

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS**

**MONITORAMENTO E ALERTA DE INUNDAÇÃO NO MUNICÍPIO DE
ITAJUBÁ (MG) ATRAVÉS DE MODELOS MATEMÁTICOS**

João Bosco Coura dos Reis

Itajubá (MG), fevereiro de 2014.

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS**

João Bosco Coura dos Reis

**Monitoramento e alerta de inundação no município de Itajubá (MG) através de
modelos matemáticos**

**Dissertação submetida ao Programa de Pós-
Graduação em Meio Ambiente e Recursos
Hídricos como parte dos requisitos para
obtenção do título de Mestre em Ciências em
Meio Ambiente e Recursos Hídricos.**

Área de concentração: Meio Ambiente e Recursos Hídricos

Orientadora: Prof. Dra. Nívea Adriana Dias Pons

Coorientador: Dr. Eymar Silva Sampaio Lopes

Itajubá (MG), fevereiro de 2014.

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS**

João Bosco Coura dos Reis

**Monitoramento e alerta de inundação no município de Itajubá (MG) através de
modelos matemáticos**

Dissertação aprovada por banca examinadora em 21 de fevereiro de 2014, conferindo ao autor o título de ***Mestre em Ciências em Meio Ambiente e Recursos Hídricos.***

Banca Examinadora:

Profa. Dra. Nívea Adriana Dias Pons - UNIFEI
(Orientadora)

Dr. Eymar Silva Sampaio Lopes - INPE
(Coorientador)

Dra. Sâmia Regina Garcia Calheiros - UNIFEI

Dr. Camilo Daleles Rennó - INPE

Itajubá (MG), fevereiro de 2014.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Mauá –
Bibliotecária Margareth Ribeiro- CRB_6/1700

R375m

Reis, João Bosco Coura dos
Monitoramento e alerta de inundações no município de
Itajubá(MG) através de modelos matemáticos / João Bosco
Coura dos Reis. -- Itajubá, (MG) : [s.n.], 2014.
95 p. : il.

Orientadora: Profª. Dra. Nívea Adriana Dias Pons.
Coorientador: Dr. Eymar Silva Sampaio Lopes.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá.

1. Geotecnologia. 2. Previsão de nível. 3. Regressão poli_
nomial. 4. Rio Sapucaí. I. Pons, Nivea Adriana Dias, orient. II.
Lopes, Eymar Silva Sampaio, coorient. III. Universidade Fe_
deral de Itajubá. IV. Título.

DEDICATÓRIA

A todo esforço e apoio do meu pai e todo amor da minha mãe.

AGRADECIMENTOS

São muitos agradecimentos. Devo agradecer até a quem não imagina que contribuiu para esta dissertação, mas que indiretamente me ajudaram, na forma de um sorriso, um abraço, uma conversa divertida em um momento de tensão... E agradeço, imensamente, a todos aqueles que me apoiaram e incentivaram no meu objetivo. Definitivamente, uma dissertação não é um trabalho individual.

Aos meus pais, João Bosco dos Reis e Edna Coura dos Reis. A esses dois, todo o meu agradecimento, por acreditarem em mim, por tudo! Meu irmão Thiago. Família, eu agradeço todo apoio e suporte dado a mim.

À minha orientadora, Profa. Dra. Nívea Adriana Dias Pons, os meus sinceros agradecimentos, por me orientar e ajudar nesses dois anos de muito aprendizado e evolução.

Dr. Eymar Silva Sampaio Lopes, pela coorientação e apoio que vem desde 2010. A sua ajuda foi imprescindível para eu chegar até aqui.

Agradeço a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudo e apoio financeiro. A Universidade Federal de Itajubá, ao Laboratório de Informações Hídricas pelo suporte e fornecimento dos dados. Aos grandes professores e pesquisadores que me incentivaram na carreira acadêmica.

Agradeço aos meus amigos de mestrado, grandes produtores de “ciência fina e robusta”. Vocês tornaram essa jornada muito mais fácil. Agradeço ao Thiago Lobão Cordeiro, pela amizade, pelas conversas, por todo o apoio. Aos amigos Marcos e Vinícius pela valiosa colaboração na fase final. Agradeço aos amigos de infância, aos amigos do Bonde.

E agradeço a quem é especial, ao meu amor, Mariane, pela paciência e incentivo.

Àqueles que não foram citados, mas que contribuíram, meus agradecimentos!

E a Deus pela saúde e pela vida.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABELAS	iii
RESUMO.....	iv
ABSTRACT	v
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Objetivos	3
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	4
2.1 Definições	4
2.2 Eventos extremos e população	6
2.3 Prevenção e mitigação dos efeitos das inundações	9
2.4 Modelos hidrológicos	11
2.5 Geotecnologia – TerraMA ²	14
3. MATERIAL E MÉTODOS	17
3.1 Área de estudo.....	17
3.1.1 <i>Descrição da bacia hidrográfica do rio Sapucaí</i>	17
3.1.2 <i>O município de Itajubá</i>	20
3.2 Material	26
3.2.1 <i>Dados de nível fluviométrico</i>	26
3.3 Metodologia	28
3.3.1 <i>Organização da série temporal de nível fluviométrico</i>	30
3.3.2 <i>Ajuste do modelo para previsão de nível</i>	33
3.3.3 <i>Elaboração da base de dados hidrológicos</i>	35
3.3.4 <i>Desenvolvimento do Sistema de Monitoramento e Alerta – TerraMA²</i>	36
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	41
4.1 Resultados da organização dos dados de nível do rio.....	41
4.2 Calibração e validação do modelo de regressão polinomial	45

4.3 Base de dados hidrológicos	57
4.4 Sistema de Monitoramento e Alerta de inundações.....	58
5. CONCLUSÕES.....	66
6. REFERÊNCIAS	69
APÊNDICE A.....	75

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Perfil esquemático do processo de enchente e inundação (MIN. CIDADES/IPT, 2007).....	6
Figura 2.2 - Padrão de ocorrência e vítimas de desastres no mundo. Fonte: Guha-Sapir, Hoyois e Below (2013).	8
Figura 2.3 - Diagrama Ilustrativo dos Principais Módulos do TerraMA ² (INPE, 2012).	15
Figura 3.1 - Divisão por trecho da Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí.....	18
Figura 3.2 - Rio Sapucaí no trecho da área urbana de Itajubá (MG).....	21
Figura 3.3 - Praça Getúlio Vargas. Ao fundo Escola Estadual Cel. Carneiro Junior. Data: 26/02/1919. Fonte: Pinheiro (2005).	23
Figura 3.4 - Praça Wenceslau Brás, próximo à casa do Pres. Wenceslau Brás. Data: 04/02/1945. Fonte: Pinheiro (2005).....	24
Figura 3.5 - Av. Cel. Carneiro Junior, em frente à Casa Dois Irmãos. Data: 17/01/1957 Fonte: Pinheiro (2005).....	24
Figura 3.6 - Rua Eng. Vicente Sanches, em frente ao Supermercado Pilar. Data: 16/01/1991. Fonte: Pinheiro (2005).....	25
Figura 3.7 - Av. Dr. Antônio Braga Filho. Conjunto Universitário da FEPI. Data: 02/01/2000. Fonte: Pinheiro (2005).....	25
Figura 3.8 - Localização das estações de coleta de dados.	27
Figura 3.9 - Fluxograma com as etapas de desenvolvimento do trabalho.	28
Figura 3.10 - Exemplo de homogeneização dos intervalos de leitura.	31
Figura 4.1 - Eventos de cheia do rio Sapucaí na estação Santa Rosa.....	42
Figura 4.2 - Eventos de cheia do rio Sapucaí na estação dos Borges.	42
Figura 4.3 - Eventos de cheia do rio Santo Antônio na estação Água Limpa.	43
Figura 4.4 - Eventos de cheia do rio Sapucaí na estação Cantagalo.	43
Figura 4.5 - Eventos de cheia do rio Santo Antônio na estação Delfim Moreira.	44
Figura 4.6 - Eventos de cheia do rio de Bicas na estação Santana.	44
Figura 4.7 - Eventos de cheia do rio Sapucaí na estação São Pedro.	45
Figura 4.8 – Evento 1: níveis previstos (3 e 4 horas) e o observado no rio Sapucaí: Santa Rosa <i>versus</i> Água Limpa.	52

Figura 4.9 - Evento 2: níveis previstos (3 e 4 horas) e o observado no rio Sapucaí: Santa Rosa <i>versus</i> Água Limpa.	53
Figura 4.10 - Evento 1: níveis previstos (3 e 4 horas) e o observado no rio Sapucaí: Santa Rosa <i>versus</i> Santana.	54
Figura 4.11 - Evento 2: níveis previstos (3 e 4 horas) e o observado no rio Sapucaí: Santa Rosa <i>versus</i> Santana.	55
Figura 4.12 - Evento 1: níveis previstos (3 e 4 horas) e o observado no rio Sapucaí: Santa Rosa <i>versus</i> São Pedro.	56
Figura 4.13 - Evento 2: níveis previstos (3 e 4 horas) e o observado no rio Sapucaí: Santa Rosa <i>versus</i> São Pedro.	57
Figura 4.14 - Utilização do MDE para extração da rede de drenagem e das bacias do trecho do Alto Sapucaí, gerados no TerraHidro.	58
Figura 4.15 - Interface do módulo de configuração do TerraMA ²	60
Figura 4.16 - Evolução dos alertas gerados pela execução do modelo de análise Analises_PCDs.	61
Figura 4.17 - Interface <i>web</i> apresentando os resultados da análise com PCDs (Analises_PCDs).	62
Figura 4.18 – Analise_SantaRosa(AguaLimpa_prev4h) indicando o estado de atenção.	63
Figura 4.19 - Evolução dos alertas previstos através da estação Santana.	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Características Fisiográficas da Bacia do Rio Sapucaí e do Alto Sapucaí. Fonte: Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí (2010).....	19
Tabela 3.2 - Cota da vazante em cada estação. Fonte: LIH (2013).....	32
Tabela 3.3 - Níveis de alerta das estações. Fonte: LIH (2013).....	39
Tabela 3.4 - Níveis de alerta disponíveis no TerraMA ²	39
Tabela 4.1 - Número de eventos de cheia.	41
Tabela 4.2 - Coeficientes R ² definidos pelo ajuste polinomial cúbico: nível em Santa Rosa versus nível nas estações a montante.....	46
Tabela 4.3 - Estatísticas da regressão cúbica: Santa Rosa (t+3h) versus Água Limpa.	48
Tabela 4.4 - Estatísticas da regressão cúbica: Santa Rosa (t+4h) versus Água Limpa.	48
Tabela 4.5 - Estatísticas da regressão cúbica: Santa Rosa (t+3h) versus Santana.	49
Tabela 4.6 - Estatísticas da regressão cúbica: Santa Rosa (t+4h) versus Santana.	49
Tabela 4.7 - Estatísticas da regressão cúbica: Santa Rosa (t+3h) versus São Pedro.	50
Tabela 4.8 - Estatísticas da regressão cúbica: Santa Rosa (t+4h) versus São Pedro.	50
Tabela 4.9 - Resultados das estatísticas: Santa Rosa versus Água Limpa (previsão de 3 horas).	51
Tabela 4.10 - Resultados das estatísticas: Santa Rosa versus Água Limpa (previsão de 4 horas).	51
Tabela 4.11 - Resultados das estatísticas: Santa Rosa versus Santana (previsão de 3 horas).	53
Tabela 4.12 - Resultados das estatísticas: Santa Rosa versus Santana (previsão de 4 horas).	53
Tabela 4.13 - Resultados das estatísticas: Santa Rosa versus São Pedro (previsão de 3 horas).	55
Tabela 4.14 - Resultado das estatísticas: Santa Rosa versus São Pedro (previsão de 4 horas).	55

RESUMO

REIS, J. B. C. **Monitoramento e alerta de inundação no município de Itajubá (MG) através de modelos matemáticos**. 2014. 95 f. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá (MG). 2014.

Eventos naturais possuem energia suficiente para causar grandes transformações na paisagem e capacidade de desencadear desastres quando cruzam com ocupações humanas. No Brasil, a falta de planejamento para ocupações de bacias hidrográficas expõe a população aos perigos hidrometeorológicos, principalmente durante o período chuvoso, quando ocorrem com maior frequência eventos pluviométricos intensos e prolongados. Diante deste cenário, tem-se buscado novas formas de mitigação e adaptação aos efeitos causados pelos eventos extremos e, dentro das medidas não estruturais, o uso de geotecnologias para criação de sistemas de monitoramento e alerta surgem como uma importante ferramenta de prevenção para casos de inundações. Nesse contexto, o trabalho propôs a criação de um sistema de monitoramento e alerta de inundações para o município de Itajubá (MG), baseado na aplicação de técnicas estatísticas, como regressão cúbica, a fim de gerar a previsão do crescimento de nível do rio em uma seção de interesse, utilizando registros de níveis fluviométricos. A área de estudo foi município de Itajubá, na região sul do Estado de Minas Gerais, em razão da periodicidade de ocorrência de eventos de inundações no rio Sapucaí, que é o principal rio que atravessa a área urbana do município. Após ajuste e calibração do modelo matemático, o mesmo foi implementado na plataforma TerraMA², resultando em um sistema de monitoramento capaz de produzir alertas consistentes com 3 e 4 horas de antecedência, que apresentaram alta correlação entre os dados observados e a série prevista. Este sistema de alerta pode auxiliar a tomada de decisões, fornecendo às autoridades uma ferramenta que sirva ao propósito de gerar uma estimativa confiável de crescimento de nível do rio, com objetivo de reduzir, principalmente, a perda de vidas e os danos materiais.

Palavras-chave: Geotecnologia. Sistema de monitoramento. Previsão de nível. Regressão polinomial. Rio Sapucaí.

ABSTRACT

REIS, J. B. C. **Monitoring and early warning in the municipality of Itajubá (MG) through mathematical models**. 2014. 95 p. Dissertation (Master's degree in Environment and Water Resources) – Federal University of Itajubá, Itajubá (MG). 2014.

Natural events have enough energy to cause major changes in the landscape and potential to trigger disasters when intersect with human occupations. In Brazil the lack of planning for occupations watershed exposes the population to hydrometeorological hazards, especially during the rainy season, when intense and prolonged rainfall events occur more often. Currently the world has looked for new forms to mitigate and adapt to the effects caused by extreme events, and within the non-structural measures, the use of geotechnologies for creating monitoring and early warning systems appear as an important prevention tool in case of flooding. In this context, the dissertation proposed the development of a system of monitoring and flood warning for the municipality of Itajubá, based on the application of statistical techniques, as cubic regression, in order to forecast the growth of river levels in a section of interest, using records of river levels. The study area was the the municipality of Itajubá, in southern Minas Gerais state, due to the frequency of occurrence of flood events in Sapucaí river, which is the main river that runs through the urban area. A great challenge for the implementation of monitoring and early warning systems in the region is due to lack of data and information about the watershed. After adjustment and calibration of the mathematical model, it was implemented in the TerraMA² platform, resulting in a monitoring system, that despite the limitation of the analysis method used, it was able to produce consistent alerts of 3 and 4 hours in advance, which showed high correlation between the observed data and the predicted series. This early warning system can assist the decision makers, providing to authorities a tool that serves the purpose of generating a reliable estimate of growth river level, in order to reduce the loss of life and damage to properties.

Key words: Geotechnology. Monitoring system. Level forecasting. Polynomial regression. Sapucaí river.

1. INTRODUÇÃO

A natureza tem apresentado, durante toda sua história, eventos naturais de origem tanto da dinâmica interna (tectonismo, vulcanismos, movimentos epirogênicos e orogênicos, entre outros), quanto da dinâmica externa da Terra (eventos hidrológicos, meteorológicos, ação de micro-organismos, intervenções humanas, por exemplo), que atuam na modelagem e na dinâmica da paisagem. Muitos desses eventos possuem energia suficiente para causar grandes transformações na paisagem e capacidade de desencadear desastres quando encontram populações humanas.

A frequência e a força dos eventos naturais tem provocado uma série de tragédias e de devastações que resultam em vítimas e em significativos prejuízos econômicos, principalmente para ocupações humanas mais vulneráveis - apesar dos desastres serem “democráticos”, teoricamente devendo atingir tanto sociedades mais desenvolvidas e preparadas, quanto pobres e vulneráveis. Uma das razões fundamentais para este tipo de acontecimento é que a população está crescendo rapidamente, aumentando sua vulnerabilidade aos perigos naturais com ocupações em áreas de risco, ao mesmo tempo em que é atingida por um grande número de eventos naturais extremos.

No Brasil, os desastres estão relacionados, na maioria dos casos, a eventos hidrometeorológicos e, por esta razão, é durante o período chuvoso de cada região, quando ocorrem com maior frequência eventos pluviométricos intensos e prolongados, que o País mais sofre com a ocorrência de desastres. Em virtude das características climáticas e geomorfológicas e pela falta de planejamento para ocupações de bacias hidrográficas, os eventos extremos produzem, conseqüentemente, os dois processos mais frequentes e que mais causam desastres no País: os movimentos de massa e as inundações.

O cenário de grandes catástrofes que tem ocorrido no Brasil e no mundo e diante das inúmeras vítimas e prejuízos econômicos tem demonstrado a limitação do governo em responder adequadamente aos eventos naturais extremos. Com isso, tem-se buscado novas formas de prevenir e mitigar os resultados causados por esses eventos, tanto através de medidas estruturais (construções físicas e técnicas de engenharia), quanto com medidas não estruturais (utilização de conhecimento,

práticas ou acordos para reduzir os riscos e impactos, sensibilização do público, treinamento, educação, planos de uso do solo, pesquisas e fontes de informação), sendo que, para uma efetiva prevenção de riscos, é importante a combinação destas medidas.

Atualmente, têm-se ampliado o uso e aplicação de geotecnologias para confecção de mapas, geração de dados e informações que auxiliam e orientam medidas de prevenção e mitigação de desastres. Outra estratégia possível, graças às geotecnologias, é a adoção de sistemas de monitoramento e alerta que, com o advento da tecnologia e o desenvolvimento de sistemas computacionais cada vez mais sofisticados, possuem a capacidade de trabalhar, para casos de inundações, por exemplo, com modelos matemáticos e hidrológicos, permitindo a construção de sistemas de alarme-resposta em tempo real. Porém, a utilização de modelos hidrológicos, exige uma grande quantidade de dados e de um amplo conhecimento em hidrologia, que dificultam a sua utilização e aplicação.

A falta de dados é latente no Brasil, onde, mesmo as bacias que possuem algum tipo de monitoramento, apenas dados de níveis fluviométricos e precipitação estão à disposição, o que limita o uso de modelos hidrológicos em bacias hidrográficas da região. Nesse contexto, este trabalho propõe o ajuste e utilização de modelos matemáticos e uma série de técnicas estatísticas para fazer a previsão de nível do rio em uma seção de interesse para compor um sistema de monitoramento e alerta de inundações em tempo real, que sirva ao propósito de estimar o crescimento do nível de um rio em locais críticos, com antecedência suficiente para a tomada de decisões por parte dos órgãos competentes.

1.1 Objetivos

O objetivo geral desta pesquisa é criar um sistema de monitoramento e alerta com antecedência para o município de Itajubá, utilizando somente os dados de nível fluviométrico.

Os objetivos específicos complementam o objetivo do trabalho, e são eles:

1. Selecionar e analisar séries históricas de dados de nível do rio em busca de eventos típicos de inundações e enchentes;
2. Ajustar modelos de regressão polinomial para prever o aumento do nível do rio Sapucaí em uma seção de interesse, a partir do nível observado em um ponto a montante, utilizando registros de níveis fluviométricos;
3. Extrair a rede de drenagem do trecho do Alto Sapucaí;
4. Delimitar as sub-bacias do trecho do Alto Sapucaí e selecionar as que apresentam potencial de captação de água em função da localização das estações de coleta de dados;
5. Desenvolver o Sistema de Monitoramento e Alerta na plataforma tecnológica TerraMA².

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Definições

A fim de facilitar o entendimento do tema e evitar confusões sobre a definição de alguns conceitos importantes, adotou-se as definições propostas por *United Nations International Strategy for Disaster Reduction (UNISDR) Terminology (2009)* para os seguintes conceitos: desastres, sistema de previsão e alerta, perigos hidrometeorológicos, prevenção, mitigação, vulnerabilidade, perigo e risco. A *UNISDR Terminology (2009)* visa promover, exatamente, o entendimento comum dos conceitos sobre desastres.

Desastre é uma séria perturbação das funcionalidades de uma comunidade ou sociedade, envolvendo impactos e perdas humanas, materiais, econômicas e ambientais, a qual excede a capacidade das comunidades e sociedades atingidas em lidar com os danos utilizando seus próprios recursos. Os desastres são provocados por eventos extremos e este só se configura em desastres quando se encaixam em pelo menos um dos critérios definidos por Guha-Sapir, Hoyois e Below (2013) no *Annual Disaster Statistical Review 2012*:

- 10 ou mais mortes;
- 100 ou mais pessoas afetadas;
- declaração de estado de emergência;
- pedido de assistência internacional.

Sistema de previsão e alerta é um conjunto de capacidades necessárias para gerar e disseminar alertas precisos e com antecedência, possibilitando que indivíduos, comunidades e organizações se preparem para agir apropriadamente quando atingidos por um perigo, diminuindo as perdas e os danos causados por eventos extremos.

A prevenção é evitar completamente os danos e impactos causados pelos perigos naturais através de ações e medidas tomadas antecipadamente; e mitigação é a diminuição ou limitação dos impactos que não podem ser prevenidos.

Perigo é um fenômeno perigoso, uma substância ou uma atividade humana que pode causar a perda de vida, danos ou outros impactos à saúde. Vulnerabilidade é a característica e circunstância de uma comunidade, sistema ou propriedade que a

torna susceptível aos efeitos dos perigos. Por fim, risco é a probabilidade de combinação que o perigo ocorra e atinja uma comunidade vulnerável.

Perigos hidrometeorológicos são processos, sistemas ou fenômenos meteorológicos e hidrológicos que podem causar perda de vida, danos ou outros impactos a saúde, além de danos às propriedades, serviços e a economia. Exemplos desses perigos são as inundações e enchentes, as quais são definidas a seguir.

De forma concisa Tucci (2002) explica que inundações ocorrem quando a precipitação é intensa ao ponto de que a quantidade de água que chega ao canal é superior a sua capacidade de drenagem.

Inundações e enchentes, segundo Amaral e Ribeiro (2011), são eventos naturais, derivados de eventos ou perigos de caráter hidrometeorológico que ocorrem periodicamente nos cursos d'água, deflagrados por chuvas, de acordo com sua intensidade, quantidade, distribuição e frequência, além de estarem relacionadas com as características físicas de cada região, como exemplo: taxa de infiltração de água no solo, condutividade hidráulica, grau de saturação, presença ou ausência de cobertura vegetal e das características geomorfológicas da bacia de drenagem. Somado às características naturais, a interferência antrópica pode intensificar os eventos em razão do uso e ocupação irregular das planícies e margens de rios, alterações das características da bacia hidrográfica (retificação e canalização dos cursos d'água e impermeabilização), disposição irregular de lixo e assoreamento dos cursos d'água.

Entretanto, enchentes e inundações podem ser considerados eventos distintos (Figura 2.1). Para o Ministério das Cidades/ Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) (2007), as enchentes são definidas como a “elevação do nível d'água no canal de drenagem devido ao aumento da vazão, atingindo a cota máxima do canal, porém, sem extravasar”. Inundações “representam o transbordamento das águas de um curso d'água, atingindo a planície de inundação ou a área de várzea”.



Figura 2.1 - Perfil esquemático do processo de enchente e inundação (MIN. CIDADES/IPT, 2007).

Atualmente, para áreas urbanas, outro conceito tem sido regularmente utilizado: a enxurrada. O conceito é explicado pelo Ministério das Cidades/ IPT (2007) como “o escoamento superficial concentrado e com alta energia de transporte que pode ou não estar associado a áreas de domínio dos processos fluviais.” As enxurradas ocorrem, principalmente, em grandes centros urbanos, onde a quase total impermeabilização da área por prédios, construções, ruas e avenidas pavimentadas, somado a ineficiência do sistema de drenagem prejudicado pela presença constante de lixo, causa a concentração e o escoamento superficial da água da chuva.

