

MONITORAMENTO E ALERTA DE INUNDAÇÃO NO MUNICÍPIO DE ITAJUBÁ (MG) POR REGRESSÃO POLINOMIAL

João Bosco Coura dos REIS¹, Nívea Adriana Dias PONS², Eymar Silva Sampaio LOPES³

- (1) Pós-graduação em Sensoriamento Remoto, Departamento de Sensoriamento Remoto, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Av. dos Astronautas, 1758, Jardim Uirá. CEP 12227-010, São José dos Campos – São Paulo. Endereço eletrônico: joaodosreis89@gmail.com
- (2) Instituto de Recursos Naturais, Universidade Federal de Itajubá, Campus de Itajubá. Av. BPS, 1303, Bl. 08 – Bairro Pinheirinho. CEP 37500-903, Itajubá – Minas Gerais. Endereço eletrônico: niveadpons@gmail.com
- (3) Divisão de Processamento de Imagens, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Av. dos Astronautas, 1758, Jardim Uirá. CEP 12227-010, São José dos Campos – São Paulo. Endereço eletrônico: eyymar@dpi.inpe.br

- Introdução
- Objetivo
- Material e métodos
 - Área de estudo
 - Descrição da bacia
 - O município de Itajubá
 - Material
 - Dados de nível fluviométrico
 - Metodologia
 - Organização da série temporal de nível fluviométrico
 - Ajuste do modelo para previsão de nível
 - Elaboração da base de dados hidrológicos
 - Desenvolvimento do Sistema de Monitoramento e Alerta
- Resultados e discussões
 - Resultados da organização dos dados
 - Validação e resultados do modelo de regressão polinomial
 - Sistema de monitoramento e alerta de inundação
- Conclusões
- Agradecimentos
- Referências

RESUMO - A falta de planejamento para ocupações de bacias hidrográficas brasileiras tem exposto a população aos perigos hidrometeorológicos. Tem-se buscado novas formas de mitigação e adaptação aos efeitos causados pelos eventos extremos e, dentre as 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. Foi definida como área de estudo o município de Itajubá, na região sul do Estado de Minas Gerais, em razão da periodicidade de ocorrência de eventos de inundações no rio Sapucaí. Nesse contexto, o trabalho propôs a aplicação de técnicas estatísticas, como regressão polinomial, a fim de gerar a previsão do crescimento de nível do rio em uma seção de interesse, utilizando registros de níveis fluviométricos. Após ajuste e calibração do modelo matemático, o modelo foi implementado na plataforma TerraMA², que resultou em um sistema de monitoramento capaz de produzir alertas consistentes com 4 horas de antecedência, apresentando alta correlação entre os dados observados e a série prevista. Este sistema de alerta pode auxiliar a tomada de decisões, gerando uma estimativa confiável de crescimento de nível do rio, com objetivo de reduzir a perda de vidas e os danos materiais.

Palavras-chave: geotecnologia, sistema de monitoramento, previsão de nível, regressão polinomial, rio Sapucaí.

ABSTRACT - In Brazil, the lack of watershed occupations plans has exposed the population to hydrometeorological hazards. New ways to mitigate and adapt to the extreme effects has been investigated along the last years and, taking the non-structural measures into account, the use of geotechnologies becomes an important prevention tool for creating monitoring and early warning systems in cases of flooding. The study area defined for this study is located in the municipality of Itajubá, in the southern of Minas Gerais State, due to the frequency of flood events in Sapucaí River. In this context, it is proposed the application of statistical techniques, as polynomial regression, in order to predict the increasing of water levels in a specific section of the river, using records of water levels data. After adjustment and calibration of the mathematical model, it was implemented in the TerraMA² platform, resulting in a monitoring system that was able to produce consistent alerts of 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 generating a reliable estimate of increasing river levels, in order to reduce the loss of life and properties' damage.

Keywords: geotechnology, monitoring system, level forecasting, polynomial regression, Sapucaí River.

