** Journal of Hydrology, v. 394, n. 1, p. 148-161, 2010.