2.2 Eventos extremos e população

Nos últimos séculos, observou-se um rápido crescimento da população global, tendo dobrado desde 1960 e é estimado que ultrapasse a marca de 9 bilhões de pessoas no mundo até 2050 (UNFPA, 2001). Esta tendência populacional provoca, conseqüentemente, o aumento das atividades econômicas, industriais e da urbanização, as quais deflagram diversos efeitos no sistema terrestre. Como resultado dessa complexa relação de causa/efeito, as atividades antrópicas assumem sua responsabilidade nas mudanças vistas no sistema terrestre (STEFFEN *et al.*, 2005).

Há evidências de que o clima no planeta Terra está mudando rapidamente e gerando novos estresses para o Sistema Terrestre como um todo, inclusive para o

bem estar do homem. O relatório do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2007) assegura que o aquecimento do sistema climático é inequívoco, o que significa uma probabilidade maior do que 66% de que as mudanças sejam realidade. Desastres são desencadeados por eventos naturais extremos e, segundo o mesmo relatório, por conta do aquecimento global, eventos como ondas de calor, chuvas intensas e concentradas, estiagens, atividades de ciclones tropicais apresentarão um período de retorno cada vez menor.

Existem evidências de que as mudanças climáticas desencadeadas pelas atividades antrópicas tem mudado a frequência de eventos extremos. Os perigos hidrometeorológicos, como inundações e enchentes, tem se tornado mais frequentes. Milly *et al.* (2002) demonstram através de observações e análises que, com as mudanças na composição da atmosfera, também muda o clima na Terra, fazendo com que o ciclo da água fique mais intenso, com um consequente aumento do risco de grandes inundações.

Com as mudanças climáticas e com a população global em crescimento, as comunidades estarão progressivamente mais expostas aos riscos (STEFFEN *et al.*, 2004). McBean e Rodgers (2010, p. 875) destacam que “[...] o crescimento contínuo da população tem contribuído para a superlotação das áreas urbanas, levando pessoas a viver, por escolha ou circunstância, em áreas de risco [...]. Esta tendência tem colocado mais pessoas e comunidades em risco, particularmente em locais geograficamente vulneráveis [...]”.

Em 2012, os desastres causaram, mais uma vez, grande impacto na sociedade e no mundo. Foram reportados 357 desastres naturais que causaram a morte de mais de 9655 pessoas e aproximadamente 122,9 milhões de vítimas. O ano de 2012 ainda registrou uma quantidade de US\$ 157,3 bilhões em danos (GUHA-SAPIR, HOYOIS, BELOW, 2013). O rastro de destruição e danos causados pelos desastres são sentidos diretamente na economia, que se encarrega dos custos da reconstrução da área atingida e das paralisações decorrentes das interdições. A Figura 2.2 mostra a distribuição do número de vítimas ao longo dos anos e a tendência de aumento do número de desastres no mundo.

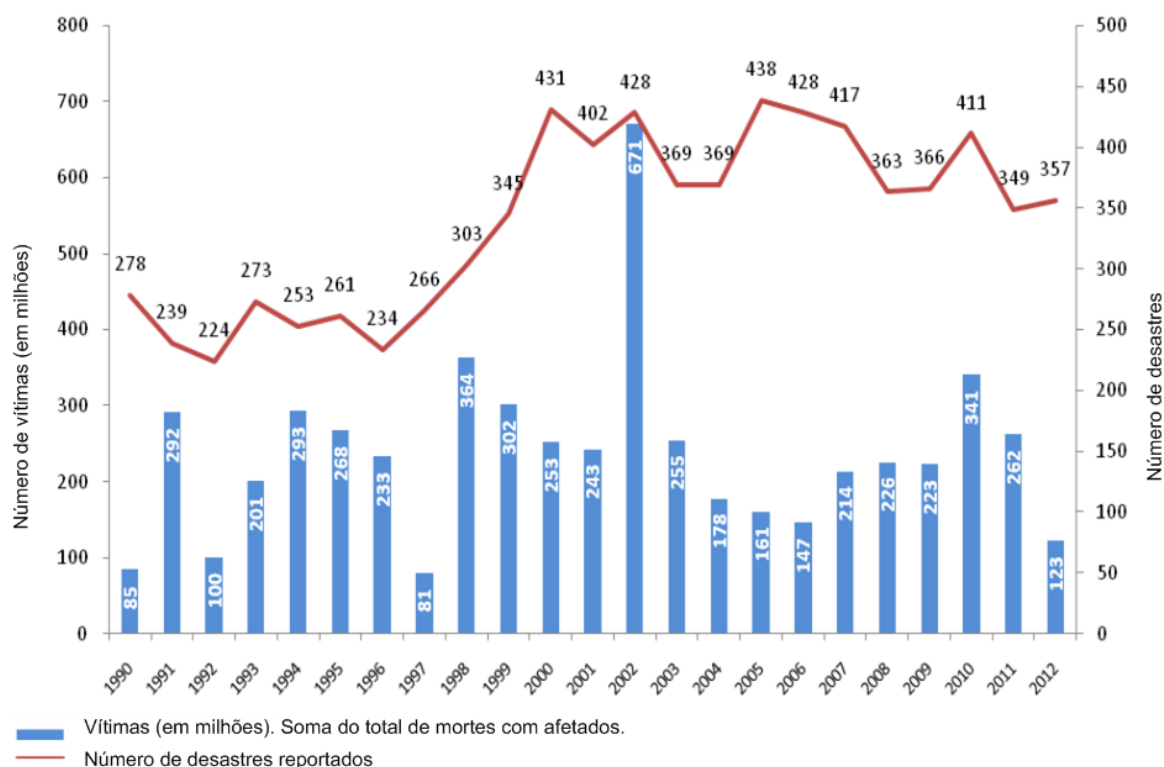


Figura 2.2 - Padrão de ocorrência e vítimas de desastres no mundo. Fonte: Guha-Sapir, Hoyois e Below (2013).

No Brasil, os desastres resultam principalmente da dinâmica externa da Terra e estão associados aos eventos de inundações e enchentes e movimentos de massa, os quais são desencadeados por eventos pluviométricos intensos e prolongados. A ocorrência de desastres no País também está atrelada ao seu intenso e desordenado processo de urbanização, à ocupação irregular das bacias hidrográficas, somado às características climáticas, geológicas e geomorfológicas (TOMINAGA, SANTORA, AMARAL, 2011).

O *Annual Disaster Statistical Review 2008* (RODRIGUEZ *et al.*, 2009) classificou o Brasil como um dos países mais afetados por inundações e enchentes, onde o número de eventos tem aumentado nos últimos anos do período de 1940 a 2008. Em 2011 o Brasil registrou o maior desastre da sua história, causando a morte de aproximadamente 900 pessoas na região serrana do Rio de Janeiro e um número de 3,7 milhões de vítimas durante todo o ano, sendo, predominantemente, vítimas de eventos hidrometeorológicos (GUHA-SAPIR *et al.*, 2012). Estes dados reforçam a

necessidade de implantação de sistemas de previsão e alerta de inundações nas áreas de risco do País.

2.3 Prevenção e mitigação dos efeitos das inundações

É necessária a ampliação da capacidade preventiva para atenuar os efeitos dos extremos climáticos na população. Para *United Nations International Strategy for Disaster Reduction*, os sistemas de monitoramento e alerta com antecedência são fundamentais para a redução dos riscos. Porém, para este propósito, o sistema deve integrar a comunidade técnica e científica, as autoridades e a sociedade, deve haver a previsão e detecção de eventos extremos para gerar alertas baseados nos conhecimentos científicos, necessidade de disseminação de alertas e informações para as autoridades e comunidades em risco que, com a posse dessas, tomem as medidas adequadas para se preparar contra os perigos naturais (UN-ISDR, 2004).

A Europa tem dado atenção para sistemas de alerta de inundação, reorientando as estratégias de gestão de risco. Priest, Parker e Tapsell (2011), demonstraram os benefícios econômicos do uso de alertas de inundação acoplado a uma combinação de medidas estruturais e não estruturais para gestão de risco de inundação. O sistema de monitoramento e alerta europeu, chamado de *Flood Warning Response and Benefits Pathways* (FWRBP), tem a função de monitorar a rede hidrográfica e fazer previsão de inundações, cujo propósito é garantir a segurança dos indivíduos, das comunidades e de reduzir os danos às propriedades durante os eventos de inundação. Os dois casos discutidos pelos autores - da Inglaterra e País de Gales e da cidade de Grimma na Alemanha - demonstram a necessidade de conciliar medidas estruturais e não estruturais para um funcionamento amplo e efetivo do sistema de monitoramento e, dessa forma, reduzir os danos econômicos e a vulnerabilidade da população frente aos perigos hidrometeorológicos. O artigo faz ressalvas para a importância de desenvolver dados cada vez mais confiáveis, de avançar na capacidade de previsão, na comunicação de alertas e de manter pesquisas que auxiliem a evolução do sistema de monitoramento e alerta.

Para Kobiyama *et al.* (2006), os sistemas de monitoramento e alerta em tempo real são fundamentais para prevenção e mitigação dos desastres naturais. Dessa forma, em áreas de risco, onde a atividade humana já está consolidada, os sistemas de

alerta são importantes ferramentas de auxílio para a redução de danos e prejuízos. Os autores apresentam os principais componentes para o sistema, sendo eles: a) monitoramento dos principais fatores desencadeadores de desastres; b) transmissão e coleta dos dados; c) modelagem e simulação dos fenômenos em tempo real; e d) orientação para instituições responsáveis e alerta para a população localizada nas áreas de risco.

Com a recorrência de eventos de inundações é necessária uma resposta do poder público, onde, atualmente, é dado destaque apenas para as medidas estruturais. Entretanto, deve haver uma combinação de medidas estruturais e não estruturais para um resultado mais seguro e eficiente. Para Tucci (2002, p. 629), “as medidas não estruturais, em conjunto com as anteriores (medidas estruturais) ou sem essas, podem minimizar significativamente os prejuízos com custo menor”. Nesse âmbito, Giglio e Kobiyama (2011) levantam a importância das medidas não estruturais e citam, como exemplos, as seguintes medidas: a) ampliação do sistema de monitoramento hidrológico; b) investigação da influência do uso e cobertura da terra nas inundações; c) zoneamento urbano; e d) educação ambiental. Para os autores, a ocupação de áreas de perigo e a ampla impermeabilização são fatores intrínsecos à ocorrência de inundações, sendo fatores tão importantes quanto a evolução das chuvas. Fato que evidencia a importância de reconhecer a influência dos diversos tipos de uso e ocupação do solo nas bacias hidrográficas para a qualidade e quantidade de água (KOBİYAMA *et al.*, 2001).

O Vale do Rio Taquari, no Rio Grande do Sul, conta com o Sistema de Previsão e Alerta de Enchentes (SPAÉ), região com frequente ocorrência de enchentes que afetam diretamente a população, já que esta ocupa a planície de inundação do rio, fato que torna imprescindível a implantação do SPAÉ. O Sistema proposto é dotado de cinco fases: 1) monitoramento pluviométrico da Bacia Hidrográfica do Rio Taquari-Antas; 2) monitoramento hidrológico que acompanha o nível da água do rio; 3) previsão hidrológica que realiza a projeção do nível da água; 4) mapeamento das áreas inundáveis; e 5) sistema de informação e gestão pública que aciona os Conselhos Municipais de Defesa Civil (FERREIRA *et al.*, 2007).

O Sistema de Monitoramento de Enchentes (SME) monitora e faz a previsão de cheias em um trecho da bacia hidrográfica do Rio Sapucaí, no sul do Estado de

Minas Gerais, permitindo informar a população sobre situações de risco com algumas horas de antecedência. Os alertas tornam possível a articulação do plano de contingência de maneira mais eficiente, orientando e organizando a resposta do órgão responsável durante os eventos de cheia. O SME é resultado de uma parceria da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) e a Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA), na qual o projeto conta com 18 estações de coletas de dados de precipitação e nível dos rios, distribuídas ao longo da bacia do Rio Sapucaí, desde a nascente, em Campos do Jordão (SP), até a cidade de Pouso Alegre (MG) (LIH, 2013). Os dados coletados propiciam um melhor entendimento da bacia e alimentam estudos e pesquisas na região.

2.4 Modelos hidrológicos

A modelagem hidrológica representa, de forma simplificada, os processos hidrológicos presentes na realidade. Embora simplificado, os modelos se tornaram importantes ferramentas de análises para estudos ambientais na área da hidrologia, pois estes ajudam na compreensão dos fenômenos físicos envolvidos e na previsão de diferentes cenários. No âmbito da gestão dos recursos hídricos voltado principalmente para estimativa de riscos e previsão de eventos extremos que apresentam perigo à sociedade, os modelos hidrológicos são capazes de auxiliar no levantamento de dados e informações e de orientar políticas públicas que atenuem os impactos causados pelos eventos hidrológicos.

Modelos são uma representação simplificada da realidade, que auxiliam no entendimento dos processos que a envolvem. Os modelos hidrológicos buscam simular o percurso da água desde a precipitação até a saída da água do sistema, por escoamento, evapotranspiração e drenagem profunda (RENNÓ, 2003).

Em geral os modelos hidrológicos servem para simular e representar o movimento da água na natureza, sendo um conjunto de equações, técnicas e procedimentos que descrevem os eventos hidrológicos. Devido à natureza simuladora do ciclo hidrológico em sua plenitude, os modelos exigem dados bastante completos da bacia hidrográfica, além de amplos conhecimentos em Hidrologia (OLIVO, 2004).

Para Tucci (1998), os modelos estão fortemente embasados e integrados com a natureza física do processo hidrológico, onde, partindo da precipitação e de um conjunto de parâmetros associados, é possível completar vazões desconhecidas ou estimar as mesmas para novos cenários existentes ou previstos para as bacias. Eles servem, ainda, para entender, monitorar e controlar diversos projetos de recursos hídricos, por exemplo:

- Entender melhor o comportamento hidrológico de uma bacia;
- Analisar a consistência da série de vazões e preenchimento de falhas;
- Prever vazão em tempo real;
- Dimensionar e prever cenários de planejamento, de acordo com o uso do solo;
- Simular os efeitos resultantes na modificação do uso do solo.

Mais detalhes sobre os conceitos, aplicações e classificações dos modelos hidrológicos, podem ser encontrados em Marinho Filho *et al.* (2012), Gomes e Varriale (2001) e Tucci (1998). Filho *et al.* (2012) ainda faz um breve levantamento histórico sobre a evolução dos modelos hidrológicos.

O grande número e variedade de modelos hidrológicos são classificados sob diferentes aspectos, como exemplo: tipo de variáveis utilizadas, tipo de relações entre essas variáveis, a forma de representação dos dados, a existência ou não de relações espaciais e se há existência de dependência temporal.

São definidos dois grandes grupos de modelos de acordo com a natureza das variáveis utilizadas. Um deles, o modelo estocástico, quando a chance de ocorrência de valores para as variáveis é levada em conta e o conceito de probabilidade é empregado na formulação do modelo; brevemente, o modelo é estocástico quando o relacionamento entre entrada e saída é estatístico. Por outro lado, caso os conceitos de probabilidade não sejam utilizados durante a elaboração do modelo, estes serão chamados de modelos determinísticos. Contudo, quando, para um valor aleatório de entrada, o sistema produz um único valor de saída, o modelo ainda assim é denominado determinístico.

São classificados também de acordo com o tipo de relações entre as variáveis. Modelos conceituais são complexos e exigem um bom conjunto de informações devido a tentativa de descrever todos os processos que envolvem determinado fenômeno, por estarem embasados na concepção física do processo e pelo forte rigor matemático. Os modelos podem ser empíricos quando utilizam relações baseadas em observações, preocupando-se apenas com as entradas e saídas, independentemente dos processos físicos. Estes modelos empíricos são simples e úteis no dia a dia, servindo como solução para trabalhos em bacias hidrográficas que dispõem de poucos dados e informações acerca de suas características. Porém, são modelos pouco robustos, visto que são específicos para a região e para o período para a qual foram estimados e ajustados, e são ainda bastante sensíveis às alterações das condições para as quais o modelo não previu, tais como chuvas extremamente altas, mudanças de uso do solo, etc.

Um modelo hidrológico é classificado como discreto quando objetiva a modelagem de períodos isolados, geralmente buscando representar eventos de cheia ou recessão. Já os modelos contínuos representam grandes períodos da série, normalmente contemplando épocas de comportamentos hidrológicos diferentes. Os modelos contínuos no tempo apresentam discretização temporal, denominada passo de cálculo, já que geralmente os fenômenos do ciclo hidrológico são representados por equações diferenciais que não possuem solução analítica. A escolha do intervalo de tempo no qual o modelo será executado depende do fenômeno estudado, da disponibilidade de dados e da precisão desejada.

Os modelos também são classificados de acordo com a existência ou não de relações espaciais. Modelos pontuais consideram que todas as variáveis de entrada e saída são representativas de toda a área estudada, ou seja, as variáveis são representadas em termos de média espacial. Já os modelos distribuídos representam a variabilidade espacial das características físicas da bacia hidrográfica, onde cada variável depende do tempo e do espaço.

E ainda podem ser classificados de acordo com a existência de dependência temporal: os modelos estáticos e os dinâmicos. Modelos são estáticos quando o fenômeno é descrito em determinado momento e os parâmetros não variam com o

tempo. Nos modelos dinâmicos os parâmetros variam no tempo, sendo assim, as variáveis são em função do tempo.

Com o conhecimento dos variados tipos de modelos hidrológicos, foi visto que, de forma geral, os modelos exigem uma grande quantidade de dados e informações da bacia hidrográfica, além de dados complexos dos aspectos físicos da bacia, de séries históricas de dados hidrometeorológicos, e de recursos humanos e computacionais - situação raramente encontrada nas bacias hidrográficas brasileiras. Diante dessa realidade, Olivo (2004) desenvolveu um modelo empírico que, mesmo negligenciando a complexa natureza física dos processos hidrológicos, gerou resultados satisfatórios necessários para gerar previsões de crescimento de nível do rio para ser utilizado em um sistema de alarme-resposta, utilizando para este fim, basicamente, dados de nível fluviométrico. O autor propôs uma série de técnicas como regressão múltipla por mínimos quadrados, modelos auto-regressivos e Modelos de Composição de Especialistas Locais (MCEL) para serem utilizados em um sistema de alerta-resposta em tempo real, como alternativa ao uso de técnicas mais complexas que necessitam de diversos dados e informações da bacia. A ferramenta desenvolvida é uma solução para regiões escassamente monitoradas e que dispõem de poucos dados e informações a respeito.

Técnicas estatísticas também foram utilizadas para tratar problemas hidrológicos por Castilho e Oliveira (2001). As autoras utilizaram modelo linear de propagação para criar um sistema de previsão hidrológica de vazões para a cidade de Governador Valadares (MG). O modelo escolhido reproduziu de maneira satisfatória a subida dos hidrogramas de cheia e a magnitude e o pico atingido pelos eventos.

No entanto, é preciso ter cuidado com a utilização de modelos de regressão linear, visto que os eventos hidrológicos apresentam comportamento não linear, com variações no tempo e no espaço (TUCCI, 1998).

2.5 Geotecnologia – TerraMA²

Desenvolvida no Departamento de Processamento de Imagem (DPI) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) em São José dos Campos, a plataforma computacional TerraMA² foi planejada para dar suporte ao monitoramento, análise e

alerta de diversos parâmetros ambientais. A plataforma é uma importante geotecnologia que satisfaz uma demanda crescente de aplicações, permitindo a construção de sistemas de monitoramento em tempo real (INPE, 2012).

Para a utilização da plataforma é necessário, fundamentalmente, a entrada de dados geoambientais (meteorológicos, climáticos, hidrológicos, geotécnicos, sociodemográficos, entre outros) e, também, de mapas de riscos e de vulnerabilidade. O núcleo do sistema é um módulo que, automaticamente, sobrepõe os dados geoambientais aos mapeamentos de áreas potencialmente de risco, onde, através de modelos de análises, é possível que situações de risco sejam identificadas e, conseqüentemente, sejam emitidos automaticamente alertas compatíveis com o nível de risco para usuários cadastrados no sistema (Figura 2.3).

Mais informações sobre a plataforma podem ser adquiridas através do sítio: <http://www.dpi.inpe.br/terrama2/>.

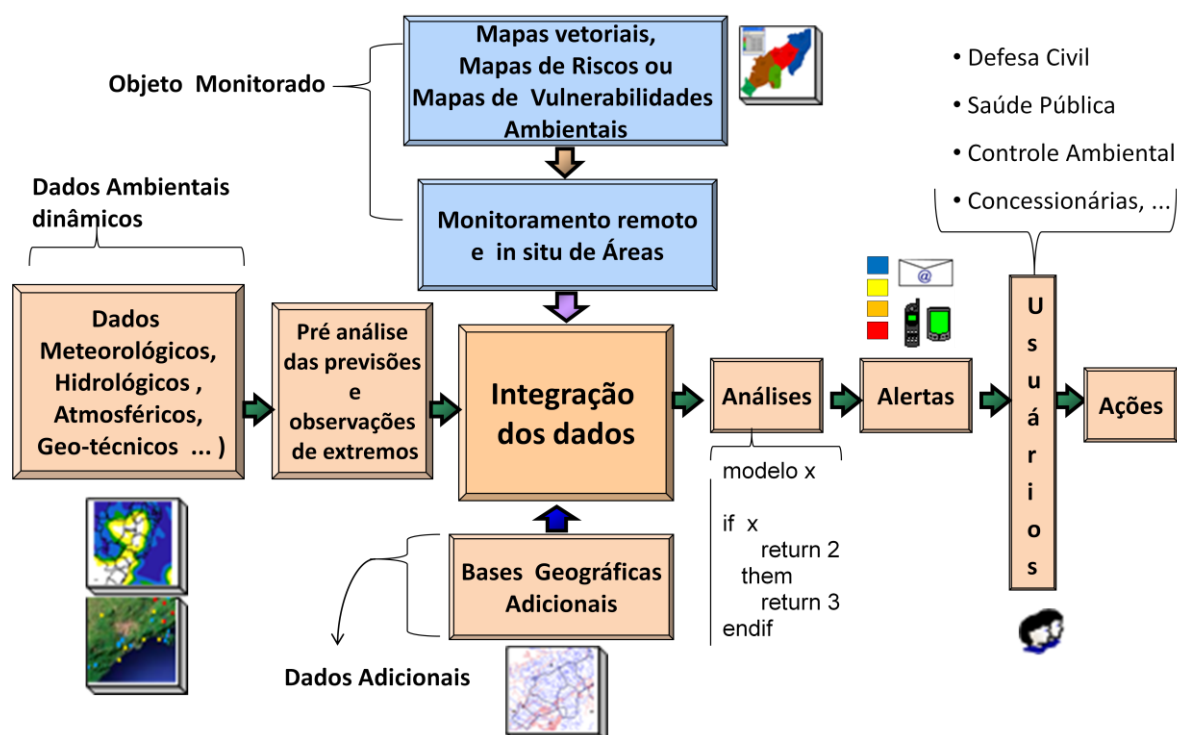


Figura 2.3 - Diagrama Ilustrativo dos Principais Módulos do TerraMA² (INPE, 2012).

Lopes, Magina e Alves (2011) fizeram uso do SISMA DEN (atual TerraMA²) para implantação de um sistema automático de alerta da qualidade da água no trecho

paulista do rio Paraíba do Sul. O sistema desenvolvido é composto por sondas automáticas multiparâmetro e por Plataforma de Coleta de Dados (PCDs) que coletam e fazem a transmissão automática dos dados via satélite. O sistema monitora a qualidade da água em tempo real através de um conjunto de parâmetros básicos, cujas variações temporal e espacial, podem indicar a ocorrência de poluição de natureza química ou orgânica.