INTRODUÇÃO

No último século foi visto 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). McBean & Rodgers (2010) destacaram que o crescimento

contínuo da população tem contribuído para a superlotação das áreas urbanas, levando pessoas a viver, por escolha ou circunstância, em locais geograficamente vulneráveis, como em áreas de risco.

O aumento populacional provoca, conseqüentemente, um aumento das atividades econômicas, industriais e da urbanização, as quais, pela complexa relação de causa e efeito, deflagram diversos efeitos no sistema terrestre (Steffen et al., 2004).

Mudanças climáticas desencadeadas pelas atividades antrópicas têm mudado a frequência de eventos extremos e os perigos hidrometeorológicos, como inundações e enchentes, tem se tornado mais frequente (IPCC, 2007). Milly et al. (2002) demonstraram através de observações e análises que mudanças na composição da atmosfera, conduzem para uma intensificação do ciclo da água no mundo com um conseqüente aumento de risco de grandes inundações. Em artigo mais recente, Milly et al. (2008) alertaram para as alterações na média e nos extremos de precipitação, evapotranspiração e taxa de vazão dos rios, que desempenham um importante impacto nas funções e no comportamento da bacia hidrográfica.

No Brasil, os desastres são resultantes principalmente da dinâmica externa da Terra e estão associados a eventos pluviométricos intensos e prolongados com potencial de desencadear eventos de inundações e movimentos de massa. A combinação de eventos pluviométricos extremos, condicionantes naturais e ocupação irregular da bacia hidrográfica, faz com que o Brasil seja palco de recorrentes eventos de inundações (Tominaga et al., 2011).

O *Annual Disaster Statistical Review 2008* classificou o Brasil como um dos países mais afetados por inundações, onde o número de eventos tem aumentado nos últimos anos do período de 1940 a 2008, como conseqüência, são responsáveis por um grande número de vítimas e prejuízos econômicos (Rodriguez et al., 2009). Em 2011 o Brasil registrou cerca de 3,7 milhões de vítimas durante todo o ano, sendo, predominantemente, vítimas de eventos hidrometeorológicos. No mesmo ano o País presenciou a ocorrência do maior desastre da

sua história, que causou a morte de aproximadamente 900 pessoas na região serrana do Rio de Janeiro (Guha-Sapir et al., 2012).

Este cenário de desastres, vítimas e prejuízos econômicos tem demonstrado a limitação do governo em responder adequadamente aos eventos naturais extremos. Desse modo tem-se buscado novas formas de prevenir e mitigar os resultados causados por esses eventos, tanto através de medidas estruturais, quanto com medidas não estruturais. Entretanto, pouco destaque é dado para medidas não estruturais, que possuem capacidade de minimizar significativamente os prejuízos decorrentes dos desastres a um custo menor.

Dentre as medidas não estruturais, a implantação de sistemas de monitoramento e previsão de inundações é capaz de auxiliar na capacidade preventiva para atenuar os efeitos dos eventos extremos de inundações para a população. Para a *United Nations International Strategy for Disaster Reduction*, os sistemas de monitoramento e alerta devem integrar a comunidade técnica e científica, as autoridades e a sociedade, para que os alertas de previsão e detecção de eventos extremos orientem as respostas adequadas para se preparar contra os perigos naturais (UN-ISDR, 2004).

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 (Kobiyama et al., 2006). A necessidade de medidas para prevenir e mitigar os danos causados pelas recorrentes inundações em bacias transnacionais na Europa, conduziu à criação do *European Flood Awareness System* (EFAS), que tem como objetivo prover alertas com antecedência suficiente para a tomada de ações necessárias (Thielen et al., 2009).

A concepção de sistemas de monitoramento e alerta de inundação passa fundamentalmente pela utilização de modelos hidrológicos, que permitem simular e representar o movimento da água na natureza. Devido à natureza simuladora do ciclo hidrológico, os modelos estão fortemente embasados na natureza física dos processos hidrológicos, exigindo dados bastante completos da bacia hidrográfica, além

de amplos conhecimentos em Hidrologia (Olivo, 2004).

De forma geral, os modelos exigem uma grande quantidade de dados e informações da bacia hidrográfica, como dados dos seus aspectos físicos, de extensas séries temporais de dados hidrometeorológicos, e de recursos humanos e computacionais - situação raramente encontrada em bacias hidrográficas brasileiras. Diante dessa realidade, Olivo (2004) desenvolveu um modelo empírico que, mesmo omitindo a complexa natureza física dos processos hidrológicos, gerou resultados satisfatórios necessários para previsão de crescimento de nível do rio Itajaí, para ser aproveitado em um sistema de alarme-resposta, utilizando para este fim, basicamente, dados de nível fluviométrico.

Castilho & Oliveira (2001) utilizaram técnicas estatísticas para tratar problemas hidrológicos. Por meio de um modelo linear de propagação, as autoras desenvolveram um sistema de previsão hidrológica de vazões para a cidade de Governador Valadares (MG), que foi possível devido à grande quantidade de dados disponível, em uma discretização adequada.

No Brasil, mesmo nas bacias que possuem algum tipo de coleta de dados, são realizadas apenas a coleta de dados de nível fluviométrico e precipitação, o que limita o uso de modelos hidrológicos. Frente a indisponibilidade de dados e informações sobre bacias hidrográficas, considera-se relevante 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, subsidiando com antecedência suficiente a tomada de decisões por parte dos órgãos competentes.

Objetivo

O presente estudo teve o objetivo de ajustar e validar a utilização de modelos de regressão polinomial para prever o crescimento do nível do rio Sapucaí em uma seção de interesse, a partir do nível observado em um ponto a montante, utilizando apenas registros de níveis fluviométricos, tendo em vista compor um sistema de monitoramento e alerta de inundações em tempo real para o município de Itajubá (MG).

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

Descrição da bacia

Segundo o 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, considerando que a área de estudo do trabalho é o município de Itajubá (MG), torna-se relevante o trecho do alto Sapucaí (Figura 1).

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 planície do município de Itajubá. Isto é, a maior declividade no trecho a montante provoca uma maior concentração na área urbana itajubense, características que favorecem a ocorrência de inundações no município, o que torna importante o desenvolvimento de sistemas de monitoramento.

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 Mesotérmico Brando, caracterizado por temperaturas amenas durante todo o ano, com médias entre 18°C e 19°C. A precipitação média anual é de aproximadamente 1.500 mm, podendo ocorrer 1 ou 2 meses sem chuva.

A vegetação da região 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 silviculturas, além da expansão das áreas urbanas e da malha viária.