A plataforma também dá suporte para o monitoramento de áreas susceptíveis à movimentos de massa. Rodrigues (2013) utilizou a plataforma para monitoramento de áreas susceptíveis a escorregamentos em Nova Friburgo (RJ) e para geração de cenários de alertas. Lopes, Namikawa e Reis (2011) demonstraram a aplicabilidade do TerraMA² para monitoramento e alerta de áreas urbanas nos municípios no entorno de Angra dos Reis (RJ) quanto ao risco de escorregamentos. Reis, Cordeiro e Lopes (2011) utilizaram a plataforma para monitoramento de eventos precipitantes extremos em Angra dos Reis (RJ), com potencial de deflagrar escorregamentos.

Reis, Santos e Lopes (2011) aplicaram a plataforma para monitorar e gerar alertas em tempo real para eventos extremos com potencial de causar inundações em pequenas bacias na Região Metropolitana de São Paulo. Utilizando os dados do Radar de São Roque e as informações provenientes do Hidroestimador, foi possível acompanhar a evolução dos eventos de cheia e a detecção do estado de alerta máximo, quando houve o transbordamento do rio Tietê. As análises feitas também propiciaram o acompanhamento das chuvas nas microbacias que alimentam o rio Tietê, o que possibilita a geração de alertas na região.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área de estudo

3.1.1 Descrição da bacia hidrográfica do rio Sapucaí

As informações a seguir foram extraídas do Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí (2010).

A bacia hidrográfica do rio Sapucaí integra a bacia do rio Grande, localizada na Região Sudeste, a qual é compartilhada por dois estados: São Paulo e Minas Gerais. O rio Sapucaí nasce na Serra da Mantiqueira, no município de Campos do Jordão, estado de São Paulo, a uma altitude de 1620 metros de altitude, percorrendo, aproximadamente, 343 km (34 km dentro do Estado de São Paulo e 309 km em Minas Gerais) até desaguar no Lago de Furnas, entre os municípios de Paraguaçu e Três Pontas, em Minas Gerais, com altitude de 780 metros.

A bacia é dividida em três trechos: alto, médio e baixo, e, haja vista que a área de estudo do trabalho é o município de Itajubá (MG), torna-se relevante conhecer o trecho do alto Sapucaí (Figura 3.1).

No trecho do alto Sapucaí encontram-se os municípios de Brasópolis, Conceição dos Ouros, Conceição das Pedras, Consolação, Delfim Moreira, Gonçalves, Itajubá, Maria da Fé, Marmelópolis, Paraisópolis, Pedralva, Piranguinho, Piranguçu, São José do Alegre, Sapucaí Mirim, Wenceslau Brás, Virgínia, Passa Quatro, Campos do Jordão (SP), Santo Antônio do Pinhal (SP) e São Bento (SP), apresentando uma área de 3.924 km².

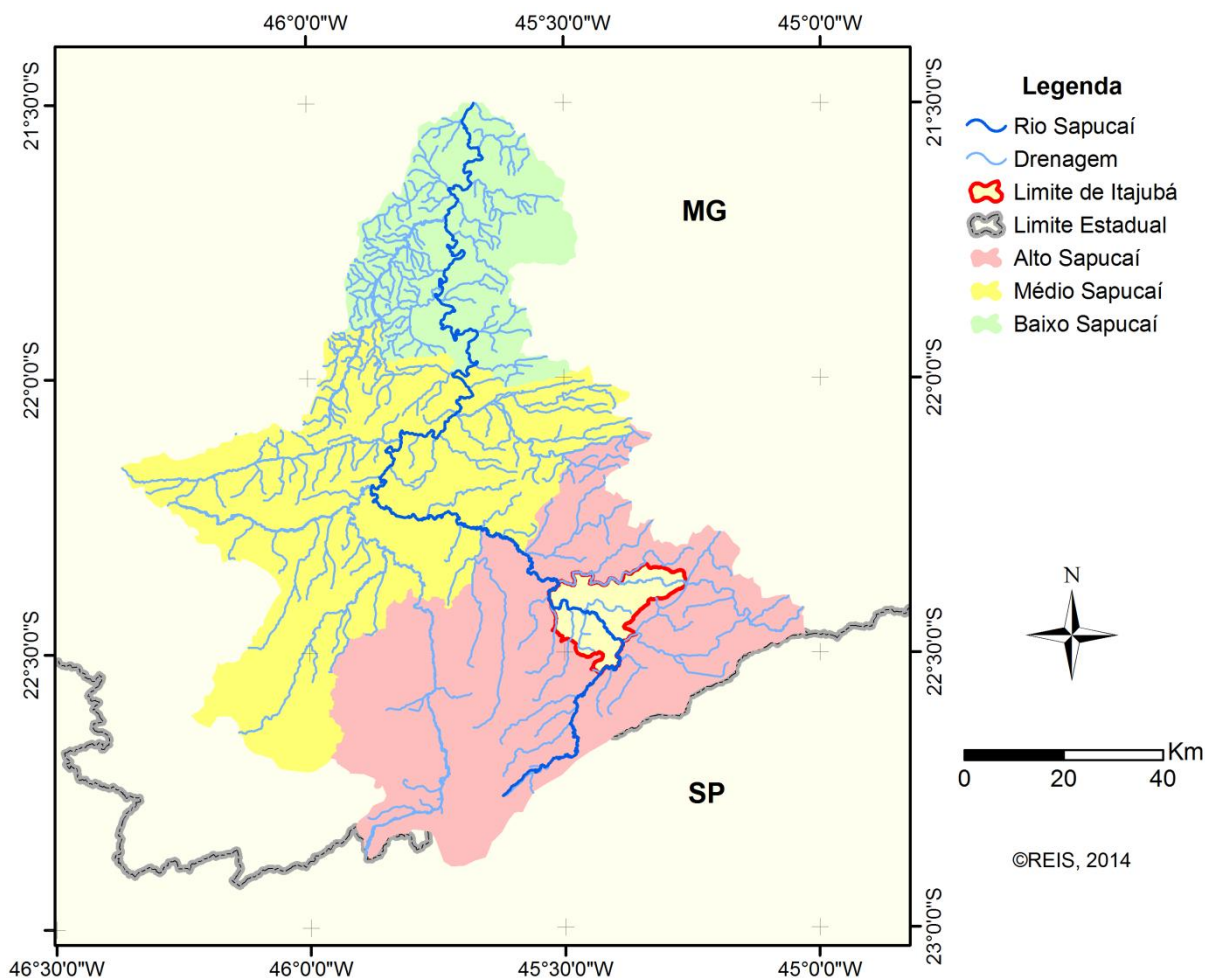


Figura 3.1 - Divisão por trecho da Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí.

O rio Sapucaí apresenta uma declividade média de 3,508 m/km, enquanto o trecho do alto Sapucaí apresenta 9,556 m/km. Paralelamente, as declividades da bacia variam de 25%, próximos às nascentes, até atingir valores médios de 0,05% no trecho de 12 km, local de planície onde se situa o município de Itajubá. Tais características favorecem a ocorrência de inundações no município, o que torna importante o desenvolvimento de sistemas de monitoramento na área. As informações sobre as características fisiográficas são apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Características Fisiográficas da Bacia do Rio Sapucaí e do Alto Sapucaí. Fonte: Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí (2010).

Características Gerais da Bacia do Rio Sapucaí		Unidade
Área da bacia	9.465,16	km ²
Extensão do Curso Principal	248	km
Perímetro Bacia	627,42	km
Cota da Nascente	1.650	m
Cota na Foz	780	m
Fator de Forma – Kf	0,154	-
Declividade Média do Rio Sapucaí	3,508	m/km
Coefficiente de compacidade – Kc	1,806	-
Sinuosidade do Rio Sapucaí	1,759	-
População – Censo 2007	553.323	-
Alto Sapucaí		Unidade
Área da bacia	3.924	km ²
Extensão do Curso Principal	84,76	km
Perímetro Bacia	395,45	km
Cota Inicio	1.650	m
Cota Fim	840	m
Fator de Forma – Kf	0,546	-
Declividade Média do Rio Sapucaí	9,556	m/km
Coefficiente de compacidade – Kc	1,768	-

A geomorfologia da região da bacia do rio Sapucaí é definida pelo domínio tectônico do Escudo Brasileiro, cuja morfologia inclui o domínio dos Planaltos do Sul de Minas, a partir da Serra da Mantiqueira.

O relevo predominante na região é em forma de topo arredondado, com vertentes côncavo-convexas, planícies aluvionares abertas, vales encaixados e drenagem dendrítica.

O clima do trecho do alto Sapucaí é do tipo tropical e temperado, sob influência da elevada altitude da região, com oscilações de temperaturas e predominância de ventos NE. Apresenta temperaturas médias anuais entre 18°C e 19°C. A precipitação média anual é de aproximadamente 1.500 mm, podendo ocorrer 1 ou 2 meses sem chuva. Nos meses de setembro a março predominam as temperaturas mais elevadas, atingindo o máximo em dezembro e janeiro. Já nos meses de maio a agosto as temperaturas são consideravelmente baixas, atingindo o mínimo em junho e julho.

A vegetação original do trecho do alto Sapucaí corresponde às características do domínio da Mata Atlântica. Entretanto, as pressões - representadas pela expansão urbana e de infraestrutura e pelas atividades econômicas - sobre a vegetação no passado até os dias atuais, provocaram grandes alterações das características naturais da região. Foi observado um intenso desmatamento de seus ecossistemas naturais, com substituição da vegetação nativa por áreas de pastagens, culturas e também, silviculturas, além da expansão das áreas urbanas e da malha viária.

Os 21 municípios do alto Sapucaí apresentam juntos uma população de aproximadamente 284.980 habitantes, sendo 211.587 na área urbana e 71.520 na zona rural, com densidade demográfica de 71,5 hab/km², de acordo com o Censo 2007 (PLANO DIRETOR DE RECURSOS HÍDRICOS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SAPUCAÍ, 2010).

3.1.2 O município de Itajubá

A área de estudo escolhida para o trabalho foi o município de Itajubá, situado na região sul do Estado de Minas Gerais. O município conta, segundo o Censo Demográfico de 2010 (IBGE, 2010), com uma população de, aproximadamente, 90.658 habitantes, ocupando uma área de 295 km².

Itajubá (MG) está localizada na bacia hidrográfica do Rio Sapucaí, mais precisamente no trecho do Alto Sapucaí (Figura 3.1). No seu percurso, o rio atravessa a área urbana do município e, conseqüentemente, torna-se um dos principais problemas a serem enfrentados pela prefeitura, tendo em vista a característica histórica de ocupação desordenada na sua planície de inundação, que

é considerada área de risco em razão da recorrência de eventos de cheia (Figura 3.2).

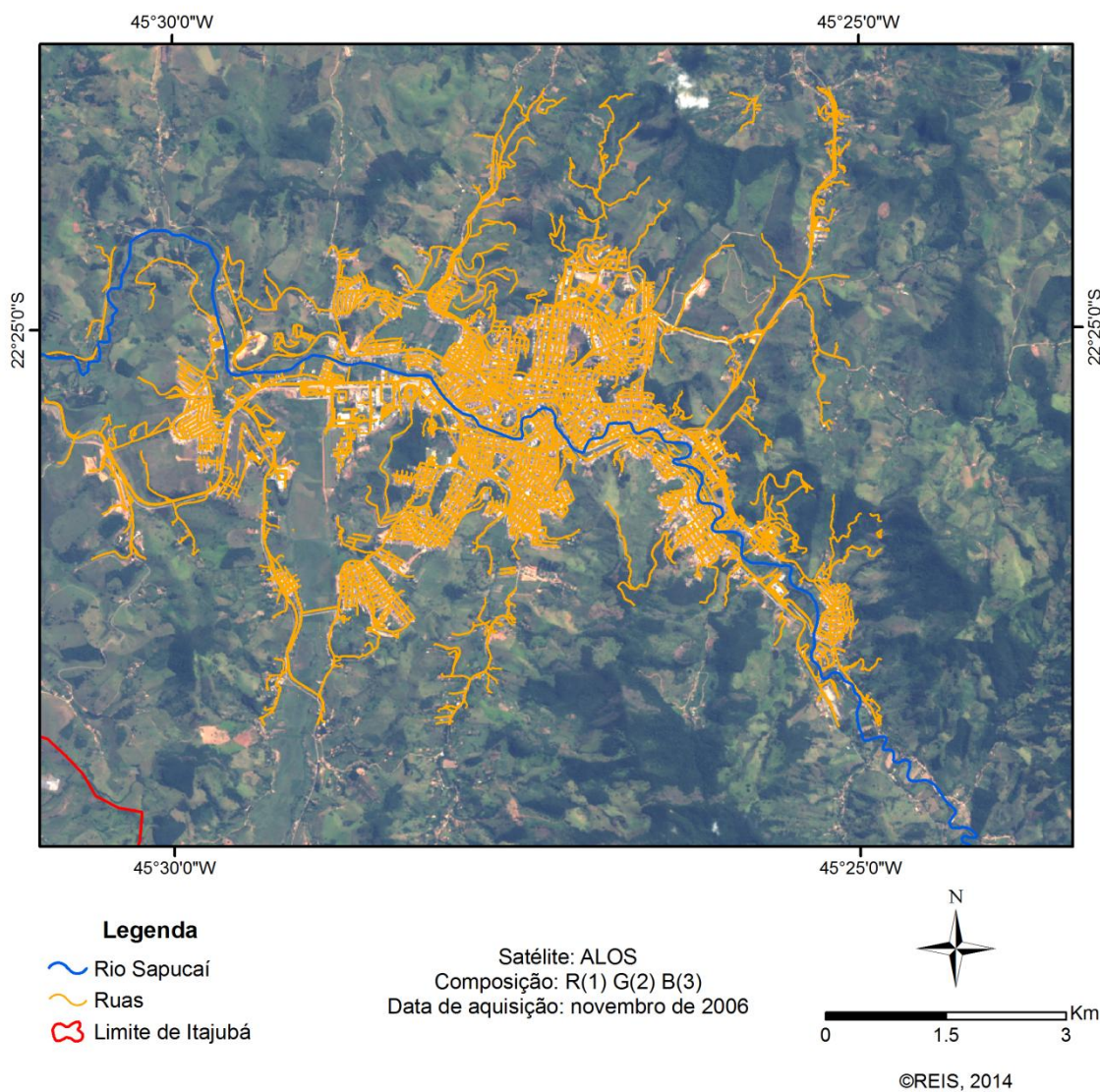


Figura 3.2 - Rio Sapucaí no trecho da área urbana de Itajubá (MG).

Segundo Moraes (2003) e Pinheiro (2005), o município foi atingido por 74 eventos de cheia desde 1821 e, por conta da magnitude e dos danos provocados, ganham destaque os eventos de 1874, 1945 e de 2000. As explicações para a recorrência destes eventos estão nas características hidrológicas e hidráulicas da bacia do rio Sapucaí, principalmente no trecho onde está situada a área urbana do município,

pois se encontra em uma planície aluvionar e com baixa declividade média do rio Sapucaí.

Um breve levantamento histórico permite identificar diversos eventos extremos ocorridos no município e suas características. Em 1874 uma grande cheia atingiu o município, sendo considerada, inclusive, como a maior já registrada devido ao nível atingido, alcançando a cota 848,14 m. Consta que o nível da água atingiu a Praça Theodomiro Santiago, área central do município (MORAES, 2003).

Durante os dias 20 e 22 de janeiro de 1979 houve um acumulo de chuva na ordem de 110 mm em 72 horas sobre a bacia, concentradas nas cabeceiras do rio Sapucaí, próximo a Campos do Jordão, e nos afluentes do rio Santo Antônio. A chuva foi particularmente mais intensa na bacia do rio Lourenço Velho, que, embora esteja a jusante de Itajubá, ainda assim foi suficiente para que as águas do rio transbordassem em diversos pontos do município (PINHEIRO, 2005).

No evento de 14 a 16 de janeiro de 1991, as chuvas apresentaram um comportamento crescente no sentido de Campos do Jordão para Delfim Moreira, com um acumulado variando de 90 a 160 mm em 72 horas. O transbordamento do rio Sapucaí apresentou uma longa duração pelo fato dos seus afluentes também terem apresentado a ocorrência de inundações, contribuindo para a longa duração dos transbordamentos na área urbana (PINHEIRO, 2005).

As fortes chuvas dos dias 2, 3 e 4 de janeiro de 2000 foram responsáveis por um dos maiores eventos de cheia de Itajubá. O acumulado de chuva atingiu valores máximos de 350 mm em 72 horas sobre a bacia, com uma maior concentração nas cabeceiras do rio Sapucaí, Lourenço Velho, Santo Antônio e em toda área de contribuição do rio Verde. A forte concentração de chuva na bacia do rio Sapucaí provocou o aumento de mais de 8 metros do rio na altura de Itajubá, ocasionando uma cheia generalizada no município (PINHEIRO, 2005).

Pinheiro (2005), analisando a distribuição de chuvas na bacia com potencial de desencadear inundações no município de Itajubá, fez uma importante contribuição. Notadamente, a região está vulnerável à ocorrência de eventos hidrometeorológicos, porém, estes eventos ocorrem, principalmente, quando estão associados a chuvas frontais distribuídas de forma geral por toda a bacia. Os eventos de chuvas que

desencadearam inundações, além da distribuição espacial, ainda apresentaram duração superior a 24 horas.

A ocorrência de chuvas bem distribuídas espacialmente pela bacia, atingindo ao mesmo tempo as áreas de contribuição da cabeceira do rio Sapucaí e também dos seus principais afluentes a montante de Itajubá, - rio das Bicas e Santo Antônio -, provocam o aumento do nível do rio Sapucaí quando combinados, produzindo uma onda de cheia em direção à área urbana itajubense e, ocasionalmente, nos eventos mais extremos, resultando no transbordamento do rio e na ocorrência de inundação.

As figuras 3.3, 3.4, 3.5, 3.6 e 3.7 apresentam imagens históricas de eventos de inundações ocorridos em Itajubá. As imagens foram extraídas do trabalho de Pinheiro (2005), no qual foi feita uma avaliação técnica e histórica das inundações no município, recorrendo também aos registros fotográficos para análise.



Figura 3.3 - Praça Getúlio Vargas. Ao fundo Escola Estadual Cel. Carneiro Junior. Data: 26/02/1919. Fonte: Pinheiro (2005).



Figura 3.4 - Praça Wenceslau Brás, próximo à casa do Pres. Wenceslau Brás. Data: 04/02/1945. Fonte: Pinheiro (2005).



Figura 3.5 - Av. Cel. Carneiro Junior, em frente à Casa Dois Irmãos. Data: 17/01/1957 Fonte: Pinheiro (2005).



Figura 3.6 - Rua Eng. Vicente Sanches, em frente ao Supermercado Pilar. Data: 16/01/1991. Fonte: Pinheiro (2005).

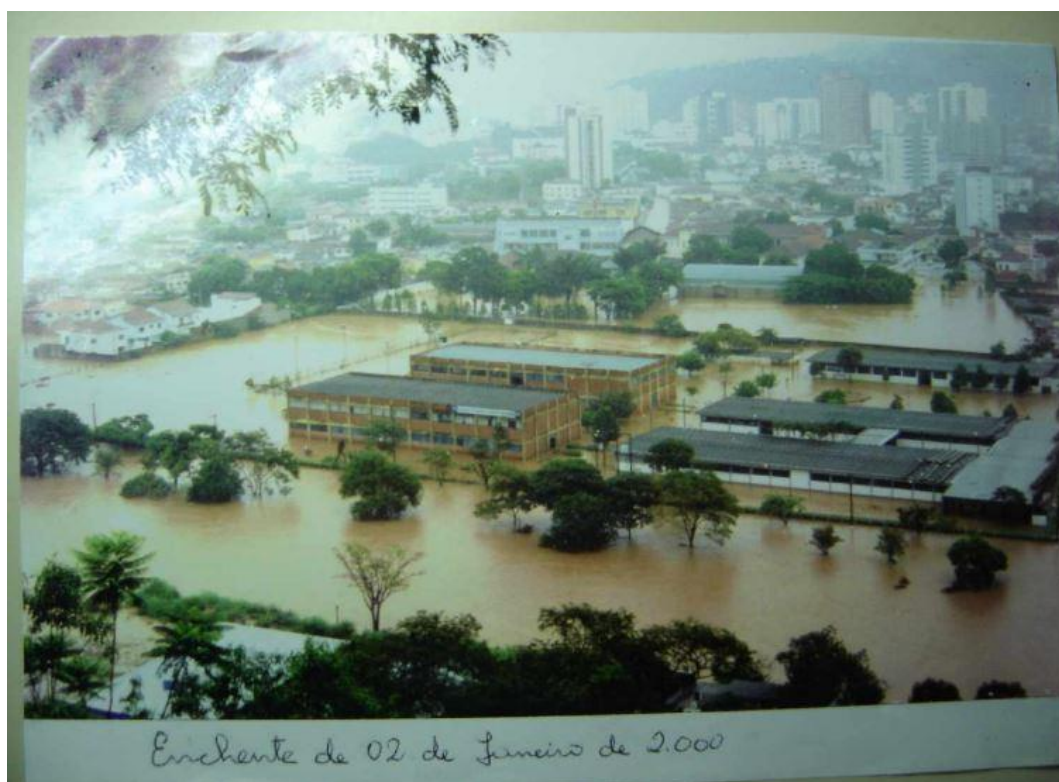


Figura 3.7 - Av. Dr. Antônio Braga Filho. Conjunto Universitário da FEPI. Data: 02/01/2000. Fonte: Pinheiro (2005).

3.2 Material

Para execução deste trabalho, utilizou-se dos seguintes recursos:

- ✓ Microsoft Office Excel® 2007;
- ✓ TerraHidro – Versão 0.3.3-x86;
- ✓ TerraMA² - Versão 3.0.2 para *Windows*;
- ✓ Base de dados hidrológicos;
- ✓ Dados de nível fluviométrico.

A função de cada ferramenta no desenvolvimento da pesquisa é descrita detalhadamente no capítulo 3.3 Metodologia.

3.2.1 Dados de nível fluviométrico

O conjunto de dados de nível fluviométrico obtido para a realização do trabalho pertence ao Sistema de Monitoramento de Enchentes (SME) do Rio Sapucaí (LIH, 2013).

O SME surgiu em 2002 a partir de um convênio entre a Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA) e a Universidade Federal de Itajubá (Unifei), com o objetivo de criar um sistema de monitoramento de dados hidrológicos. A instalação de uma rede de estações de coleta de dados tornou possível, através do monitoramento em tempo real, informar a população antecipadamente sobre a ocorrência de cheias. Atualmente o sistema conta com 18 estações de coleta de dados de precipitação e nível dos rios, distribuídos nas áreas do Alto e Médio Sapucaí, da nascente do rio Sapucaí em Campos do Jordão (SP), passando por Itajubá (MG), até a cidade de Pouso Alegre (MG).

As 18 estações em operação, assim como suas informações, os dados coletados e distribuição ao longo da bacia estão disponíveis no seu domínio na internet (www.enchentes.unifei.edu.br).

Tendo em vista que o objetivo do trabalho é criar um sistema de monitoramento e alerta com antecedência para o município de Itajubá utilizando somente os dados de nível fluviométrico, torna-se relevante o acesso aos dados das estações situadas à montante da área urbana itajubense. Sendo assim, das 18 estações existentes

atualmente, 7 delas foram consideradas relevantes para a pesquisa e disponibilizadas pelo SME.

Os dados de nível de rio adquiridos são do período de janeiro de 2009 a maio de 2013, referentes às seguintes estações de coleta de dados: Água Limpa, Borges, Cantagalo, Delfim Moreira, Santa Rosa, Santana e São Pedro. A localização e o rio a qual pertence cada estação podem ser visualizados na Figura 3.8.