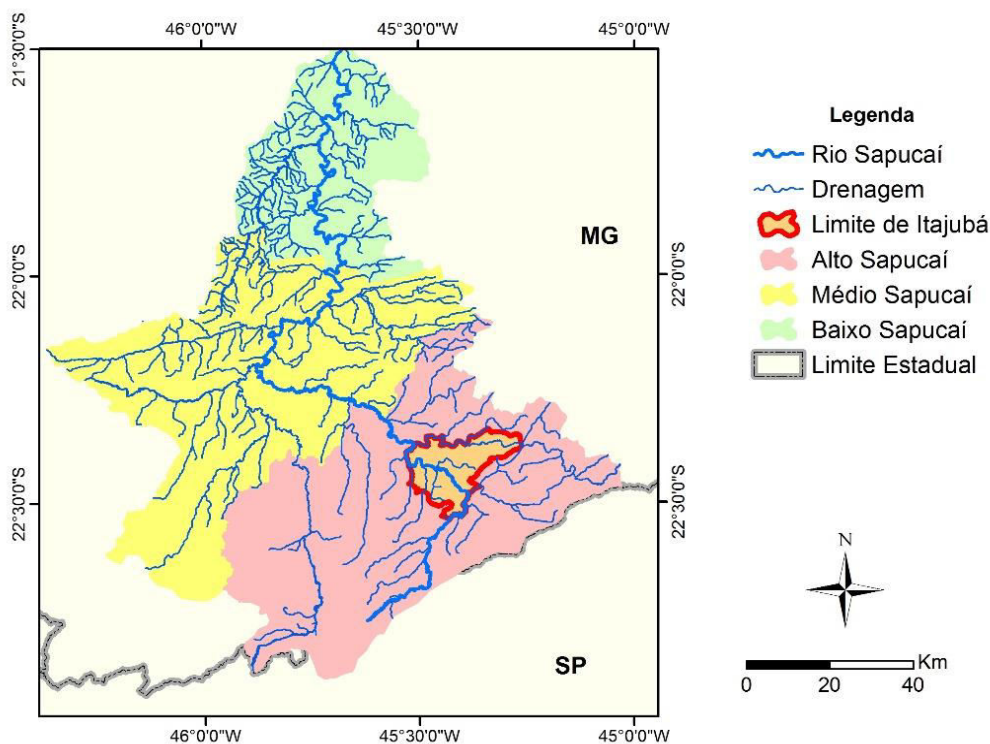


Figura 1. Localização da área de estudo.

O Município de Itajubá

O município de Itajubá está situado na região sul do Estado de Minas Gerais, segundo o Censo Demográfico de 2010 (IBGE, 2010), apresenta uma população de 90.658 habitantes em uma área de 295 km².

No seu percurso, o rio Sapucaí atravessa a área urbana do município itajubense e, tendo em vista a característica histórica de ocupação desordenada na planície de inundação do rio, considerada área de risco em razão da recorrência de eventos de cheia, cria-se um dos principais problemas a serem enfrentados pela população.

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, com baixa declividade média do rio Sapucaí.

Em relação à precipitação, 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, 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.

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.

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, 2014). O SME é composto por uma rede de 18 estações de coleta de dados de nível fluviométrico e precipitação distribuídos pela bacia do rio Sapucaí. Foram utilizados dados de nível fluviométrico apenas das 7 estações situadas à montante de Itajubá, sendo elas: 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 2.