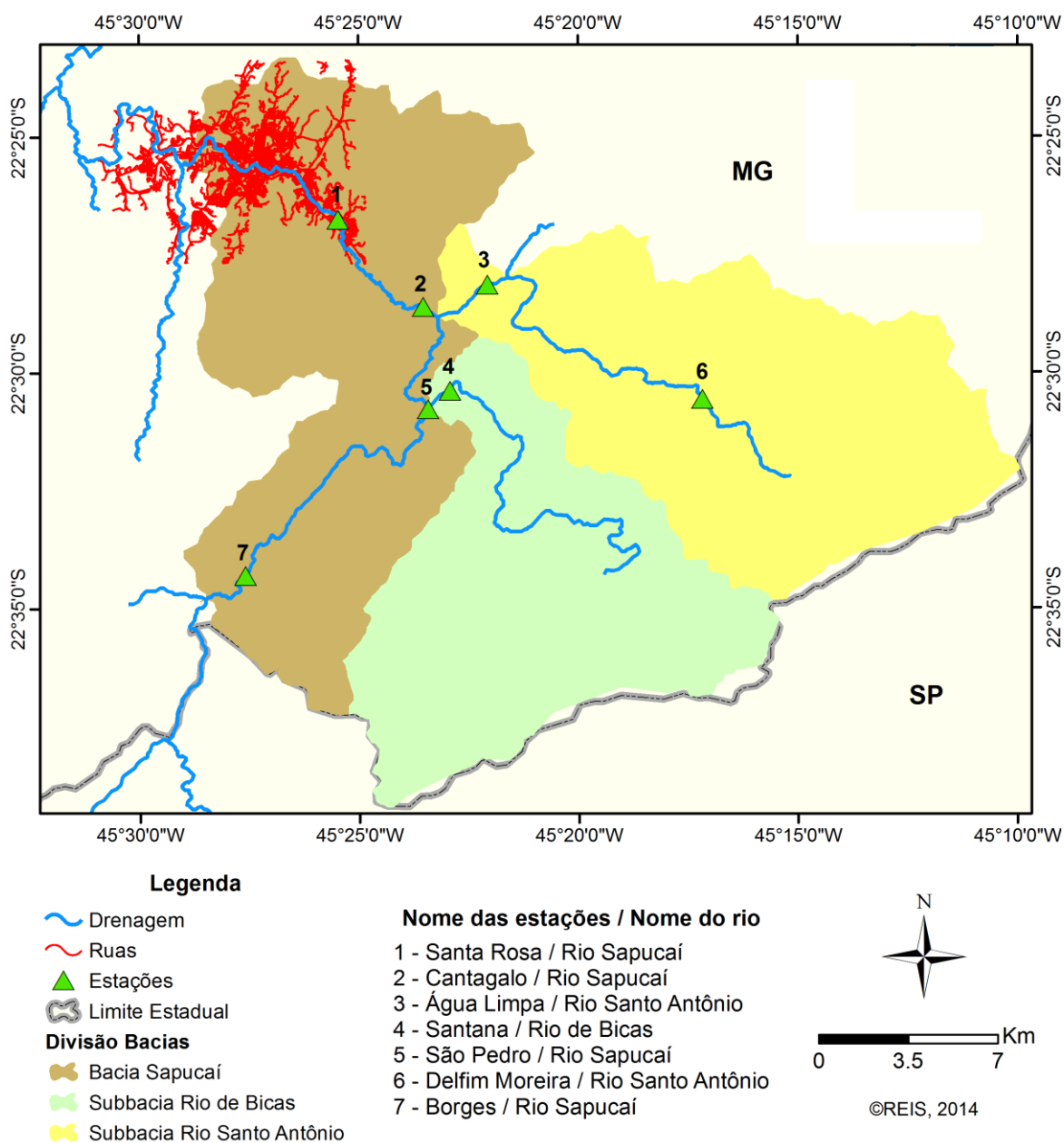


Figura 3.8 - Localização das estações de coleta de dados.

3.3 Metodologia

O trabalho será realizado de acordo com as etapas presentes no fluxograma da Figura 3.9. Tendo em vista um melhor entendimento sobre os procedimentos utilizados, seguem de forma sintética as etapas de desenvolvimento da pesquisa:

1. Revisão bibliográfica sobre o tema;
2. Coleta de dados de nível fluviométrico;
3. Definição da metodologia, no caso, escolha do modelo para previsão de nível do rio;
4. Caracterização da área de estudo;
5. Organização dos dados, ajuste do modelo e análise dos resultados no Excel;
6. Elaboração da base de dados hidrológicos (rede de drenagem e divisão por bacias hidrográficas) no TerraHidro;
7. Utilização da base de dados hidrológicos e do modelo ajustado na plataforma TerraMA²;
8. Criação do Sistema de Monitoramento e Alerta de inundação no município de Itajubá.

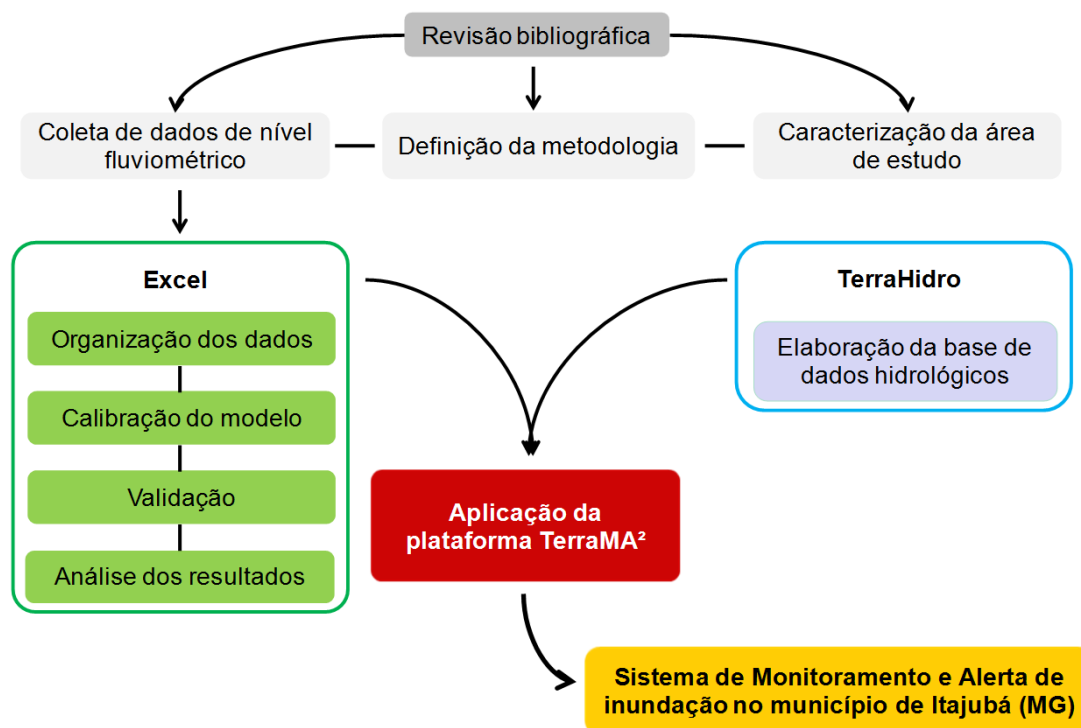


Figura 3.9 - Fluxograma com as etapas de desenvolvimento do trabalho.

Visto que este trabalho visa encontrar um modelo hidrológico para previsão de inundações coerente com a realidade brasileira, onde boa parte das bacias hidrográficas do País carece de informações – e quando tem, dispõe apenas de dados básicos, como nível do rio e precipitação -, foi feita uma revisão bibliográfica para buscar um modelo que exigisse poucas variáveis para análise e, embora simples, gerasse resultados confiáveis. Dessa forma foi definida a metodologia para ser utilizada neste trabalho. Sendo assim, serão utilizados os métodos propostos por Olivo (2004), compostos pela combinação de regressão polinomial.

Em seu trabalho Olivo (2004) desenvolveu um conjunto de técnicas estatísticas para prever com antecedência de 4 e 6 horas o crescimento do nível do rio Itajaí-Açu em Blumenau (SC), a partir da observação da variação do nível do rio no posto fluviométrico de Apiúna, situado a montante de Blumenau, utilizando apenas dados de nível fluviométrico. O resultado do trabalho demonstrou que o modelo ajustado para prever o nível do rio Itajaí-Açu em Blumenau teve uma elevada aderência aos dados observados. Essa constatação parte da observação do Coeficiente de Determinação, R^2 , - R^2 mede a fração da variação da variável dependente que é explicada pelo modelo ajustado (PINDYCK; RUBINFELD, 1999) -, que foi de 0,95 para o alcance de previsão de 4 horas e 0,93 para 6 horas. Os valores citados evidenciam que mesmo utilizando um modelo empírico, considerado limitado e simplificado, os resultados foram satisfatórios.

Dessa forma, tendo em vista o objetivo do trabalho em adequar um sistema de monitoramento e alerta em tempo real na realidade de escassez de dados no Brasil, e a confiabilidade dos métodos propostos por Olivo (2004), foram definidos tais métodos para aplicação na pesquisa.

Para dar suporte à construção do sistema de monitoramento e alerta, será utilizada a plataforma de Monitoramento, Análise e Alerta, denominada TerraMA² (INPE, 2012). A escolha da plataforma passa pela sua capacidade de dar suporte à construção de sistemas de monitoramento de parâmetros ambientais em tempo real. A forma de utilização da plataforma nesta pesquisa será apresentada no capítulo 3.3.4.

Em virtude da necessidade de dados geográficos, acerca da hidrologia, para serem utilizados como objeto monitorado e mapas adicionais no TerraMA², foi definido o

Sistema para Modelagem Hidrológica Distribuída, denominado TerraHidro, para a extração da rede de drenagem e delimitação automática das bacias hidrográficas. A escolha se dá em função da capacidade de extração automática de drenagem e delimitação de bacias, que auxilia o pesquisador e o ajuda a economizar tempo que gastaria com a extração manual, tornando o trabalho mais ágil. Para ROSIM *et al.* (2013), o TerraHidro é um sistema robusto, capaz de fornecer bons resultados em termos de extração de drenagem e delimitação de bacias hidrográficas.

Vale ressaltar que foi dada preferência para *softwares* gratuitos, *open source*, para serem utilizados no desenvolvimento do trabalho. Sendo assim, além de suas capacidades, a escolha das ferramentas citadas anteriormente também passaram por esta avaliação. O TerraMA² e TerraHidro fazem parte de um conjunto de bibliotecas desenvolvidas pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais disponibilizadas gratuitamente.

Foi utilizado o *software Microsoft Office Excel* (2007) (MICROSOFT, 2008) para tratamento da série temporal de nível fluviométrico e para o ajuste do modelo de regressão polinomial.

3.3.1 Organização da série temporal de nível fluviométrico


Os dados de nível fluviométrico recebidos de cada uma das sete estações de coleta de dados, compreendem o período de janeiro de 2009 a maio de 2013. Os intervalos entre as leituras variam, apresentando períodos com leituras mais frequentes, com intervalos menores, de 10 minutos, até períodos com intervalos de 1 hora. A variação do intervalo se deve ao fato da necessidade de aumentar a coleta de dados durante os eventos de precipitação, quando o monitoramento frequente, auxilia na observação do fenômeno de formação da onda de cheia. Os intervalos entre as leituras variam no tempo e também entre as estações.

Foi observado que em alguns momentos as leituras foram interrompidas, com intervalos maiores, o que pode ter sido provocado por manutenção nas estações, falhas de leituras, sensores descalibrados, queda no sinal da operadora que envia as leituras por mensagem de celular, entre outros fatores.

Sendo assim, seguiram-se as seguintes etapas para homogeneização dos tempos de intervalo entre as leituras das estações:

1. Eliminação dos períodos com dados falhos de cada estação;
2. Separação das leituras com rodadas horárias e exclusão das leituras com intervalos menores do que 1 hora. Exemplo na Figura 3.10.

Data	Cota
07/01/2009 20:10	1195,52078
07/01/2009 20:20	1195,52078
07/01/2009 20:30	1195,52729
07/01/2009 20:40	1195,52729
07/01/2009 21:00	1195,52729
07/01/2009 21:10	1195,52468
07/01/2009 21:20	1195,53119
07/01/2009 21:30	1195,52729
07/01/2009 21:50	1195,52208
07/01/2009 22:00	1195,52468
07/01/2009 22:10	1195,52468
07/01/2009 22:20	1195,52859
07/01/2009 22:30	1195,52729
07/01/2009 22:40	1195,53119
07/01/2009 22:50	1195,52859
07/01/2009 23:00	1195,53379
07/01/2009 23:10	1195,52859



Data	Cota
07/01/2009 21:00	1195,52729
07/01/2009 22:00	1195,52468
07/01/2009 23:00	1195,53379

Figura 3.10 - Exemplo de homogeneização dos intervalos de leitura.

Os dados de nível do rio apresentavam, originalmente, os valores em cotas altimétricas. Como as estações estão situadas em diferentes cotas, este fato poderia causar dificuldades na análise visual dos gráficos. Sendo assim, o valor de cota altimétrica foi transformado em nível, mantendo a unidade em metros. A transformação foi feita através da diferença entre os valores observados pelo valor da vazante de cada estação (Tabela 3.2). O resultado foi o nível do rio em metros.

Tabela 3.2 - Cota da vazante em cada estação. Fonte: LIH (2013).

Estação	Vazante
Santa Rosa	839,8
Água Limpa	851,4
Borges	915,6
Cantagalo	844,9
Delfim Moreira	1195,41
Santana	854,44
São Pedro	850,8

Após a homogeneização dos intervalos de leitura e a transformação de cotas altimétricas para nível, foi feita uma separação dos eventos de crescimento de nível do rio mais significativos. Em razão das necessidades e das peculiaridades do modelo adotado, tornou-se interessante apenas a fase de ascensão da onda de cheia. Sendo assim, primeiramente, buscou-se capturar toda a fase de ascensão da onda de cheia na estação Santa Rosa - seção de controle, ponto na qual será feita a previsão de nível -, e, posteriormente, foram selecionados dados de nível das outras seis estações com diferentes horas de antecedência.

Como visto na Figura 3.8, a estação Santa Rosa situa-se no início da área urbana do município de Itajubá, sendo assim, ela tornou-se a seção de controle, ponto para a qual é feita a previsão de nível. A previsão é feita a partir de variáveis explicativas das estações a montante (Cantagalo, Água Limpa, Delfim Moreira, São Pedro, Santana e Borges). Resumidamente, o objetivo é identificar as estações que apresentam maior relação com Santa Rosa, ou seja, quando há o crescimento do nível em alguma estação a montante, este crescimento explique a elevação do nível na seção de controle, estação Santa Rosa, horas depois, através de regressão polinomial.

Sintetizando, esta fase contou com as seguintes etapas:

1. Identificação e separação das fases de ascensão dos eventos de cheia na estação Santa Rosa;
2. A partir dos eventos selecionados em Santa Rosa, foi feita uma busca dos dados de cada uma das seis estações a montante, defasados com 1 a 11 horas em relação à Santa Rosa;
3. Para cada estação foi construído um vetor único com todos os respectivos eventos selecionados.

Com a seleção de todos os eventos de cheia disponível, partiu-se para a próxima fase, onde se fez uso destes eventos para calibrar e validar um modelo de regressão polinomial para previsão de níveis. Para isso foi feita a separação entre o conjunto de dados, entre os eventos que devem ser utilizados para a fase de calibração e aqueles para a fase de validação do modelo. Foram definidos dois eventos de cada estação para a validação.

3.3.2 Ajuste do modelo para previsão de nível

Amparado pelos resultados do trabalho de Olivo (2004) e diante da falta de dados e informações completas da bacia hidrográfica do Rio Sapucaí, foi feito o uso de modelos simplificados, no caso, modelo de regressão polinomial para prever o crescimento do rio na altura da estação Santa Rosa, localizada na área urbana itajubense.

A razão para tal escolha se deu pela aceitação da relação de causa e efeito entre o nível do rio observado em uma seção a montante e o nível observado posteriormente em uma seção de controle, onde seja possível explicar esta relação com antecedência e precisão suficientes para a previsão do crescimento do nível do rio, tendo em vista sua aplicação em um sistema de monitoramento e alerta.

Foi feita uma busca para encontrar variáveis explicativas para o crescimento do nível do rio na seção de controle, estação Santa Rosa, a partir da observação do nível nas estações de coleta de dados a montante: Água Limpa, Borges, Cantagalo, Delfim Moreira, Santana e São Pedro. Uma das opções para se determinar esta relação, é obtendo a correlação entre elas através de regressão polinomial. Em virtude da característica das curvas que retratam as ondas de cheias, foi adotado um modelo de regressão cúbica.

Definido o tipo de modelo de regressão polinomial, adequado ao perfil de uma curva de cheia, tem-se a construção de um modelo com as características a seguir:

$$Y(t + \textit{Alcance}) = F[X(t)]$$

Sendo que $Y(t+\text{Alcance})$ é o nível do rio em uma seção de controle para determinado alcance de previsão após o instante t ; e $F[X(t)]$ é o polinômio de terceiro grau, cuja variável independente $X(t)$, representando o nível do rio em estações a montante, explica o crescimento do rio em Y no tempo $t+\text{Alcance}$.

Sendo assim, para a fase de calibração, será usado o método dos mínimos quadrados ordinários para encontrar os melhores estimadores dos parâmetros β 's, que minimizem o erro quadrático da seguinte equação que representa a regressão cúbica adotada:

$$Y(t + \text{Alcance}) = \beta_0 + \beta_1 X(t) + \beta_2 X^2(t) + \beta_3 X^3(t) + \varepsilon(t)$$

Para verificar a influência das estações situadas a montante de Itajubá no nível observado na estação Santa Rosa, localizada no início da área urbana do município, foi feita uma análise exploratória dos dados, onde foram realizadas análises de regressão cúbica, com o objetivo de ajustar um modelo da seguinte forma:

$$NSR(t + H) = A_0 + A_1 * NX(t) + A_2 * [NX(t)]^2 + A_3 * [NX(t)]^3$$

Onde: $NSR(t+H)$ é o nível observado na estação Santa Rosa no instante $t+H$; H é o alcance da previsão; $NX(t)$ representa o nível medido em uma estação X , a montante de Santa Rosa, no instante t .

Como forma de testar a aderência da massa de dados ao modelo estimado, foi feito uso do Coeficiente de Determinação, ou R^2 , que foi gerado utilizando como variáveis explicativas os níveis do rio medidos nas estações de Água Limpa, Borges, Cantagalo, Delfim Moreira, Santana e São Pedro, e defasados em relação ao nível observado na estação Santa Rosa.

O ajuste, a validação e os resultados dos modelos polinomiais encontram-se no item 4.2. A validação foi feita a partir dos dois eventos selecionados de cada uma das três estações escolhidas como variável explicativa, para o alcance de previsão de 3 e 4 horas.

3.3.3 Elaboração da base de dados hidrológicos

O Sistema para Modelagem Hidrológica Distribuída, denominada TerraHidro, é um *plugin* do aplicativo TerraView, que faz uso da biblioteca geográfica TerraLib. Todo este ambiente computacional encontra-se em desenvolvimento na Divisão de Processamento de Imagens (DPI) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), com o objetivo de atender a demanda por ferramentas que auxiliem trabalhos e estudos na área de hidrologia. O aplicativo permite a geração automática de informações hidrológicas, reduzindo o tempo de processamento e trabalho, porém, sem o detrimento da qualidade dos resultados.

O TerraHidro depende de uma estrutura de dados que represente a topografia do terreno. Sendo assim, foi definido como base o modelo digital de elevação (MDE) *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) (JARVIS *et al.*, 2008). Os dados do SRTM apresenta resolução espacial de aproximadamente 90 metros na horizontal e 1 metro na vertical, e podem ser obtidos junto ao *United States Geological Survey* (USGS).

Para alimentar o Sistema de Monitoramento e Alerta desenvolvido no TerraMA², um dos objetivos específicos deste trabalho, foi necessária a extração da drenagem e a delimitação das bacias. A seguir, tem-se a descrição das etapas e dos parâmetros utilizados para geração dos dados através do TerraHidro. Mais detalhes e informações sobre o funcionamento do TerraHidro pode ser encontrado em ROSIM *et al.* (2013).

Para dar início, foram inseridos os dados do SRTM, - o MDE que será a base para geração dos dados hidrológicos -, através de um banco de dados criado no TerraView. Após a importação, o plano de informação do SRTM foi recortado utilizando o vetor da área do trecho do Alto Sapucaí.

Com o MDE importado e recortado para satisfazer apenas a área de interesse, foi acionado o *plugin* TerraHidro. Primeiramente, para extração da drenagem, foi preciso determinar o fluxo local e a área de contribuição. O próximo passo foi a extração da drenagem, onde foi preciso definir dois parâmetros: a área de contribuição e um limiar que define a área de contribuição mínima para que um ponto (pixel) pertença à rede de drenagem (quanto maior o limiar, menos densa é a rede de drenagem). No fim deste processo, foi gerada a rede de drenagem. Para delimitação das bacias, foi feita a segmentação da drenagem e, por fim, pela operação de mini bacias, foram geradas as bacias. Cada bacia corresponde a um segmento da drenagem. Como os dados são gerados, originalmente, em matriz, foi feita a transformação de matriz para vetor.

A seguir, são apresentadas as etapas para geração dos dados:

1. Importação de recorte do MDE;
2. Geração dos fluxos locais (*Flow Extraction*) utilizando o MDE;
3. Determinação da área de contribuição (*Contributing Area*) a partir dos fluxos locais;
4. Extração da drenagem (*Drainage Extraction*), utilizando como parâmetros a área de contribuição e o limiar (*Threshold*) de 50000 pixel/pontos;
5. Segmentação (*Segments*) da rede de drenagem;
6. Delimitação de bacias (*Mini Basins*) a partir da drenagem segmentada;
7. Transformação matriz → vetor.

Os resultados encontram-se no item 4.3.

3.3.4 Desenvolvimento do Sistema de Monitoramento e Alerta – TerraMA²

As etapas apresentadas a seguir, descrevem, de forma sucinta, o desenvolvimento do sistema de monitoramento e alerta na plataforma TerraMA², conforme o Manual do Usuário (LOPES, 2013) e também de seu domínio na internet: <http://www.dpi.inpe.br/terrama2/>.

A plataforma TerraMA² é um sistema operacional para monitoramento, análise e alerta de diversos parâmetros ambientais. Resumidamente, o sistema busca dados em servidores e incorpora à base de dados, a cada novo dado encontrado e incorporado ao banco de dados, é feita uma análise para verificar se existe ou não uma situação de risco. A análise pode ser feita através da comparação com o objeto a ser monitorado (mapas de riscos) ou de modelos de análises. Uma vez detectada uma situação de risco, é gerado um alerta e enviada uma notificação ao usuário. Os alertas também ficam disponíveis em uma página da *internet*.

O sistema é alimentado por três tipos de dados:

- Dados ambientais dinâmicos: dados que informam sobre as condições das variáveis;
- Objeto monitorado: dados que contém informações sobre a vulnerabilidade do objeto;
- Dados adicionais: outras informações que auxiliem a localização das áreas monitoradas, das populações e equipamentos vulneráveis ao evento analisado.

A plataforma é dotada de módulos e serviços, onde cada um desempenha uma ação dentro do sistema de monitoramento para a troca de informações geográficas. O TerraMA² é composto pelos seguintes módulos e serviços: módulo de administração, módulo de configuração, módulo de apresentação WEB, serviço de coleta de dados, serviço de análise, serviço de notificação, serviço de animação e serviço de gerência de planos.

Para auxiliar o usuário da ferramenta em suas variadas aplicações, o TerraMA² apresenta duas opções de banco de dados. Uma vez definido o objetivo e o que se pretende com a criação de um sistema de monitoramento, pode-se optar por um banco de operação ou uma base de dados para estudos. A diferença se dá pelas características, onde o banco de operação trabalha em tempo real, sendo alimentado por dados atuais de observação e previsão a cada intervalo de tempo, geralmente oriundos de servidores externos, da *internet*. O banco de estudo faz uso de dados do passado que muitas vezes estão armazenados na própria máquina;

este banco permite estudos e análises sobre eventos passados, colaborados pela possibilidade de reanálise.

Sendo assim, como os dados de nível fluviométrico utilizados neste trabalho são de eventos do passado, janeiro de 2009 a maio de 2013, e pretende-se realizar várias análises testes, optou-se pela criação de um banco de estudos.

Para o desenvolvimento do sistema foram utilizados:

- Dados de nível fluviométrico como dados ambientais dinâmicos;
- Base de dados hidrológicos gerados pelo TerraHidro, utilizados como dados adicionais.

Com o banco de dados criado e o módulo de administração ajustado, passou-se para a configuração do módulo de configuração. Nesta etapa foram definidas as análises a serem feitas pelo TerraMA².

Anteriormente, no item 3.3.2, foram definidas as estações e o tempo de antecedência para previsão, sendo assim, as análises de previsão de nível do rio Sapucaí foram feitas com base nos modelos de análise calibrados através de regressão polinomial.

Os níveis utilizados para detecção de estados críticos foram estabelecidos através das informações disponibilizadas pelo Laboratório de Informações Hídricas (LIH, 2013). Portanto, cada estação de coleta de dados utilizados nesta pesquisa possui parâmetros para considerar as possíveis situações dos rios: estado de Atenção ou Alerta (Tabela 3.10).

Tabela 3.3 - Níveis de alerta das estações. Fonte: LIH (2013).

Estações	Nível (m)	
	Atenção	Alerta
Santa Rosa	3,2	4,2
Delfim Moreira	0,59	1,59
Água Limpa	2,6	3,6
Borges	1,4	2,4
São Pedro	2,2	3,2
Santana	2,56	3,56
Cantagalo	2,1	3,1

O TerraMA² apresenta 5 opções de níveis de alerta (Tabela 3.11). Sendo assim, para este trabalho, foram adotados 4 níveis de alerta que estão em conformidade com o níveis estipulados pelo LIH, são eles: 0 – Normal (para situações que não apresentam perigo), 1 – Observação (quando o nível do rio começa a aumentar e se aproximar do próximo nível), 2 – Atenção (estado de atenção, para situações que o nível encontra-se em crescimento, atingindo níveis que, se ultrapassados, podem expor a população a uma situação perigosa) e 4 – Alerta Máximo (estado de risco iminente)

Tabela 3.4 - Níveis de alerta disponíveis no TerraMA².

Níveis de Alerta
0 - Normal
1 - Observação
2 - Atenção
3 - Alerta
4 - Alerta Máximo

Além das análises para previsão de crescimento do rio Sapucaí na altura da estação Santa Rosa, também foi gerada uma análise para monitorar a variação do nível dos rios em cada estação. Foi feito uso dos parâmetros apresentados na Tabela 3.10 para gerar alertas nas estações. As análises baseadas em PCD, não fazem a previsão de nível fluviométrico, apenas monitoram a variação do nível e geram alertas quando estes ultrapassam valores críticos.

Exceto a análise baseada em PCD (Análise_PCDs), os nomes das análises para previsão seguiram a seguinte metodologia:

- *Análise_Seção de Controle(Variável Explicativa_Tempo de Previsão)*

Os resultados encontram-se no item 4.4.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Resultados da organização dos dados de nível do rio

Os dados a seguir foram selecionados a partir das etapas descritas no item 3.3.1, de organização dos dados de nível fluviométrico.

Uma vez selecionados os eventos de cheia da estação Santa Rosa, buscou-se eventos nos mesmos períodos, porém defasados em relação à seção de controle, nas outras estações.

Devido ao curto período de coleta de dados das estações (janeiro de 2009 até maio de 2013) e das fases sem coleta ou com dados falhos, por motivos já comentados, foram selecionados os poucos eventos disponíveis para ajuste e validação do modelo. Pela Tabela 4.1, pode-se observar que a quantidade de eventos selecionados variou entre cada estação. O motivo se dá pela ausência de informações ou de dados contendo erros durante os eventos selecionados da estação Santa Rosa.

Tabela 4.1 - Número de eventos de cheia.

Estações	Nº de eventos
Santa Rosa	15
Delfim Moreira	5
Água Limpa	10
Borges	15
São Pedro	7
Santana	10
Cantagalo	10

As Figuras 4.1 a 4.7 apresentam o nível em metros atingido pela onda de cheia em cada estação de coleta de dados no eixo das ordenadas, em razão do tempo medido de hora em hora no eixo das abscissas. Cada curva representa um evento selecionado na estação. São apresentados também os níveis de Atenção e Alerta no trecho de cada estação definidos pelo Sistema de Monitoramento de Enchentes (LIH, 2013), estes parâmetros foram utilizados como níveis de alerta na fase de criação do Sistema de Monitoramento e Alerta no TerraMA².

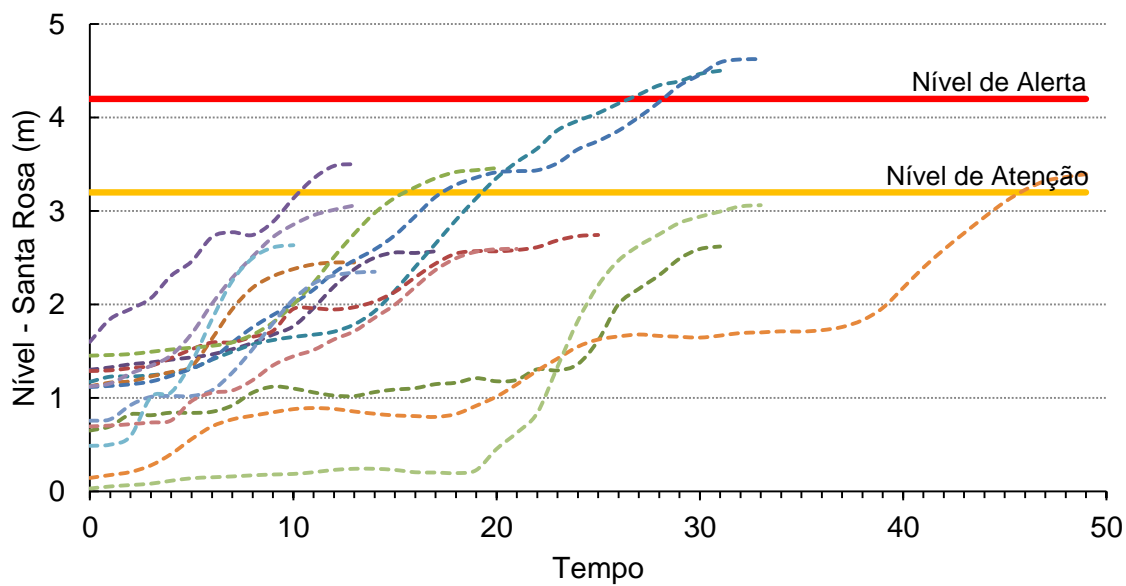


Figura 4.1 - Eventos de cheia do rio Sapucaí na estação Santa Rosa.

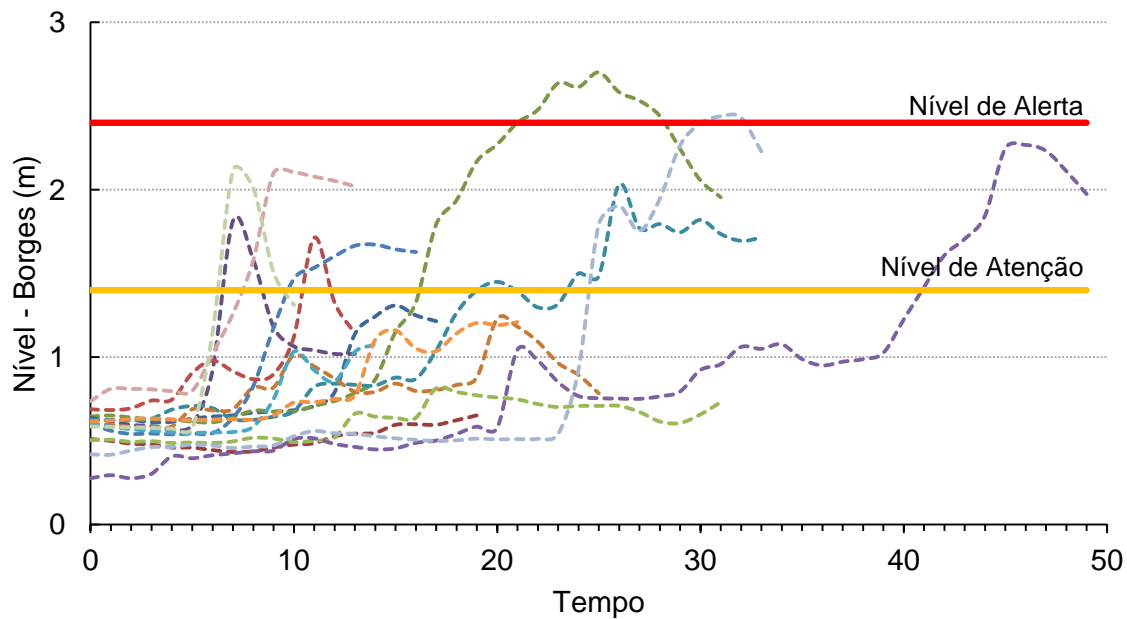


Figura 4.2 - Eventos de cheia do rio Sapucaí na estação dos Borges.

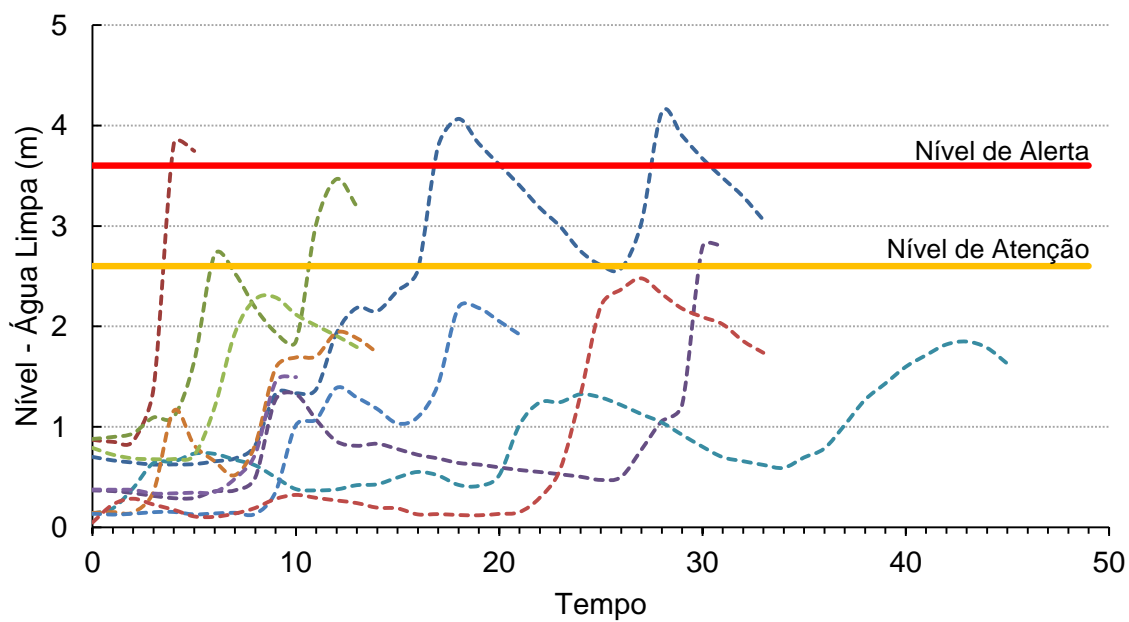


Figura 4.3 - Eventos de cheia do rio Santo Antônio na estação Água Limpa.

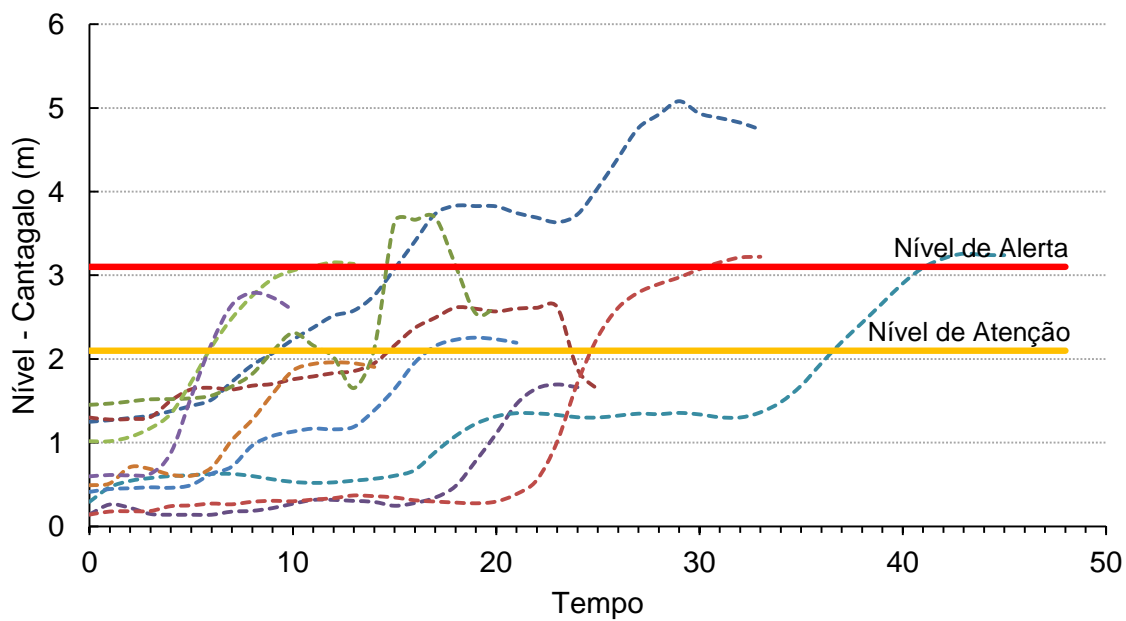


Figura 4.4 - Eventos de cheia do rio Sapucaí na estação Cantagalo.

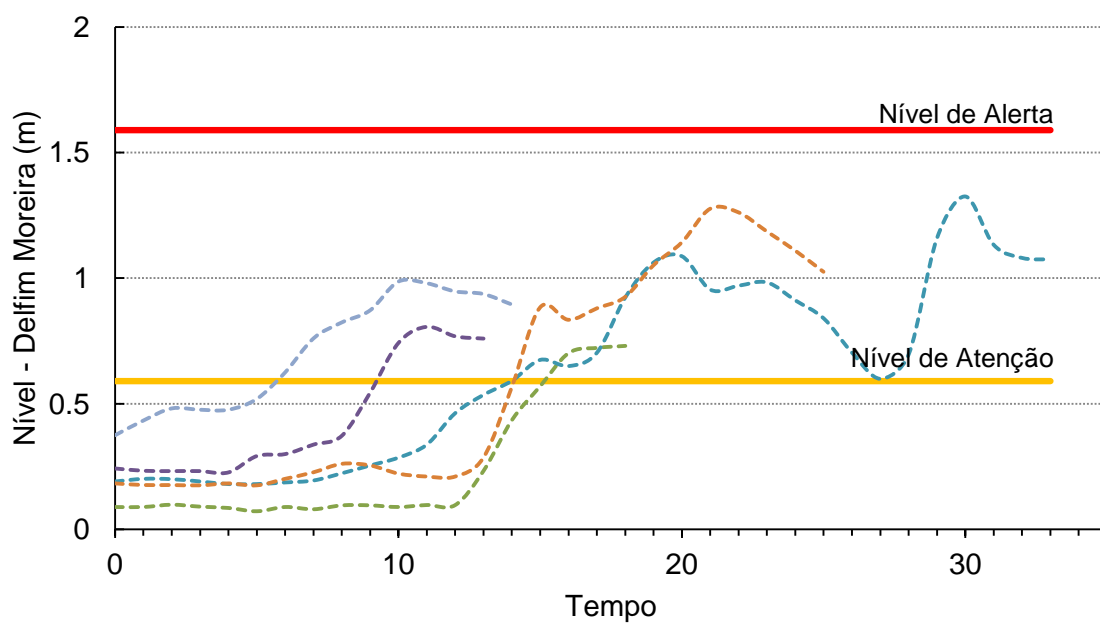


Figura 4.5 - Eventos de cheia do rio Santa Antônio na estação Delfim Moreira.

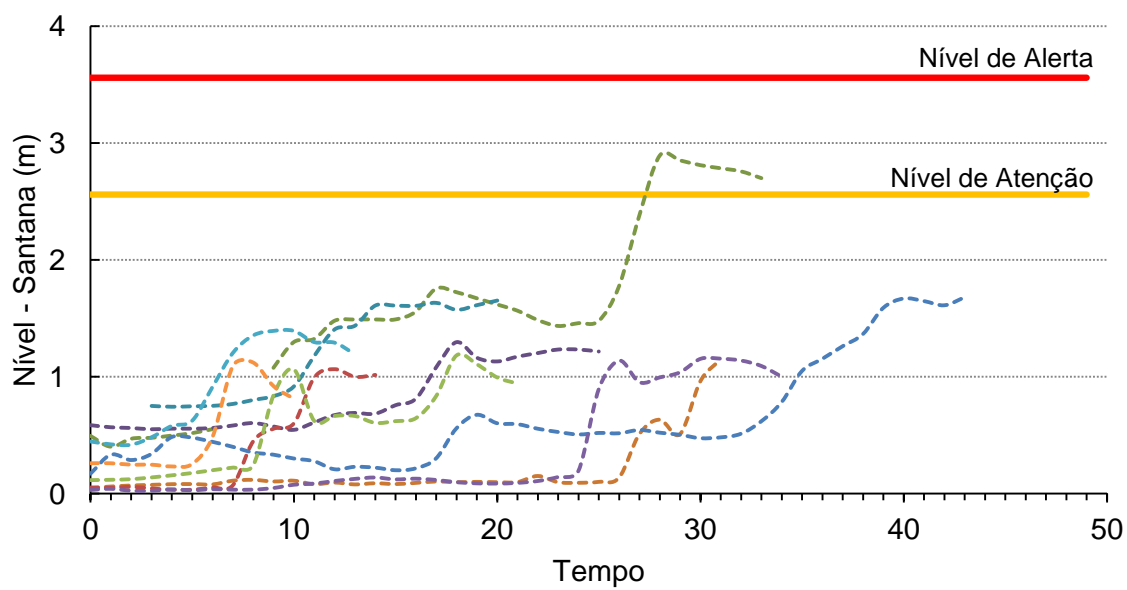


Figura 4.6 - Eventos de cheia do rio de Bicas na estação Santana.

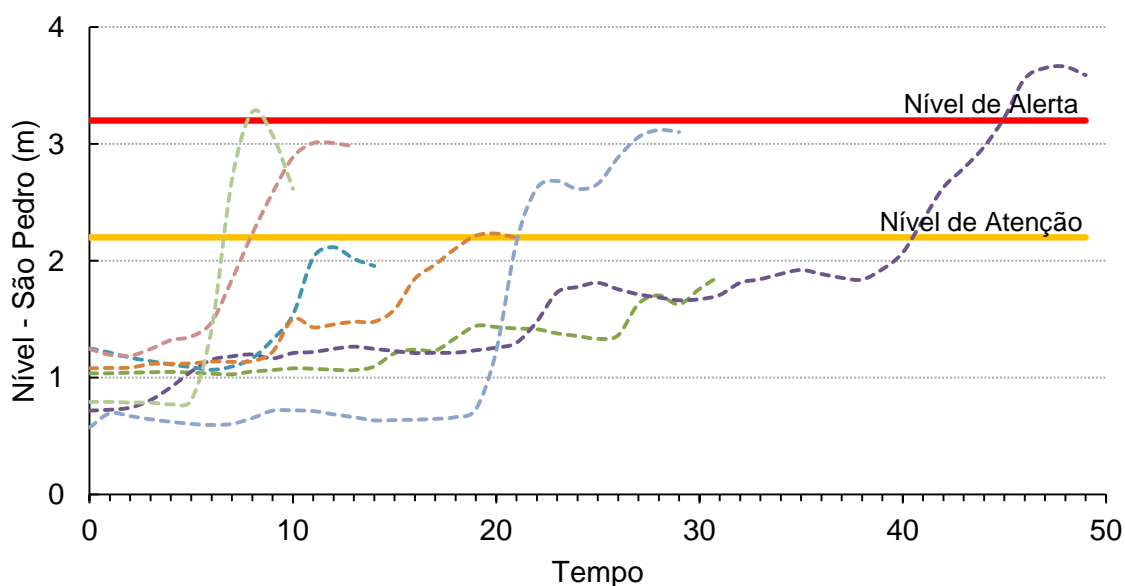


Figura 4.7 - Eventos de cheia do rio Sapucaí na estação São Pedro.

4.2 Calibração e validação do modelo de regressão polinomial

Antes de calibrar o modelo, foi preciso identificar quais as melhores variáveis explicativas para o nível do rio Sapucaí na altura da estação Santa Rosa. Foi feito uso do Coeficiente de Determinação, ou R^2 , que foi gerado utilizando como variáveis explicativas os níveis do rio medidos nas estações de Água Limpa, Borges, Cantagalo, Delfim Moreira, Santana e São Pedro, e defasados em relação ao nível observado na estação Santa Rosa.

De posse dos valores de R^2 (Tabela 4.2), é possível identificar quais as melhores variáveis explicativas para o nível em Santa Rosa e, a partir disso, serão considerados apenas os maiores valores para os testes futuros.

Conforme o mapa da Figura 3.8, a distribuição das estações de coleta de dados ao longo da bacia seguem o seguinte padrão: Delfim Moreira e Água Limpa concentram a vazão do rio Santo Antônio, afluente do rio Sapucaí; Santana está situado no Rio de Bicas, afluente do Sapucaí; Borges e São Pedro representam a vazão do rio Sapucaí, desde suas cabeceiras; e Cantagalo, localizado a aproximadamente 6 km da estação Santa Rosa, soma todas as vazões das estações acima.

Tabela 4.2 - Coeficientes R^2 definidos pelo ajuste polinomial cúbico: nível em Santa Rosa versus nível nas estações a montante.

Estações	Quantidade de horas defasadas em relação à Santa Rosa										
	1h	2h	3h	4h	5h	6h	7h	8h	9h	10h	11h
Água Limpa	0,68	0,74	0,78	0,79	0,76	0,72	0,68	-	-	-	-
Borges	-	-	-	0,67	0,69	0,69	0,67	0,64	0,61	0,57	-
Cantagalo	0,89	0,86	0,81	0,74	-	-	-	-	-	-	-
Delfim Moreira	-	-	-	-	0,74	0,72	0,68	0,64	0,61	0,59	0,58
Santana	-	0,82	0,86	0,87	0,85	0,81	0,77	-	-	-	-
São Pedro	-	-	0,88	0,86	0,80	0,72	0,64	0,55	-	-	-

Tendo em vista os resultados apresentados pelo Coeficiente de Determinação, a posição de cada estação e o objetivo do trabalho, foram selecionadas as estações mais representativas para o desenvolvimento da pesquisa.

Sabendo que Água Limpa representa a vazão de boa parte da sub-bacia do rio Santo Antônio, inclusive a vazão que passa pela estação Delfim Moreira, e diante dos valores de R^2 apresentados, esta estação foi escolhida para prever o crescimento de nível do rio na estação Santa Rosa com 3 e 4 horas de antecedência.

Também foi definida a estação São Pedro, pelos mesmos motivos de Água Limpa. São Pedro recebe toda a contribuição da rede de drenagem do rio Sapucaí, desde suas cabeceiras, passando pela estação Borges. Sendo assim, foi definida para fazer previsão com 3 e 4 horas de antecedência.

Os altos valores de R^2 e a posição estratégica da estação Santana, que concentra toda a drenagem da sub-bacia do rio de Bicas, que deságua no rio Sapucaí, esta foi definida para prever com 3 e 4 horas de antecedência.

Apesar de a estação Cantagalo ter apresentado altos valores de R^2 , esta não é adequada para prever o crescimento de nível do rio Sapucaí na estação Santa Rosa com antecedência suficiente para a tomada de decisões, em razão da curta distância em relação à Santa Rosa e do pouco tempo que a onda de cheia leva para alcançar a seção de controle.

Resumindo, daqui em diante, as estações Água Limpa, Santana e São Pedro foram adotadas como variáveis explicativas do nível em Santa Rosa, para previsões de 3 e 4 horas.