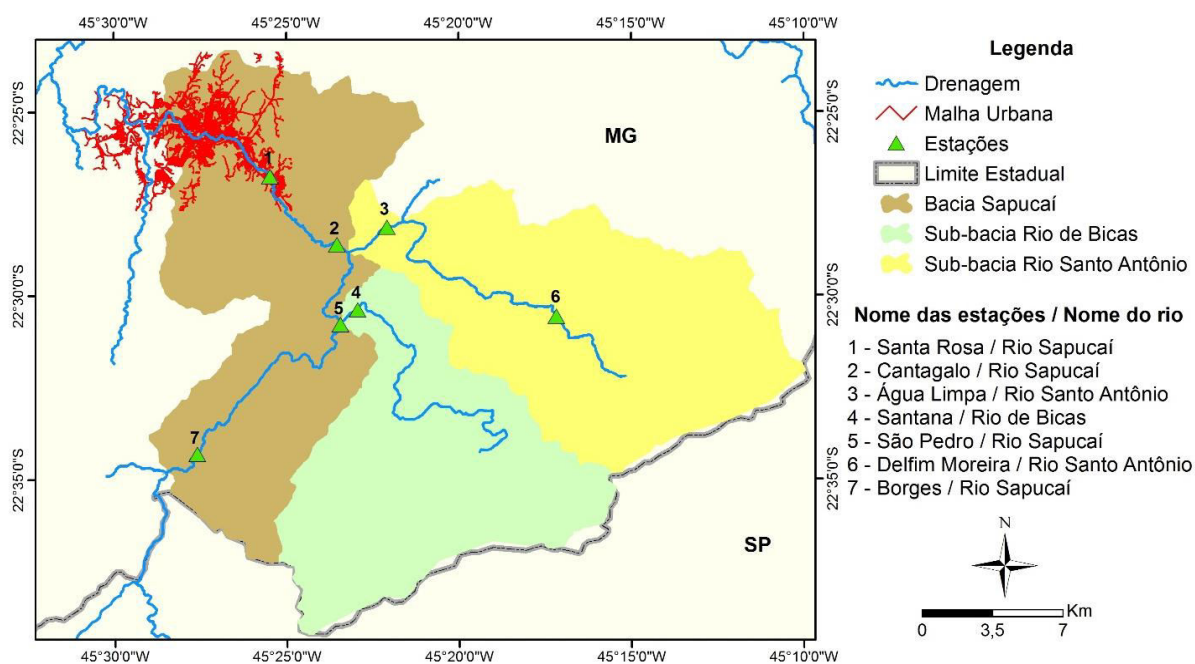


Figura 2. Localização das estações de coleta de dados.

Metodologia

Segue de forma sintética as etapas de

desenvolvimento da pesquisa (Figura 3).

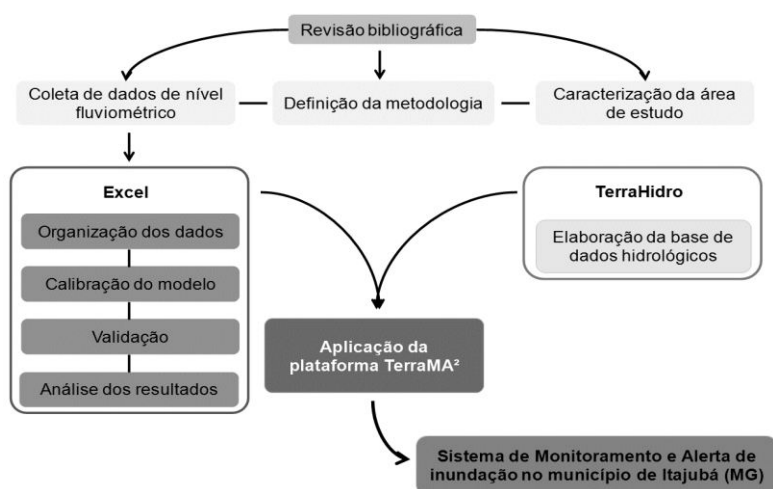


Figura 3. Fluxograma com as etapas de desenvolvimento do trabalho.

Organização da série temporal de nível fluviométrico

Os dados de nível fluviométrico recebidos das 7 estações de coleta de dados compreendem o período de janeiro de 2009 a maio de 2013. Os intervalos entre as leituras variavam, apresentando períodos com leituras mais frequentes, com intervalos de 10 minutos, até períodos com intervalos máximos de 1 hora. A variação do intervalo se deve ao fato do aumento da frequência de coleta de dados durante os eventos de precipitação, manutenção nas estações, falhas de leituras, sensores descalibrados, entre outros fatores.

Foi feita uma homogeneização dos intervalos entre as leituras de cada estação, de forma a manter apenas as rodadas horárias, pelas seguintes etapas:

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

Em razão das necessidades e das peculiaridades do modelo de regressão adotado, tornou-se interessante apenas a fase de ascensão da onda de cheia para o ajuste do modelo. Dessa forma, buscou-se capturar toda a fase de ascensão da onda de cheia na estação Santa Rosa - seção de controle -, e, posteriormente, foram selecionados dados de nível das outras seis estações com diferentes horas de antecedência.

Os procedimentos adotados nesta fase foram:

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

Os dados de nível do rio apresentavam, originalmente, valores em cotas altimétricas,

sendo então transformados em nível, mantendo a unidade em metros.

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. Foi feita a separação do conjunto de dados, entre os eventos utilizados na fase de calibração e dois eventos de cada estação para a fase de validação do modelo.

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 um modelo simplificado, 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 fosse 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 a montante: Água Limpa, Borges, Cantagalo, Delfim Moreira, Santana e São Pedro. Uma das opções para se determinar esta relação, foi obtendo a correlação entre elas através de regressão de regressão cúbica, tendo em vista as características das curvas que retratam as ondas de cheias serem do tipo “S”.