A seguir, apresenta-se o resultado da calibração do modelo de regressão cúbica para prever o crescimento do nível do rio na estação Santa Rosa com 3 e 4 horas de antecedência em relação às estações escolhidas: Água Limpa, Santana e São Pedro. Os resultados são apresentados em conjunto com algumas estatísticas da regressão polinomial, que auxiliam a análise dos resultados.

Nas Tabelas 4.3 a 4.8 são apresentados os resultados, onde foram adotadas variáveis, a fim de simplificar a apresentação. A legenda destas variáveis encontra-se a seguir:

- NSR (t+3h), NSR (t+4h): variáveis representativas dos níveis previstos na estação Santa Rosa, com alcance de previsão de 3 e 4 horas;
- NAL (t), NS (t), NSP (t): variáveis representativas do nível do rio observado nas estações Água Limpa, Santana e São Pedro, respectivamente;
- $[NAL(t)]^2$, $[NS(t)]^2$, $[NSP(t)]^2$: quadrado das variáveis;
- $[NAL(t)]^3$, $[NS(t)]^3$, $[NSP(t)]^3$: cubo das variáveis;
- R^2 : Coeficiente de Determinação;
- R^2 ajustado: Coeficiente de Determinação Ajustado;
- MAD: desvio médio absoluto (*Mean Absolute Deviation*);
- RMSE: erro médio quadrático (*Root Mean Squared Error*);
- Beta: coeficientes estimados.

Estatísticas da regressão cúbica de Santa Rosa *versus* Água Limpa, previsão de 3 horas (Tabela 4.3):

Tabela 4.3 - Estatísticas da regressão cúbica: Santa Rosa (t+3h) *versus* Água Limpa.

	R ²	R ² ajustado	MAD (m)	RMSE	Beta
NSR(t+3h)	0,819	0,816	0,839	0,195	0,2581
NAL(t)					1,6529
NAL ² (t)					-0,241
NAL ³ (t)					0,0098

Equação resultante para previsão de 3 horas, utilizando como variável independente o nível em Água Limpa:

$$NSR(t + 3h) = 0,2581 + 1,6529 * NAL(t) - 0,241 * [NAL(t)]^2 + 0,0098 * [NAL(t)]^3$$

Estatísticas da regressão cúbica de Santa Rosa *versus* Água Limpa, previsão de 4 horas (Tabela 4.4):

Tabela 4.4 - Estatísticas da regressão cúbica: Santa Rosa (t+4h) *versus* Água Limpa.

	R ²	R ² ajustado	MAD (m)	RMSE	Beta
NSR(t+4h)	0,82	0,817	0,833	0,194	0,2991
NAL(t)					1,7474
NAL ² (t)					-0,3077
NAL ³ (t)					0,023

Equação resultante para previsão de 4 horas, utilizando como variável independente o nível em Água Limpa:

$$NSR(t + 4h) = 0,2991 + 1,7474 * NAL(t) - 0,3077 * [NAL(t)]^2 + 0,023 * [NAL(t)]^3$$

Estatísticas da regressão cúbica de Santa Rosa *versus* Santana, previsão de 3 horas (Tabela 4.5):

Tabela 4.5 - Estatísticas da regressão cúbica: Santa Rosa (t+3h) versus Santana.

	R ²	R ² ajustado	MAD (m)	RMSE	Beta
NSR(t+3h)	0,846	0,847	0,825	0,136	0,5016
NS(t)					1,9573
NS ² (t)					-0,2031
NS ³ (t)					-0,0004

Equação resultante para previsão de 3 horas, utilizando como variável independente o nível em Santana:

$$NSR(t + 3h) = 0,5016 + 1,9573 * NS(t) - 0,2031 * [NS(t)]^2 - 0,0004 * [NS(t)]^3$$

Estatísticas da regressão cúbica de Santa Rosa versus Santana, previsão de 4 horas (Tabela 4.6):

Tabela 4.6 - Estatísticas da regressão cúbica: Santa Rosa (t+4h) versus Santana.

	R ²	R ² ajustado	MAD (m)	RMSE	Beta
NSR(t+4h)	0,854	0,527	0,824	0,126	0,5381
NS(t)					2,0045
NS ² (t)					-0,2080
NS ³ (t)					-0,0033

Equação resultante para previsão de 4 horas, utilizando como variável independente o nível em Santana:

$$NSR(t + 4h) = 0,5381 + 2,0045 * NS(t) - 0,2080 * [NS(t)]^2 - 0,0033 * [NS(t)]^3$$

Estatísticas da regressão cúbica de Santa Rosa *versus* São Pedro, previsão de 3 horas (Tabela 4.7):

Tabela 4.7 - Estatísticas da regressão cúbica: Santa Rosa (t+3h) *versus* São Pedro.

	R ²	R ² ajustado	MAD (m)	RMSE	Beta
NSR(t+3h)	0,911	0,909	0,699	0,064	-0,9054
NSP(t)					1,868
NSP ² (t)					-0,1823
NSP ³ (t)					-0,0068

Equação resultante para previsão de 3 horas, utilizando como variável independente o nível em São Pedro:

$$NSR(t + 3h) = -0,9054 + 1,868 * NSP(t) - 0,1823 * [NSP(t)]^2 - 0,0068 * [NSP(t)]^3$$

Estatísticas da regressão cúbica de Santa Rosa *versus* São Pedro, previsão de 4 horas (Tabela 4.8):

Tabela 4.8 - Estatísticas da regressão cúbica: Santa Rosa (t+4h) *versus* São Pedro.

	R ²	R ² ajustado	MAD (m)	RMSE	Beta
NSR(t+4h)	0,892	0,89	0,689	0,078	-0,8146
NSP(t)					1,7982
NSP ² (t)					-0,127
NSP ³ (t)					-0,0177

Equação resultante para previsão de 4 horas, utilizando como variável independente o nível em São Pedro:

$$NSR(t + 4h) = -0,8146 + 1,7982 * NSP(t) - 0,127 * [NSP(t)]^2 - 0,0177 * [NSP(t)]^3$$

Conforme citado anteriormente, entre o conjunto de dados disponíveis para a pesquisa (Tabela 4.1), foram selecionados 2 eventos de cada uma das três estações de coleta de dados definidas como variáveis explicativas (Água Limpa, Santana e São Pedro) do nível do rio Sapucaí na seção de controle, para a fase de validação.

Os eventos escolhidos foram aplicados nos modelos ajustados para previsão de 3 e 4 horas. Os resultados são analisados a partir dos valores encontrados para as seguintes estatísticas: erro médio quadrático (RMSE) para medir a diferença média entre os valores previstos e o observado; desvio médio absoluto (MAD) que mede a variabilidade através da média dos desvios absolutos entre os valores previstos e observados em metros; e o coeficiente de determinação (R^2).

As figuras 4.8 a 4.13, a seguir, apresentam os valores observados em Santa Rosa durante os eventos e as curvas previstas para dois alcances de previsão no eixo das ordenadas, em razão do tempo medido de hora em hora no eixo das abscissas.

As Tabelas 4.9 e 4.10 apresentam as estatísticas obtidas na validação dos eventos 1 e 2 ocorridos em Água Limpa para explicar o nível em Santa Rosa.

Tabela 4.9 - Resultados das estatísticas: Santa Rosa *versus* Água Limpa (previsão de 3 horas).

	RMSE	MAD (m)	R^2
Evento 1	0,2873	0,9057	0,8439
Evento 2	0,0726	0,5474	0,8125

Tabela 4.10 - Resultados das estatísticas: Santa Rosa *versus* Água Limpa (previsão de 4 horas).

	RMSE	MAD (m)	R^2
Evento 1	0,2873	0,9372	0,8476
Evento 2	0,0759	0,5667	0,8619

A Tabela 4.9 mostra que, para previsão de 3 horas, a utilização do evento 2 apresentou um resultado mais preciso, com erro médio de aproximadamente 55 cm, enquanto para o evento 1, o erro foi maior, de 91 cm. Quando aplicado o modelo para previsão de 4 horas, os erros foram maiores, comparados com os resultados da previsão de 3 horas.

É interessante notar os valores do R^2 , todos apresentando valores acima de 80%.

As Figuras 4.8 e 4.9 ilustram as curvas previstas e a observada em Santa Rosa. Pode-se observar que o evento 2, como demonstra as análises estatísticas, apresentou uma maior aderência, principal na previsão do pico de cheia, enquanto o evento 1 subestimou o nível atingido pelo rio Sapucaí durante o evento.

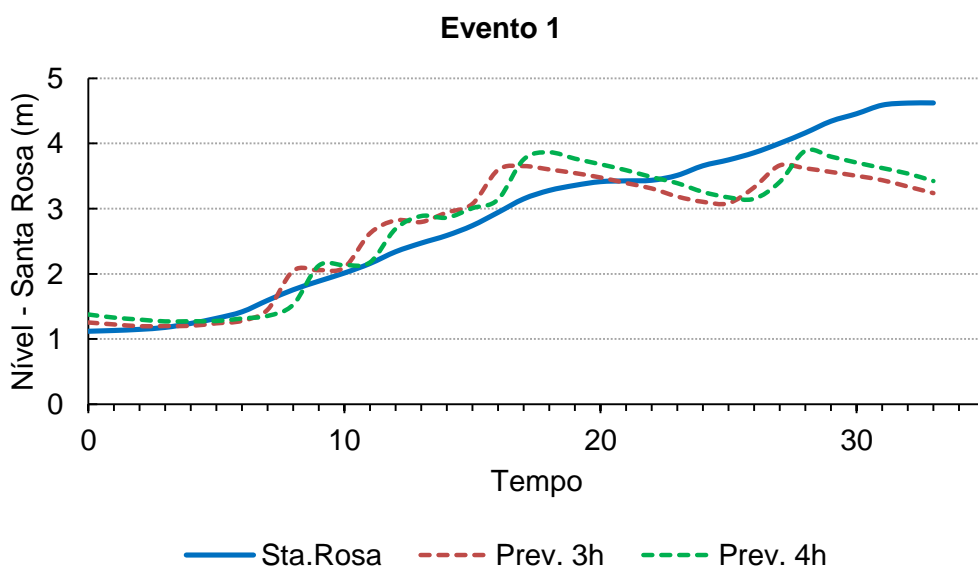


Figura 4.8 – Evento 1: níveis previstos (3 e 4 horas) e o observado no rio Sapucaí: Santa Rosa *versus* Água Limpa.

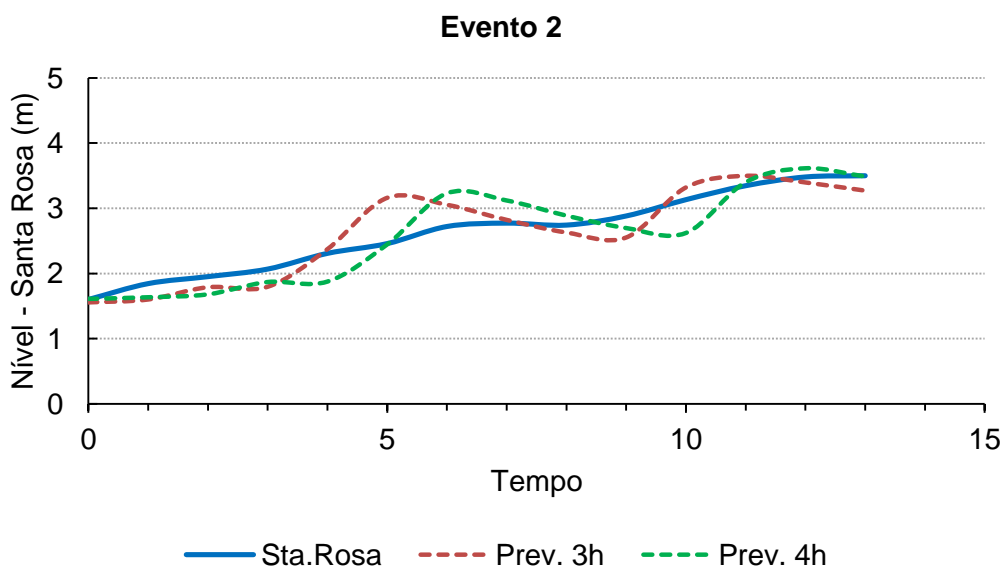


Figura 4.9 - Evento 2: níveis previstos (3 e 4 horas) e o observado no rio Sapucaí: Santa Rosa *versus* Água Limpa.

As Tabelas 4.11 e 4.12 apresentam as estatísticas obtidas na validação dos eventos 1 e 2 selecionados do conjunto de eventos da estação Santana, para explicar o nível em Santa Rosa.

Tabela 4.11 - Resultados das estatísticas: Santa Rosa *versus* Santana (previsão de 3 horas).

	RMSE	MAD (m)	R ²
Evento 1	0,174	0,8767	0,8728
Evento 2	0,1172	0,6274	0,9009

Tabela 4.12 - Resultados das estatísticas: Santa Rosa *versus* Santana (previsão de 4 horas).

	RMSE	MAD (m)	R ²
Evento 1	0,1469	0,898	0,8982
Evento 2	0,0871	0,6384	0,9604

Baseado nos dados de nível provenientes da estação Santana, a previsão de 4 horas apresentou valores de R² maiores do que a previsão de 3 horas, assim como o evento 2 apresentou melhores resultados para os dois tempos de previsão em relação ao evento 1.

As Figuras 4.10 e 4.11 ilustram as curvas previstas e a observada em Santa Rosa. É possível observar que os resultados das previsões para o evento 2 apresentaram uma maior aderência ao que foi observado, apesar de ter superestimado a fase de ascensão e subestimado o pico de cheia.

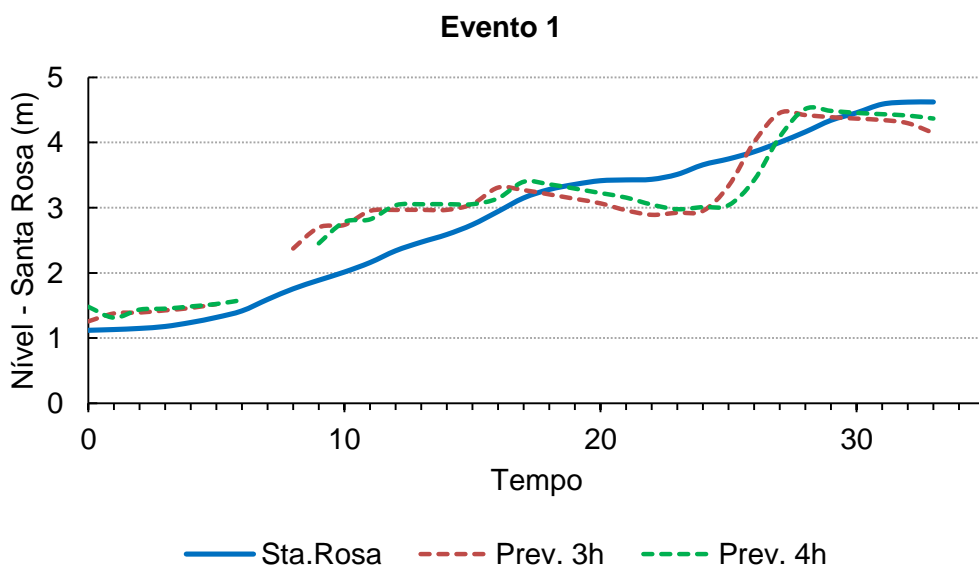


Figura 4.10 - Evento 1: níveis previstos (3 e 4 horas) e o observado no rio Sapucaí: Santa Rosa *versus* Santana.

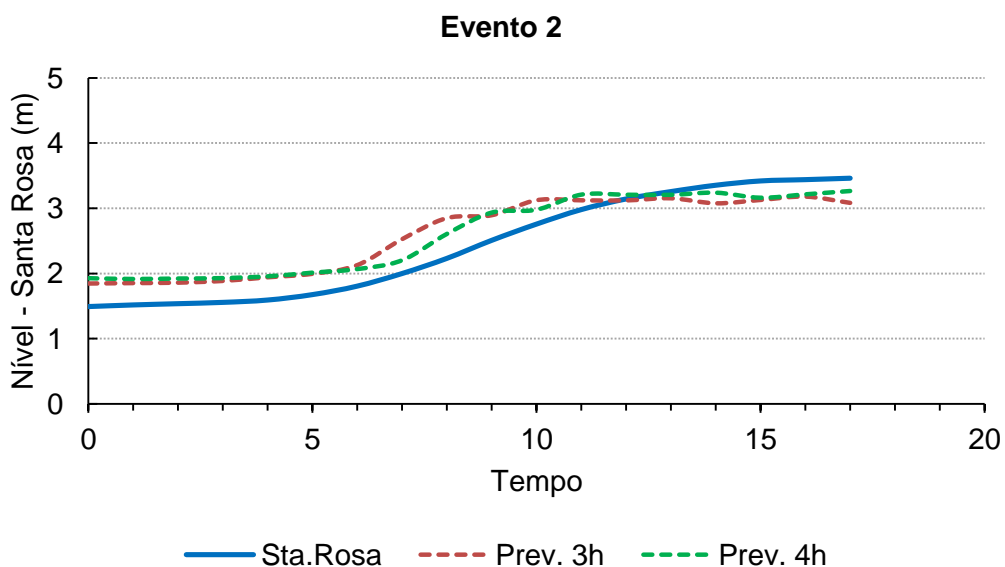


Figura 4.11 - Evento 2: níveis previstos (3 e 4 horas) e o observado no rio Sapucaí: Santa Rosa *versus* Santana.

As Tabelas 4.13 e 4.14 apresentam as estatísticas obtidas na validação dos eventos 1 e 2 da estação São Pedro, para explicar o nível em Santa Rosa.

Tabela 4.13 - Resultados das estatísticas: Santa Rosa *versus* São Pedro (previsão de 3 horas).

	RMSE	MAD (m)	R ²
Evento 1	0,0569	0,663	0,9665
Evento 2	0,0336	1,073	0,9772

Tabela 4.14 - Resultado das estatísticas: Santa Rosa *versus* São Pedro (previsão de 4 horas).

	RMSE	MAD (m)	R ²
Evento 1	0,0613	0,6651	0,9858
Evento 2	0,0676	1,0494	0,9582

Os resultados das estatísticas dos dois eventos selecionados para representar São Pedro apresentaram altos valores de R², este que mede a fração da variação da variável dependente que é explicada pelo modelo ajustado, com valores acima de 95% para as previsões de 3 e 4 horas.

As Figuras 4.12 e 4.13 ilustram as curvas previstas e a observada do nível do rio Sapucaí, na altura da estação Santa Rosa. Como a intenção é utilizar os modelos ajustados como modelos na análise em um sistema de monitoramento e alerta, os resultados gerados pela previsão a partir dos dados da estação São Pedro, são de grande importância. A análise visual das figuras a seguir permite observar, principalmente, a maior precisão na previsão do pico de cheia, característica importante, tendo em vista a sua aplicação em sistemas de monitoramento e alerta. No evento dois, as duas previsões, de 3 e 4 horas, subestimaram a fase de ascensão, porém previram com maior precisão o pico.

Para os usuários do sistema de monitoramento e alerta (a Defesa Civil, por exemplo), é importante a informação de quando e quanto o nível do rio alcançará em cada evento, ou seja, mais importante do que saber como o nível está subindo, é identificar o nível que o rio atingirá com antecedência, para assim tomar as medidas e ações necessárias a fim de minimizar os danos causados pelos eventos de inundações.

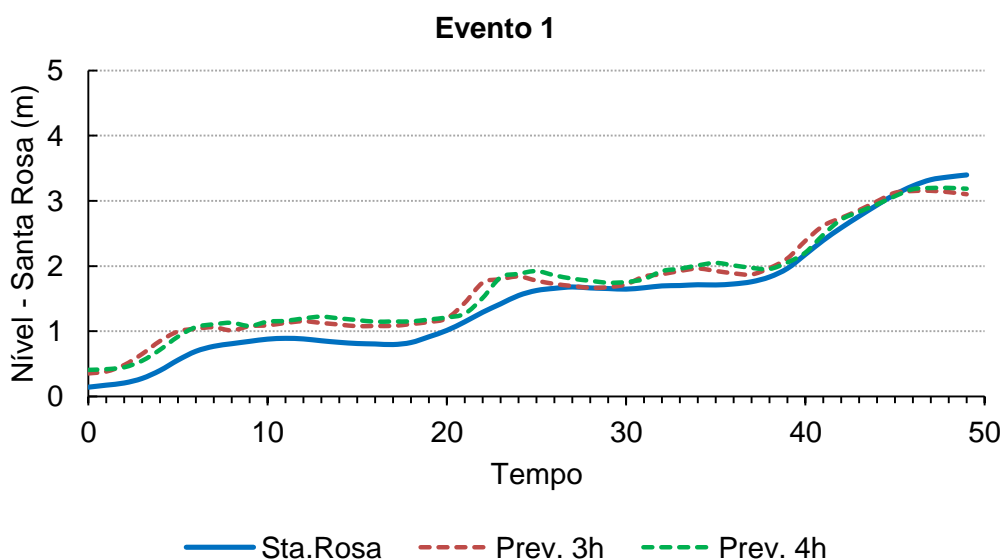


Figura 4.12 - Evento 1: níveis previstos (3 e 4 horas) e o observado no rio Sapucaí: Santa Rosa *versus* São Pedro.

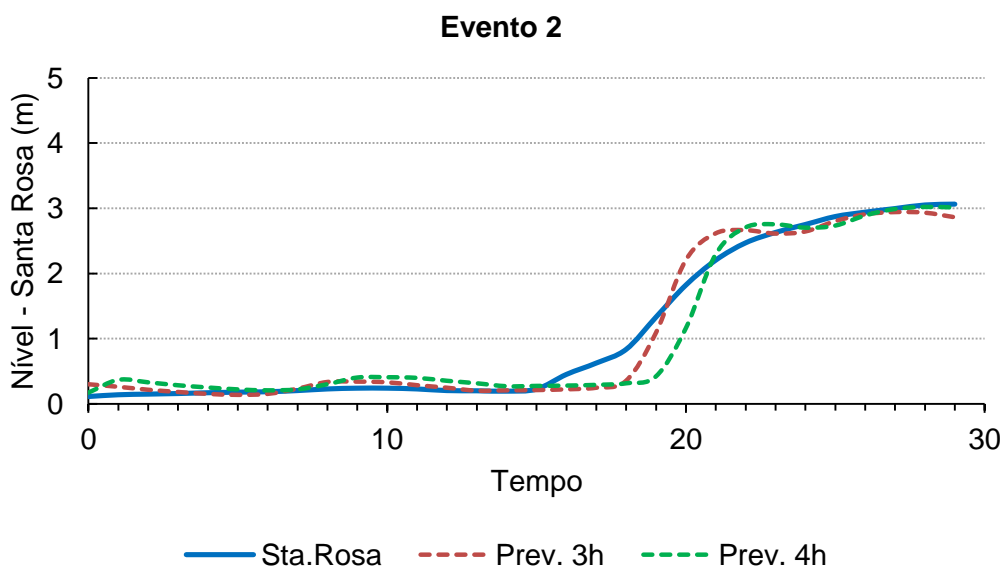


Figura 4.13 - Evento 2: níveis previstos (3 e 4 horas) e o observado no rio Sapucaí: Santa Rosa *versus* São Pedro.

De forma geral, os resultados gerados na fase de validação demonstraram a importância das três estações para previsão de nível do rio Sapucaí, destacadamente a estação São Pedro. As diferenças entre os valores encontrados das análises estatísticas nas previsões de 3 e 4 horas variam de acordo com a distância entre as estações (estações Água Limpa, Santana e São Pedro em relação a Santa Rosa) e a velocidade de propagação da onda de cheia em cada evento. Ou seja, o tempo médio de propagação da onda de cheia entre as estações escolhidas para este trabalho é de 3 horas; o que explica os menores valores encontrados na previsão de 3 horas em relação aos valores da previsão de 4 horas.

4.3 Base de dados hidrológicos

A Figura 4.14 ilustra o resultado da elaboração da base de dados hidrológicos: a extração de informações a partir do Modelo Digital de Elevação. Os dados hidrológicos gerados foram: delimitação das sub-bacias e extração da rede drenagem do Alto Sapucaí.

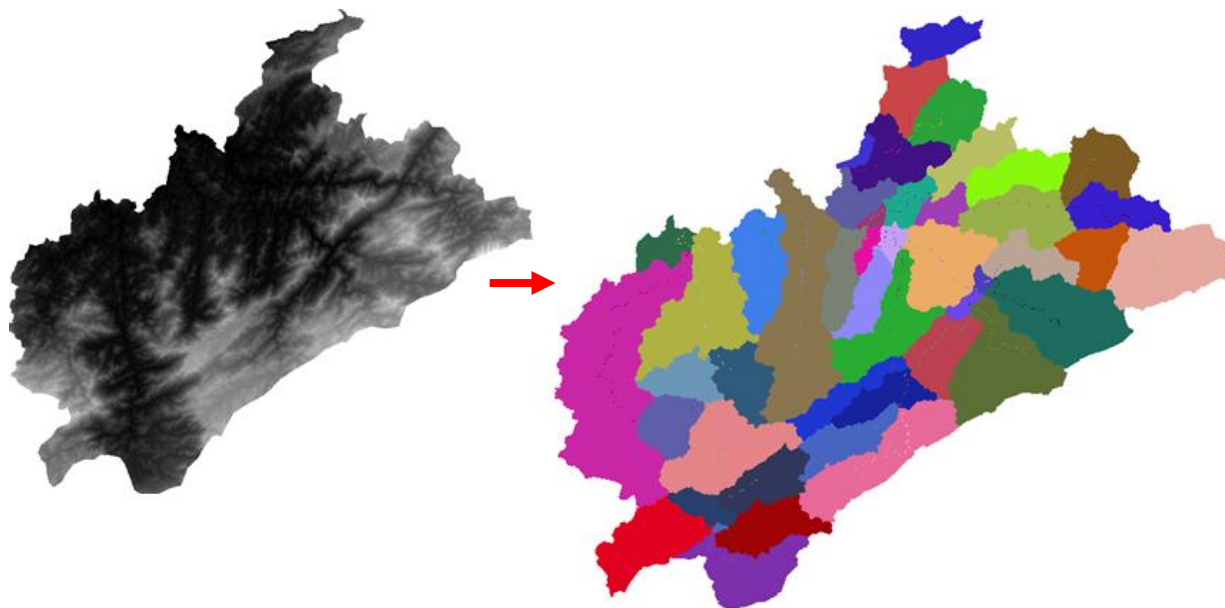


Figura 4.14 - Utilização do MDE para extração da rede de drenagem e das bacias do trecho do Alto Sapucaí, gerados no TerraHidro.

Foram selecionadas, para elaboração do mapa da Figura 3.8, a drenagem e as subbacias que representam a área que contribui para o rio Sapucaí na altura de Itajubá. As informações encontradas na Figura 3.8, resumem os dados necessários para alimentar o Sistema de Monitoramento e Alerta desenvolvido na plataforma TerraMA².

4.4 Sistema de Monitoramento e Alerta de inundações

A execução das análises desenvolvidas para o Sistema de Monitoramento e Alerta de inundações descritas no capítulo 3.3.4, gerou os resultados apresentados aqui.

A definição das melhores variáveis explicativas e os modelos ajustados serviram como modelos de análises para a construção do sistema. A seguir, são apresentadas as estações utilizadas nas análises como variáveis explicativas para o crescimento do nível do rio Sapucaí na seção de controle, estação Santa Rosa:

- Estação Água Limpa: previsão com 3 e 4 horas de antecedência;
- Estação São Pedro: previsão com 3 e 4 horas de antecedência;
- Estação Santana: previsão com 3 e 4 horas de antecedência.

Sendo assim, tem-se as seguintes análises para previsão e observação do nível do rio:

- Analise_SantaRosa(AguaLimpa_prev3h);
- Analise_SantaRosa(SaoPedro_prev3h);
- Analise_SantaRosa(Santana_prev3h);
- Analise_SantaRosa(AguaLimpa_prev4h);
- Analise_SantaRosa(SaoPedro_prev4h);
- Analise_SantaRosa(Santana_prev4h);
- Analises_PCDs.

Os modelos de análise utilizados nesta pesquisa são apresentados no Apêndice A.

A interface do módulo de configuração do TerraMA² e as análises criadas, podem ser visualizadas na Figura 4.15.

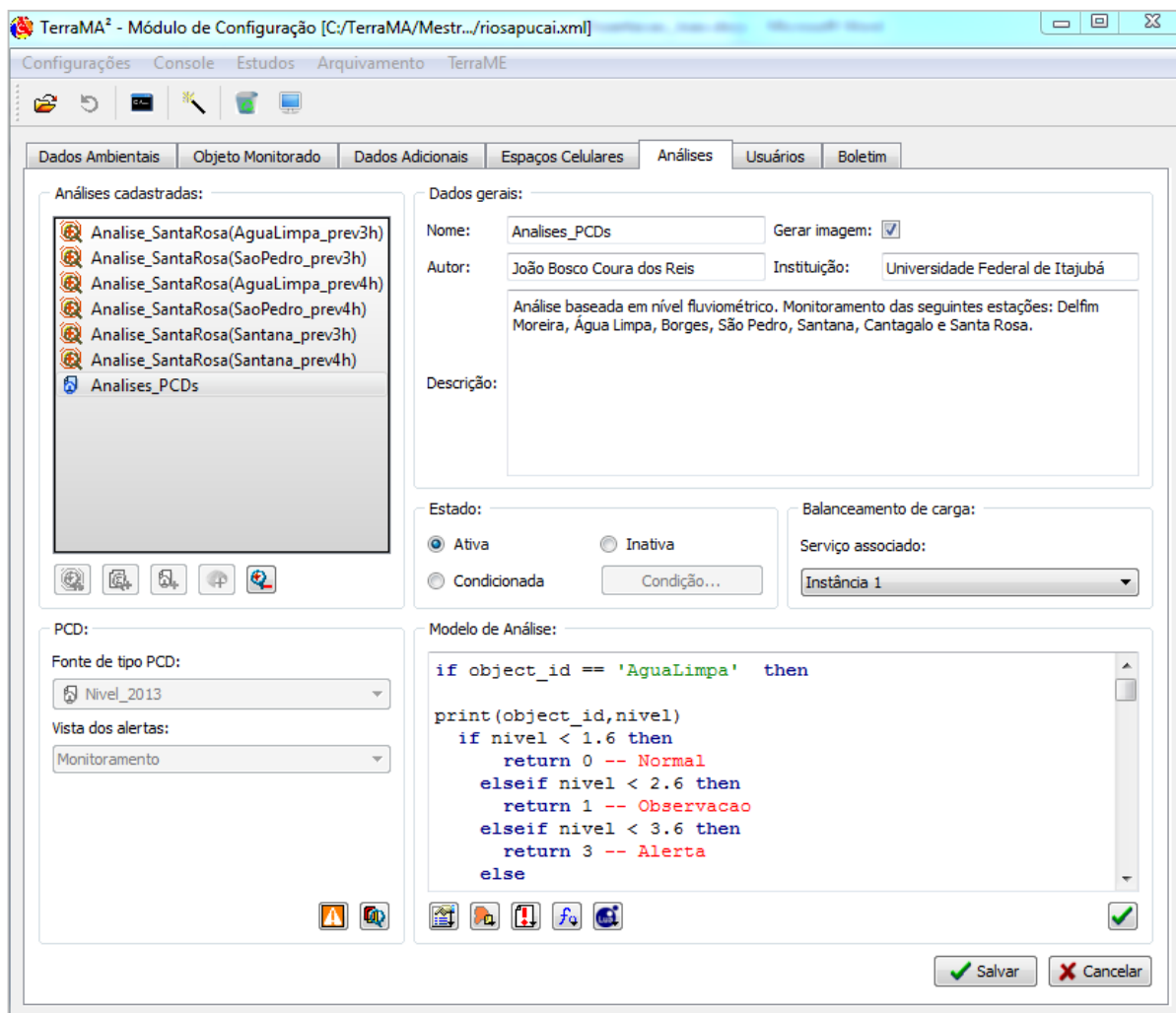


Figura 4.15 - Interface do módulo de configuração do TerraMA².

Modelo de análise: Analises_PCDs

A Analises_PCDs, na qual permitiu o monitoramento da variação de nível do rio nas sete estações de coleta de dados, gerou resultados importantes para análise. Apesar de fazer apenas a observação do nível do rio, sem nenhum modelo para previsão de nível com antecedência, como é o caso das outras seis análises desenvolvidas, esta possibilita acompanhar a elevação dos níveis de alertas em estações à montante da estação Santa Rosa. Um usuário do sistema de monitoramento, de posse dessas informações de elevação do nível do rio à montante, pode, a partir disso, preparar medidas para lidar com possíveis eventos extremos.

Para exemplificar, o conjunto de imagens da Figura 4.16 ilustra a evolução dos cenários de alertas do evento ocorrido no período do dia 8 a 9 de dezembro de 2009. As chuvas constantes nas bacias hidrográficas que abastecem o rio Sapucaí na altura da estação Santa Rosa, provocaram o aumento dos níveis de alerta nas estações à montante, o que foi suficiente para o crescimento do nível do rio Sapucaí e, conseqüentemente, do nível de alerta na estação Santa Rosa.

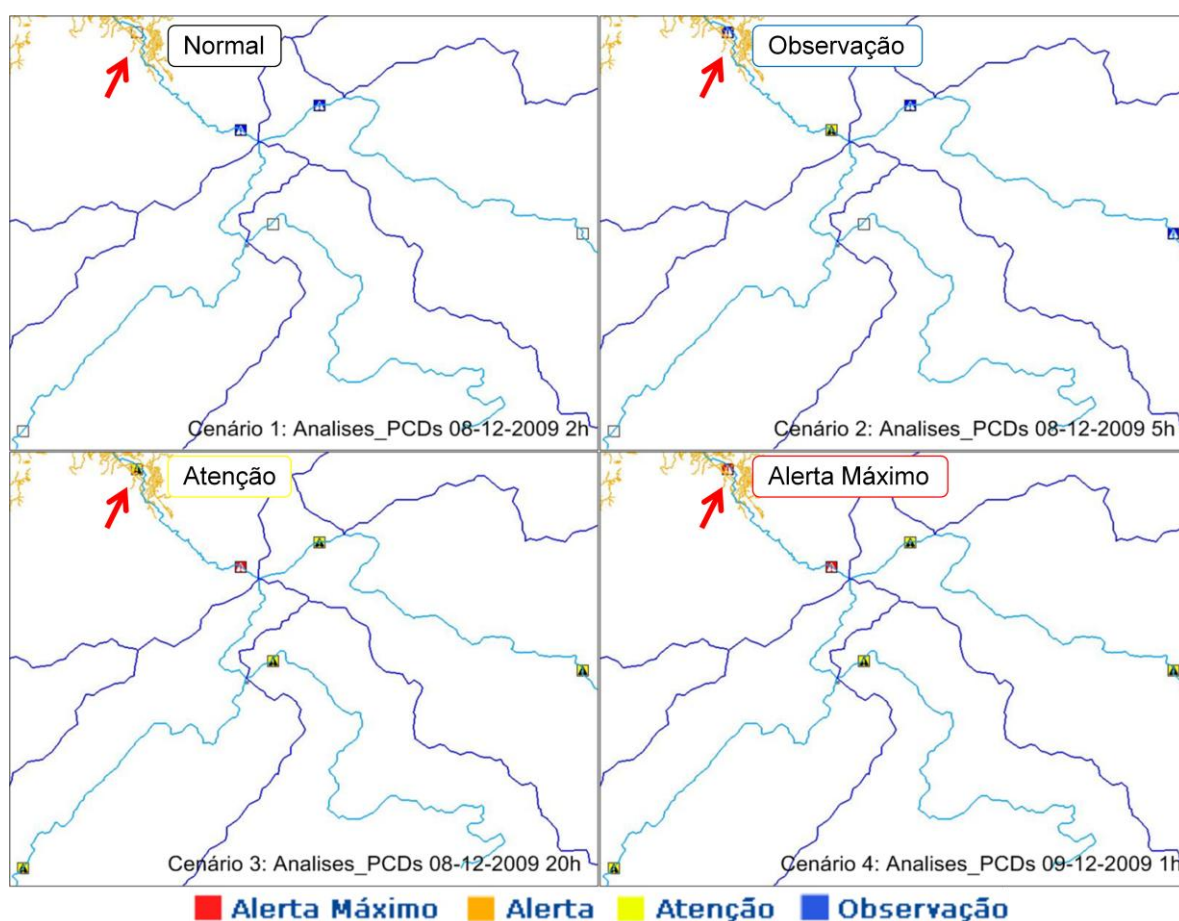


Figura 4.16 - Evolução dos alertas gerados pela execução do modelo de análise Analises_PCDs.

As imagens utilizadas na Figura 4.16 foram geradas automaticamente a cada nova análise executada pelo TerraMA² e armazenadas em uma pasta, previamente definida na fase de configuração. Os resultados das análises também ficaram disponíveis em uma página na *internet*. A Figura 4.17 ilustra o aplicativo *web* com todas as análises utilizadas para o sistema de monitoramento e alerta. Em destaque, os resultados da Analises_PCDs.

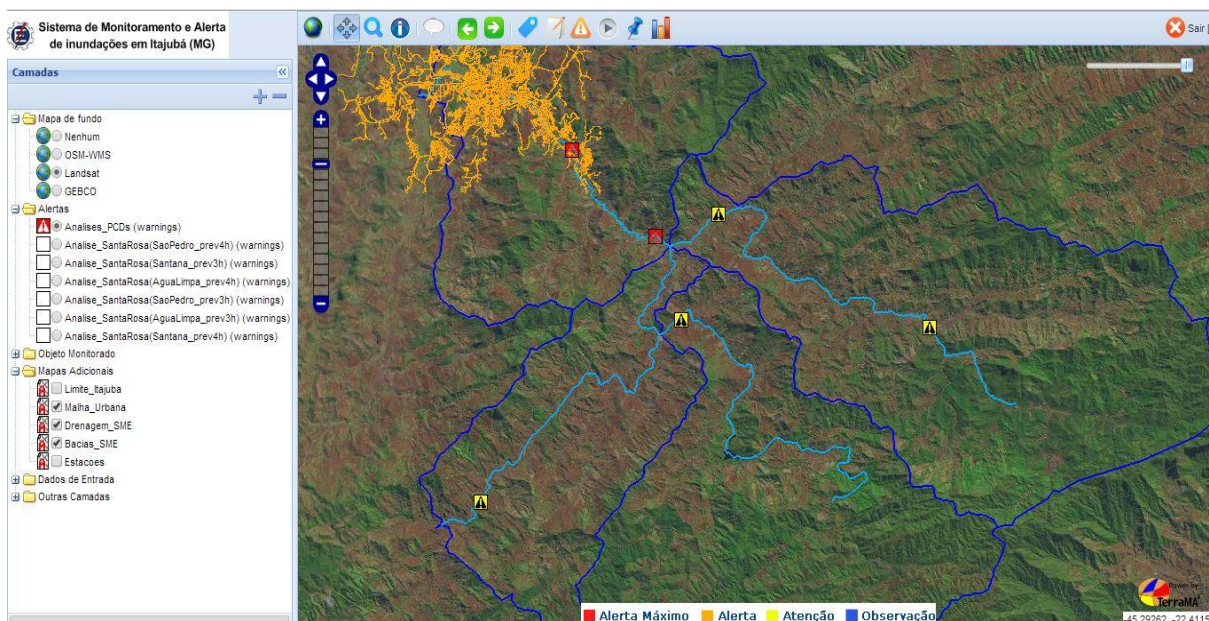


Figura 4.17 - Interface *web* apresentando os resultados da análise com PCDs (Analises_PCDs).

Modelo de análise: *Analise_SantaRosa(AguaLimpa_prev3 e 4h)*

Pode ser visto na Figura 4.18 a previsão do estado de atenção identificado para o rio Sapucaí. O evento em destaque ocorreu no dia 12 e 13 de janeiro de 2011, quando às 23h do dia 12, a previsão identificava a alteração do estado de alerta, de normal para observação, dentro de 4 horas. Uma hora depois, às 0h do dia 13, a análise indicou o aumento do estado de alerta, prevendo o estado de atenção para as 4h do dia 13.

A Figura 4.18 ainda ilustra uma das possibilidades de consulta que a interface *web* disponibiliza. No caso, a consulta aos dados do objeto monitorado (estação Santa Rosa) com informações sobre a localização, dos níveis de alerta e da vazante em cota altimétrica.

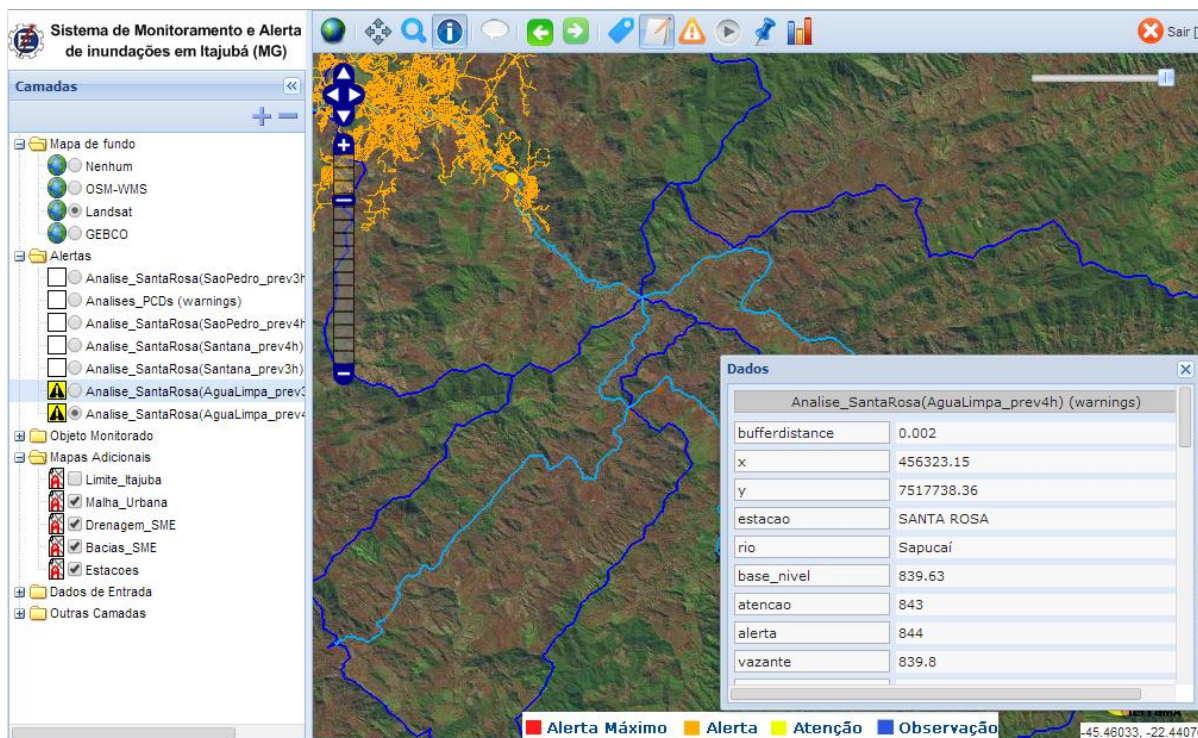


Figura 4.18 – Analise_SantaRosa(AguaLimpa_prev4h) indicando o estado de atenção.

Modelo de análise: Analise_SantaRosa(Santana_prev3 e 4h)

As duas análises basearam-se na previsão do nível do rio Sapucaí, a partir da variação do nível observado na estação Santana. Utilizando o modelo de regressão cúbica ajustado para os dois horários de previsão, foram criados os dois modelos de análises para prever com antecedência de 3 e 4 horas o nível na estação Santa Rosa.

A Figura 4.19 ilustra a evolução dos níveis críticos gerados através da execução da Analise_SantaRosa(Santana_prev4h). O evento ilustrado ocorreu durante os dias 7 e 9 de dezembro de 2009. No dia 7, às 22 horas, a análise indicava que em 4 horas, haveria uma mudança de estado normal para o estado de observação. Às 6h do dia 8, o modelo previa a alteração do estado de observação para o estado de atenção e às 17 horas, com 4 horas de antecedência, a mudança para o estado de alerta máximo.



Figura 4.19 - Evolução dos alertas previstos através da estação Santana.

As imagens geradas automaticamente pelo TerraMA² são no formato JPEG (.jpg). Outra característica das imagens, é que elas cobrem apenas a área em torno dos objetos monitorados, sendo assim, como o objeto monitorado das análises de previsão é a estação Santa Rosa, elas captam apenas uma pequena parte da bacia.

Em contrapartida, o módulo de apresentação *web* possibilitou um amplo campo de visão da área monitorada. Na Figura 4.20 é possível identificar a estação Santa Rosa em estado de alerta máximo, resultado da análise com alcance de 4 horas de previsão.

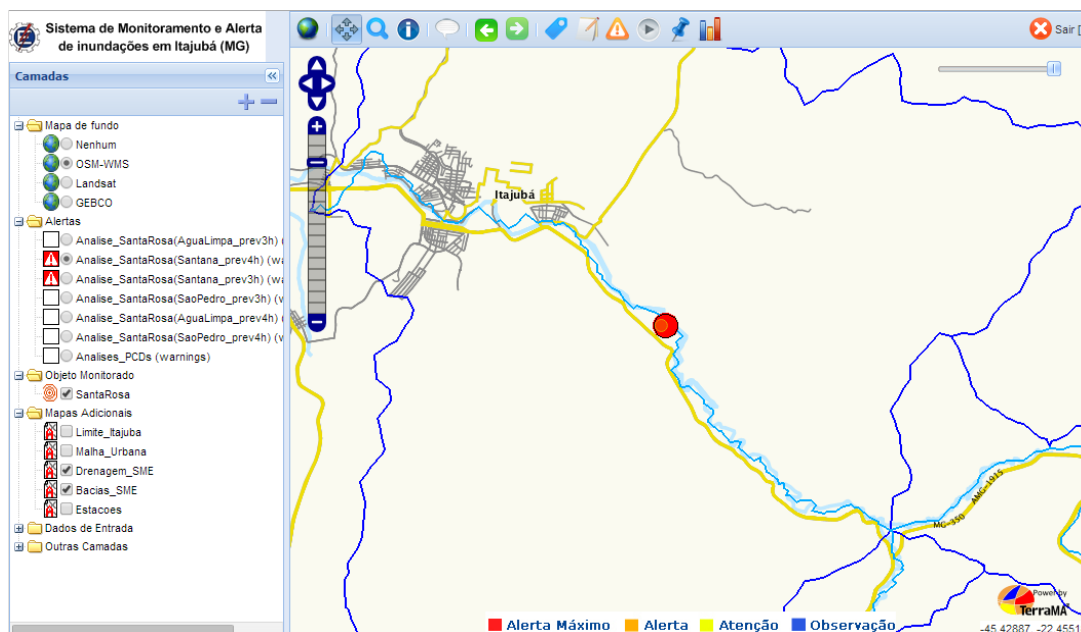


Figura 4.20 - Interface *web* apresentando o alerta da análise Analise_SantaRosa(Santana_prev4h).

A plataforma TerraMA² disponibiliza 3 opções para o mapa de fundo. Na Figura 4.20, foi utilizado o *Open Street Map* (OSM-WMS). Estes recursos facilitam a localização e

interpretação da área monitorada e, no caso do OSM, apresenta as principais redes de transportes, uso do solo e algumas edificações para auxiliar na localização.

Modelo de análise: Análise_SantaRosa(SaoPedro_prev3 e 4h)

Devido a pouca disponibilidade de dados de nível fluviométrico da estação São Pedro, que entrou em operação no início do ano de 2011 e apresenta alguns períodos com dados falhos ou com a ausência de dados coletados, foram obtidos poucos eventos para calibração, validação e aplicação no sistema de monitoramento.

Nos períodos dos eventos selecionados, não houve crescimento do nível do rio Sapucaí, na altura da estação São Pedro, suficiente para predição de níveis de alertas de atenção ou alerta máximo pelo modelo de análise para o nível do rio na estação Santa Rosa.