Foi usado na fase de calibração o método dos mínimos quadrados ordinários para encontrar os melhores estimadores dos coeficientes β 's, que minimizem o erro quadrático da seguinte equação adotada (Equação 1):

$$Y(t + Alcance) = \beta_0 + \beta_1 X(t) + \beta_2 X^2(t) + \beta_3 X^3(t) + \varepsilon(t) \quad (1)$$

Para verificar a influência das estações situadas a montante de Itajubá no nível observado na estação Santa Rosa, foi feita uma análise exploratória dos dados, onde foram

realizadas análises de regressão polinomial cúbica, com o objetivo de ajustar um modelo da seguinte forma (Equação 2):

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

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 mede a fração da variação da variável dependente que é explicada pelo modelo ajustado (Pindyck & Rubinfeld, 1999).

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. O objetivo do *plugin* é 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 a perda da qualidade dos resultados.

O TerraHidro depende de uma estrutura de dados que represente a topografia do terreno. Para isto, foi definido como base o modelo digital de elevação (MDE) *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) (NASA SRTM, 2014).

Para alimentar o Sistema de Monitoramento e Alerta desenvolvido no TerraMA², 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, os quais foram determinados a partir de Rosim et al. (2013).

1. Importação do 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 o limiar (*Threshold*) de 50000, que indica que todas as células da grade com valores iguais ou maiores do que o limiar, com base na grade calculada na etapa anterior (área de contribuição), foram definidas como células de drenagem;
5. Segmentação (*Segments*) da rede de drenagem;
6. Delimitação de bacias (*Mini Basins*) a partir da drenagem segmentada;
7. Transformação matriz \rightarrow vetor.

Desenvolvimento do Sistema de Monitoramento e Alerta

O suporte computacional utilizado para desenvolvimento do sistema de monitoramento e alerta desta pesquisa foi a plataforma TerraMA² (INPE, 2012), que permite integrar dados de diversas fontes (dados ambientais dinâmicos e estáticos) por meio de um modelo de análise.

Entre os tipos de dados tratados pela plataforma (Lopes, 2012), foram utilizados os seguintes tipos:

- Dados ambientais dinâmicos: dados de níveis fluviométricos de sete estações de coleta de dados;
- Objeto monitorado: ponto de localização de cada estação de coleta de dados;
- Dados adicionais: dados hidrológicos como limites das bacias e drenagem, gerados pelo TerraHidro, além da malha urbana e da delimitação do município de Itajubá, que auxiliam na localização e entendimento das áreas monitoradas, das populações e dos equipamentos vulneráveis às inundações.

Para criação do sistema de monitoramento, foram definidos os parâmetros dos serviços de coleta de dados, de análise, de notificação, de animação e de gerência de planos no módulo de administração. No módulo de configuração foram definidas as tarefas para serem executadas pelos serviços de coleta, no caso a

coleta de cada estação hidrometeorológica, armazenadas em arquivos textuais (.txt) e as análises escritas em linguagem de programação LUA.

O modo de estudo da plataforma TerraMA² permite simular a coleta dos dados num determinado período do passado e executar reanálises. Portanto, como os dados de nível fluviométrico utilizados neste trabalho foram de eventos do passado, janeiro de 2009 a maio de 2013, e pretendeu-se realizar várias análises testes, optou-se pela criação de um banco de estudos.

Uma vez calibradas as análises, é possível definir um banco de operações. Neste caso os dados são coletados em tempo real, oriundos de servidores externos, pela *internet*, por exemplo, e as análises executadas a cada novo dado de nível fluviométrico.

Os níveis utilizados para detecção de estados críticos foram estabelecidos através das informações disponibilizadas pelo Laboratório de Informações Hídricas (LIH, 2014). 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 1).

Tabela 1. Níveis de alerta das estações. Fonte: LIH (2013).