Embora haja a ausência de figuras e dados acerca dos resultados gerados pelos modelos de análises baseado na estação São Pedro, o monitoramento do nível na estação de coleta de dados em discussão é fundamental para a geração de alertas com antecedência para casos de inundações em Itajubá, visto a sua posição estratégica na bacia hidrográfica, já que recebe toda a contribuição da rede de drenagem da área de cabeceira do rio Sapucaí. Os resultados encontrados na fase de validação dos modelos de regressão polinomial atestam tal importância.

De forma geral, as três estações escolhidas são importantes para a construção do sistema de monitoramento, pois estas possibilitam explicar o aumento do nível do rio na estação Santa Rosa com antecedência de até 4 horas, apresentando altos valores de R^2 , como visto na fase de validação.

Os alertas gerados através da previsão por Sistemas de Monitoramento e Alerta são essenciais para a Defesa Civil e demais responsáveis na fase de preparação para lidar com os eventos hidrológicos, o que possibilita organizar ações com antecedência que minimizem a vulnerabilidade da população e os danos e prejuízos causados pelo impacto dos eventos de inundações.

5. CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho foi de desenvolver um sistema de monitoramento e alerta para o município de Itajubá (MG), sistema este que fosse capaz de gerar alertas com antecedência para casos de inundações, que é o evento mais recorrente e que mais causa danos à cidade e riscos para a população do município.

Entende-se que, para um efetivo controle de inundações em áreas urbanizadas, é preciso envolver um conjunto de ações e medidas, tanto estruturais, como não estruturais. Uma forma encontrada para contribuir, foi de desenvolver um sistema de monitoramento e alerta capaz de gerar uma estimativa confiável de situações de perigo, e que estes alertas possam ser disponibilizados às autoridades de regiões afetadas por inundações periódicas, para que sejam tomadas as medidas necessárias.

A utilização de modelos matemáticos para previsão de inundações, em substituição aos tradicionais modelos hidrológicos, mostrou-se eficaz. A aplicação de modelos hidrológicos exige uma grande quantidade de dados sobre a bacia e de um amplo conhecimento de hidrologia, o que se torna um desafio, visto a carência de dados e as dificuldades em entender e representar através de modelos, todos os fenômenos físicos que envolvem um evento de cheia.

Os métodos adotados neste trabalho são modelos matemáticos que, embora simplificados, foram testados e ajustados para medir a sua confiabilidade quando empregados para compor um sistema de previsão e alerta de inundações. Definida a área de estudo e de posse dos dados disponíveis para a área - chuva e nível do rio - , o trabalho propôs a calibração de um modelo de regressão polinomial para prever o crescimento do nível do rio Sapucaí na altura da estação Santa Rosa, localizado na área urbana itajubense, utilizando, basicamente, os dados de nível do rio de sete estações de coleta de dados à montante.

Os resultados encontrados demonstram a característica desse tipo de modelo, que é de gerar uma previsão média, simplificada, de crescimento de nível do rio, uma vez que se renuncia o uso de diversas variáveis e fenômenos que atuam durante a formação do evento de cheia, assim como desconsidera as peculiaridades de cada evento, por exemplo, a distribuição espacial da chuva. Outro fator que pode explicar

os resultados encontrados se deve à quantidade de dados e eventos para calibração do modelo, os quais foram poucos.

Está claro que um modelo para previsão de nível não é tão eficiente e confiável quanto um modelo para previsão de vazão. O motivo se dá pela sensibilidade dos modelos de previsão de níveis, que respondem a cada alteração que ocorre na bacia, provocado por diversos fatores como: desmatamento, erosão, alterações do canal, retificações, barragens entre outros fatores. Entretanto, a carência de dados e a necessidade de um sistema de monitoramento e alerta em áreas críticas, tornou o desenvolvimento desta pesquisa de grande relevância.

Uma vez ajustado o modelo, foi feito uso da plataforma TerraMA² para desenvolvimento do sistema de monitoramento e alerta. A plataforma se mostrou robusta e capaz de dar suporte à construção de sistemas que monitorem diversos parâmetros ambientais, inclusive na área de hidrologia. A geotecnologia supre uma grande carência de aplicações, principalmente em um momento de aumento considerável de ocorrência de desastres no Brasil e no mundo, já que oferece todo arcabouço computacional para desenvolvimento de sistemas de monitoramento.

O TerraMA² cumpre as necessidades gerais para construção de um sistema de monitoramento, que, quando configurados, sejam capazes de fazer a coleta de dados automaticamente, cruzem os dados geoambientais com os mapas de riscos, analisem as informações, gerem alertas e notifiquem os usuários sobre situações de risco. A confiabilidade do sistema desenvolvido sob a plataforma depende, invariavelmente, da precisão dos modelos de análises utilizados.

O TerraHidro apresentou bons resultados e foi de grande utilidade, otimizando o trabalho de geração da rede de drenagem e delimitação de bacias.

De modo geral, as duas geotecnologias utilizadas neste trabalho apresentaram bons resultados, o que validaram as suas escolhas. O TerraMA² e o TerraHidro são ferramentas desenvolvidas e distribuídas livremente, *open source*, tornando-as ainda mais viáveis e interessantes para o uso.

Esta linha de pesquisa ainda oferece diversas abordagens. Pretende-se a partir dessa dissertação, trabalhar com modelos mais realistas que garantam resultados mais confiáveis. Uma vertente que pretende-se explorar é a utilização de

sensoriamento remoto aplicado à hidrologia. O uso de modelos matemáticos também pode ser aprofundado. A revisão bibliográfica mostrou a grande capacidade de utilização de modelos estatísticos na área de hidrologia, voltadas para previsão de vazão, como exemplo, o uso de métodos de correção por resíduos, dos modelos de combinação de especialistas locais e das Redes Neurais Artificiais (RNA).

O intuito é buscar formas para prever eventos de inundações com uma maior confiabilidade, mas que, ao mesmo tempo, os métodos desenvolvidos sejam capazes de serem aplicados e implementados em diversas outras bacias hidrográficas pelo País, bacias que apresentam a recorrência de eventos de cheias que causam destruição às propriedades e riscos à sociedade.

Medidas não estruturais são ações de grande alcance e baixo custos que devem ser incentivadas, tendo em vista a necessidade de contribuir para uma cultura de prevenção e mitigação de desastres. O uso integrado de modelos de análise (modelos hidrológicos e matemáticos) com geotecnologias (plataforma TerraMA²), são importantes ferramentas de auxílio aos órgãos competentes no que tange a minimização dos efeitos causados pelas inundações. Porém, esta não é uma medida definitiva. A combinação de medidas estruturais e não estruturais, certamente, geram os melhores resultados no âmbito do controle de inundações.

6. REFERÊNCIAS

AMARAL, R.; RIBEIRO, R. R. Inundação e Enchentes. In: TOMINAGA, L. K.; SANTORO, J.; AMARAL, R. **Desastres naturais: conhecer para prevenir**. 1^o.ed., 2^oreimpressão – São Paulo: Instituto Geológico, 2011.

CASTILHO, A. S.; OLIVEIRA, L. M. Previsão Hidrológica de Vazões para a cidade de Governador Valadares utilizando modelo linear de propagação. In: XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2001, Aracaju. **Anais do XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos** - ABRH, 2001.

FERREIRA, E. R.; ECHKARDT, R. R.; HAETINGER, C.; BOTH, G.; SILVA, J. F. E.; DIEDRICH, V. L.; AZAMBUJA, J. L. F. Sistema de Previsão de Alerta de Enchentes da Região do Vale do Taquari - RS - Brasil. In: II Simpósio Brasileiro de Desastres Naturais e Tecnológicos, 2007, Santos. **Anais II Simpósio Brasileiro de Desastres Naturais e Tecnológicos**, 2007.

MARINHO Filho, G. M.; ANDRADE, R. S.; ZUKOWSKI Junior, J. C.; MAGALHÃES Filho, L. N. L. Modelos hidrológicos: conceitos e aplicabilidades. **Revista de Ciências Ambientais**, Canoas, v.6, n.2, p. 35 a 47. 2012. ISSN 1981-8858.

GIGLIO, J. N.; KOBIYAMA, M. Uso de registros históricos para análise de inundações: estudo de caso do município de Rio Negrinho. In XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos - Maceió: ABRH, **Anais**, 17p., 2011.

Gomes, A.G.; Varriale, M.C. **Modelagem de ecossistemas: uma introdução**. Santa Maria, UFSM, 2001.

GUHA-SAPIR, D.; HOYOIS, P. H.; BELOW, R. **Annual Disaster Statistical Review 2012: The Numbers and Trends**. Brussels: CRED; 2013.

GUHA-SAPIR, D.; VOS F.; BELOW R.; PONSERRE S. **Annual Disaster Statistical Review 2011: The Numbers and Trends**. Brussels: CRED; 2012.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo demográfico 2010**. (XII Censo Demográfico). Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/cidadesat/painel/painel.php?codmun=313240>> Acesso em: fev. 2014.

INPE - INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Terra Monitoramento Análise e Alerta – TerraMA²**. 2012. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/terrama2/>>. Acesso em: fev. 2014.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2007: The Physical Science Basis**. Working Group I, AR4, Chapter 11. Regional Climate Projections. Paris, 2007. Disponível em: <http://www.cptec.inpe.br/mudancas_climaticas/> Acesso em: fev. 2014.

JARVIS, A.; REUTER H.I.; NELSON, A. E. **Hole-filled SRTM for the globe Version 4, available from the CGIAR-CSI SRTM 90m Database**. 2008. Disponível em: <<http://srtm.csi.cgiar.org>> Acesso em: fev. 2014.

KOBIYAMA, M.; FRUET, D.; SAGARA, F.T.; MINELLA, J.P.G.; ZILLOTTO, M.A.B. Monitoramento e modelagem de uma pequena bacia hidrográfica experimental no município de general Carneiro - PR, Brasil. In: XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Aracajú, 2001: ABRH, **Anais**, 2001

KOBIYAMA, M.; MENDONÇA, M.; MORENO, D. A.; MARCELINO, I. P. V. O.; MARCELINO, E. V.; GONÇALVES, E. F.; BRAZETTI, L. L. P.; GOERL, R. F.; MOLLERI, G. S. F.; RUDORFF, F. M.; **Prevenção de desastres naturais: conceitos básicos**. Florianópolis: Ed. Organic Trading , 2006. 109p. p 30-47

LIH – Laboratório de Informações Hídricas. **Sistema de Monitoramento de Enchentes**. Disponível em: <<http://www.enchentes.unifei.edu.br/>> Acesso em: fev. 2014.

LOPES, E. S. S. **TerraMA²**: Manual do usuário versão 3.0.2. São José dos Campos: INPE, 2012. 158p.

LOPES, E. S. S.; MAGINA, F. C.; ALVES, M. L. Sistema automático de alerta da qualidade da água do rio Paraíba do Sul - uma aplicação do SISMA DEN. In: XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2011, Curitiba - PR. **Anais II SBSR**, 2011.

LOPES, E. S. S.; NAMIKAWA, L. M.; REIS, J. B. C. **Risco de escorregamento: monitoramento e alerta de áreas urbanas nos municípios no entorno de Angra dos Reis - Rio de Janeiro**. In: 13º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, 2011, São Paulo. Anais. 2011.

MCBEAN, G.; RODGERS, C. Climate hazards and disasters: the need for capacity building. **Interdisciplinary Reviews: Climate Change**. v.1, number 6, nov/dec 2010. ISSN 1757-7780

MICROSOFT. **Microsoft Office Excel ® (2007)**. MICROSOFT CORPORATION. 2008.

MILLY, P.C.D.; WETHERALD, R.T.; DUNNE, K.A.; DELWORTH, T.L. Increasing risk of great floods in a changing climate. 2002. **Nature** 415:514–517.

MINISTÉRIO DAS CIDADES, INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS – IPT. **Mapeamento de riscos de encostas e margens de rios**. Brasília: Ministério das Cidades; Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, 2007.

MORAES, J. M. **Rio Sapucaí – Vereda da visão de uma Alvorada**. ACR & Associados. 2003. 128 p.

OLIVO, A. A. **Modelos matemáticos para a previsão de cheias fluviais**. 2004. 151 p. Tese de Doutorado. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São José dos Campos. 2004.

PINDYCK, G. S.; RUBINFELD, D. L. **Econometric models and economic forecast**. New York: McGraw-Hill, 1999.

PINHEIRO, V. M. 2005. **Avaliação Técnica e Histórica das Enchentes em Itajubá – MG**. Dissertação de Mestrado em Engenharia da Energia, UNIFEI. Concluída em 2005.

PLANO DIRETOR DE RECURSOS HÍDRICOS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SAPUCAÍ. **Resumo Executivo**. Belo Horizonte – MG. 2010. Disponível em: <http://www.igam.mg.gov.br/images/stories/planos_diretores_BH/sapucaí.pdf> Acesso em: fev. 2014

PRIEST, S. J., PARKER, D. J., TAPSELL, S. M. Modelling the potential damage-reducing benefits of flood warnings using European Cases. **Environmental Hazards: Human and Policy Dimensions**. London, UK. v. 10, issue 2, p. 101-120. 2011. ISSN: 1747-7891.

REIS, J. B. C.; CORDEIRO, T. L.; LOPES, E. S. S. **Utilização do Sistema de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais aplicado a situações de escorregamento - caso de Angra dos Reis**. In: 14º SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 2011, Dourados, MS. Anais. 2011.

REIS, J. B. C.; SANTOS, T. B.; LOPES, E. S. S. **Monitoramento em tempo real de eventos extremos na Região Metropolitana de São Paulo – uma aplicação com o SISMADEN**. In: 14º SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 2011, Dourados, MS. Anais. 2011.

RENNÓ, C. D. **Construção de um sistema de análise e simulação hidrológica: aplicação a bacias hidrográficas**. 2003. 158 p. Tese de Doutorado. São José dos Campos: INPE, 2003.

RODRIGUES, S. C. **Mapeamento de suscetibilidade a escorregamentos de Nova Friburgo-RJ por meio de inferência fuzzy e elaboração de cenários de alerta com uso do TerraMA2**. Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto - INPE, 2013.

RODRIGUEZ, J., *et al.* **Annual Disaster Statistical Review 2008**: The numbers and trends. CRED – Centre for Research on the Epidemiology of Disaster. Université Catholique de Louvain, Brussels, Belgium, 2009. Disponível em: <<http://www.emdat.be/publications>>. Acesso em: fev. 2014.

ROSIM, S.; OLVEIRA, J. R. F.; JARDIM, A. C.; NAMIKAWA, L. M.; RENNÓ, C. D. TerraHidro: A Distributed Hydrology Modelling System With High Quality Drainage Extraction. **GEOProcessing 2013**: The Fifth International Conference on Advanced Geographic Information Systems, Applications and Services. 2013. p. 161 – 167. ISBN: 978-1-61208-251-6

STEFFEN, W.; *et al.* **Global Change and the Earth System**: A Planet Under Pressure. Springer. Germany, 2005 . p. 336. ISBN-10 3-540-26594-5.

TOMINAGA, L. K., SANTORO, J., AMARAL, R. **Desastres naturais**: conhecer para prevenir. 1º.ed.,2ªreimpressão. – São Paulo: Instituto Geológico, 2011.

TUCCI, C. E. M (Org.). **Hidrologia**: ciência e aplicação. 3º ed. – Porto Alegre: Editora da UFRGS / ABRH, 2002.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. Porto Alegre: Editora da Universidade, 1998.

UNFPA - United Nations Population Fund. **The state of world population 2001**: people and possibilities in a world of 7 bilion. Marshall A (ed).

UN-ISDR - United Nations International Strategy for Disaster Reduction. **Living with Risk**: a global review of disaster reduction initiatives. Inter-Agency Secretariat International Strategy for Disaster Reduction (ISDR), Genebra, Suíça, 2004. Disponível em: <http://www.unisdr.org>. Acesso em: fev. 2014.

UN-ISDR - United Nations International Strategy for Disaster Risk Reduction. **UNISDR Terminology on Disaster Risk Reduction**. ISDR – International Strategy for Disaster Reduction. 2009. 39 p.

APÊNDICE

APÊNDICE A

Modelos de análises utilizados no TerraMA²

Em cada análise pode-se observar a utilização do respectivo modelo de regressão polinomial ajustado e dos limiares críticos definidos para cada nível de alerta. Estes modelos desenvolvidos no TerraMA² são escritos com Linguagem de Programação LUA e utilizam operadores espaciais TerraLib.

Para facilitar a compreensão da regra de análise adotada nos modelos de análise no TerraMA², a seguir, é feita a descrição por partes. Para isto, foi escolhida uma análise para explicação: Analise_SantaRosa(AguaLimpa_prev3h).

As cores representam:

- **Azul** = Funções da Linguagem de Programação LUA;
- **Verde** = Fontes de dados;
- **Vermelho** = Comentários;
- Preto = Variáveis e valores.

A análise completa:

```

local var1 = minimo('Nivel', 'nivel', cod_est1)

local nivel = 0.0098 * var1^3 - 0.241 * var1^2 + 1.6529 * var1 + 0.2581

if nivel < 2.2 then
  return 0 -- Normal
elseif nivel < 3.2 then
  return 1 -- Observacao
elseif nivel < 4.2 then
  return 2 -- Atencao
else
  return 4 -- Alerta maximo
end

```

Análise por partes:

```

local var1 = minimo('Nivel', 'nivel', cod_est1)

```


Esta linha define uma nova variável, denominada de “**var1**”, que será inicializada com o valor do operador zonal “**minimo**”. Na prática, é feita a busca pelo valor de nível na área em análise e, tendo em vista que estamos trabalhando com o nível em pontos que representam as estações, é retornado o valor de nível observado.

```
local nivel = 0.0098 * var1^3 - 0.241 * var1^2 + 1.6529 * var1 + 0.2581
```

A linha representa a aplicação da equação ajustada para prever o crescimento do nível do rio Sapucaí. A cada novo dado de entrada, representado por “**var1**”, é executada a análise, resultando no valor de “**nivel**”.

```
if nivel < 2.2 then
  return 0 -- Normal
elseif nivel < 3.2 then
  return 1 -- Observacao
elseif nivel < 4.2 then
  return 2 -- Atencao
else
  return 4 -- Alerta maximo
end
```

Nas linhas acima, são definidos os níveis de alerta. De acordo com o resultado da equação, se o valor de “**nivel**” for menor do que o valor “**2.2**” (unidade em metros, neste caso, significa: 2,2 metros) é retornado o nível de alerta “**0**”, que indica um estado normal. Seguindo as definições do exemplo, se o “**nivel**” for maior do que “**2.2**” e menor do que “**3.2**”, retorna o estado “**1**”, de observação. Caso o valor esteja entre “**3.2**” e “**4.2**”, retorna “**2**”, estado de atenção, e, por fim, se o “**nivel**” for maior do que “**4.2**”, então retorna “**4**”, estado de alerta máximo.

Há a presença de comentários após a definição dos níveis de alerta. Estes comentários não desempenham nenhuma função nas análises. Todo texto de uma linha precedido por dois sinais de menos consecutivos (--), torna-se apenas um comentário, geralmente de caráter informativo.

Analise_SantaRosa(AguaLimpa_prev3h):

```

local var1 = minimo('Nivel', 'nivel', cod_est1)

local nivel = 0.0098 * var1^3 - 0.241 * var1^2 + 1.6529 * var1 + 0.2581

if nivel < 2.2 then
    return 0 -- Normal
elseif nivel < 3.2 then
    return 1 -- Observacao
elseif nivel < 4.2 then
    return 2 -- Atencao
else
    return 4 -- Alerta maximo
end

--

```

Analise_SantaRosa(AguaLimpa_prev4h):

```

local var1 = minimo('Nivel', 'nivel', cod_est1)

local nivel = 0.023 * var1^3 - 0.3077 * var1^2 + 1.7474 * var1 + 0.2991

if nivel < 2.2 then
    return 0 -- Normal
elseif nivel < 3.2 then
    return 1 -- Observacao
elseif nivel < 4.2 then
    return 2 -- Atencao
else
    return 4 -- Alerta maximo
end

--

```

Analise_SantaRosa(Santana_prev3h):

```

local var1 = minimo('Nivel', 'nivel', cod_est2)

```

```
local nivel = - 0.0004 * var1^3 - 0.2031 * var1^2 + 1.9573 * var1 + 0.5016
```

```
if nivel < 2.2 then
  return 0 -- Normal
elseif nivel < 3.2 then
  return 1 -- Observacao
elseif nivel < 4.2 then
  return 2 -- Atenção
else
  return 4 -- Alerta maximo
end
```

```
--
```

Analise_SantaRosa(Santana_prev4h):

```
local var1 = minimo('Nivel', 'nivel', cod_est2)
```

```
local nivel = - 0.0033 * var1^3 - 0.208* var1^2 + 2.0045 * var1 + 0.5381
```

```
if nivel < 2.2 then
  return 0 -- Normal
elseif nivel < 3.2 then
  return 1 -- Observacao
elseif nivel < 4.2 then
  return 2 -- Atenção
else
  return 4 -- Alerta maximo
end
```

```
--
```

Analise_SantaRosa(SaoPedro_prev3h):

```
local var1 = minimo('Nivel', 'nivel', cod_est2)
```

```
local nivel = - 0.0068 * var1^3 - 0.1823 * var1^2 + 1.868 * var1 - 0.9054
```

```
if nivel < 2.2 then
  return 0 -- Normal
```

```

elseif nivel < 3.2 then
  return 1 -- Observacao
elseif nivel < 4.2 then
  return 2 -- Atencao
else
  return 4 -- Alerta maximo
end

```

```
--
```

Analise_SantaRosa(SaoPedro_prev4h):

```

local var1 = minimo('Nivel', 'nivel', cod_est2)

local nivel = - 0.0177 * var1^3 - 0.127 * var1^2 + 1.7982 * var1 - 0.8146

if nivel < 2.2 then
  return 0 -- Normal
elseif nivel < 3.2 then
  return 1 -- Observacao
elseif nivel < 4.2 then
  return 2 -- Atencao
else
  return 4 -- Alerta maximo
end

```

```
--
```

Analises_PCDs:

```

if object_id == 'AguaLimpa' then

  if nivel < 1.6 then
    return 0 -- Normal
  elseif nivel < 2.6 then
    return 1 -- Observacao
  elseif nivel < 3.6 then
    return 2 -- Atencao
  else
    return 4 -- Alerta maximo
  end
end

```

end

if object_id == 'SaoPedro' then

```
    if nivel < 1.8 then
        return 0 -- Normal
    elseif nivel < 2.2 then
        return 1 -- Observacao
    elseif nivel < 3.2 then
        return 2 -- Atenção
    else
        return 4 -- Alerta maximo
    end
end
```

end

if object_id == 'Santana' then

```
    if nivel < 1.56 then
        return 0 -- Normal
    elseif nivel < 2.56 then
        return 1 -- Observacao
    elseif nivel < 3.56 then
        return 2 -- Atenção
    else
        return 4 -- Alerta maximo
    end
end
```

end

if object_id == 'Borges' then

```
    if nivel < 0.9 then
        return 0 -- Normal
    elseif nivel < 1.4 then
        return 1 -- Observacao
    elseif nivel < 2.4 then
        return 2 -- Atenção
    else
        return 4 -- Alerta maximo
    end
end
```

end

if object_id == 'Cantagalo' then

```
    if nivel < 1.6 then
        return 0 -- Normal
    elseif nivel < 2.1 then
        return 1 -- Observacao
    elseif nivel < 3.1 then
        return 2 -- Atenção
    else
```

```
        return 4 -- Alerta maximo
    end
end
```

```
if object_id == 'SantaRosa' then
```

```
    if nivel < 2.2 then
        return 0 -- Normal
    elseif nivel < 3.2 then
        return 1 -- Observacao
    elseif nivel < 4.2 then
        return 2 -- Atenção
    else
        return 4 -- Alerta maximo
    end
end
```

```
if object_id == 'DelfimMoreira' then
```

```
    if nivel < 0.3 then
        return 0 -- Normal
    elseif nivel < 0.59 then
        return 1 -- Observacao
    elseif nivel < 1.59 then
        return 2 -- Atenção
    else
        return 4 -- Alerta maximo
    end
end
```