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

Além das análises para previsão de crescimento do rio Sapucaí na altura da estação Santa Rosa, também foi gerada uma análise baseada em PCD (Plataforma de Coleta de Dados) para monitorar a variação dos níveis dos rios em cada estação. Foi feito uso dos parâmetros apresentados na Tabela 1 para gerar alertas nas estações. As análises baseadas em PCDs 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 seguiram a seguinte metodologia:

- *Análise_Seção de Controle (Variável Explicativa _Tempo de Previsão)*

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Resultados da organização dos dados

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 dados disponíveis e das fases sem coleta ou com

dados falhos, foram selecionados os poucos eventos disponíveis para ajuste e validação do modelo. Pode-se observar que a quantidade de eventos selecionados variou entre cada estação (Tabela 2).

Tabela 2. Número de eventos.

Estações	Nº de eventos
1. Santa Rosa	15
2. Cantagalo	10
3. Água Limpa	10
4. Santana	10
5. São Pedro	7
6. Delfim Moreira	5
7. Borges	15

A tabela 3 permite observar os valores de R^2 que foram gerados utilizando como variáveis explicativas os níveis dos rios medidos nas estações de Água Limpa, Borges, Cantagalo, Delfim Moreira, Santana e São Pedro, defasados em relação a estação Santa Rosa. De

posse dos valores de R^2 , foi possível identificar as melhores variáveis explicativas para o nível em Santa Rosa e, a partir disso, foram considerados apenas os maiores valores de R^2 para os testes posteriores.

Tabela 3. 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
2. Cantagalo	0,89	0,86	0,81	0,74	-	-	-	-	-	-	-
3. Água Limpa	0,68	0,74	0,78	0,79	0,76	0,72	0,68	-	-	-	-
4. Santana	-	0,82	0,86	0,87	0,85	0,81	0,77	-	-	-	-
5. São Pedro	-	-	0,88	0,86	0,8	0,72	0,64	0,55	-	-	-
6. Delfim Moreira	-	-	-	-	0,74	0,72	0,68	0,64	0,61	0,59	0,58
7. Borges	-	-	-	0,67	0,69	0,69	0,67	0,64	0,61	0,57	-

Conforme apresentado na Figura 2, a distribuição das estações de coleta de dados ao longo da bacia segue o seguinte padrão: Delfim Moreira e Água Limpa concentram a vazão do rio Santo Antônio, afluente do rio Sapucaí; Santana está situada no Rio de Bicas, outro 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 a montante.

Tendo em vista os resultados apresentados pelo R^2 , a posição e distância de cada estação em relação a Santa Rosa e o objetivo do trabalho de criar um sistema de previsão de inundações, foram selecionadas as estações mais representativas para o desenvolvimento da pesquisa.

Apesar da estação Cantagalo ter apresentado altos valores de R^2 , não foi considerada adequada para previsão em razão da curta distância em relação à Santa Rosa (6 km) e do pouco tempo que a onda de cheia leva para alcançar a seção de controle.

Sendo assim, após avaliação de uso de cada estação, as estações Água Limpa, Santana e São Pedro foram adotadas como variáveis explicativas do nível em Santa Rosa, para previsões de 4 horas, devido aos valores de R^2 ,

pelo tempo de resposta e por essas três estações representarem a vazão recebida pelas três sub-bacias que compõem o trecho estudado.

Os resultados da fase de calibração do modelo para prever o crescimento do nível do rio na estação Santa Rosa são apresentados em conjunto com algumas estatísticas da regressão polinomial, que auxiliam a análise dos resultados.

Na tabela 4 são apresentados os resultados. A legenda destas variáveis encontra-se a seguir:

- NSR (t+4h): variáveis representativas dos níveis previstos na estação Santa Rosa, com alcance de previsão de 4 horas;
- NX (t): variáveis representativas do nível do rio observado nas estações Água Limpa, Santana e São Pedro;
- $[NX(t)]^2$: quadrado das variáveis;
- $[NX(t)]^3$: cubo das variáveis;
- R^2 : Coeficiente de Determinação;
- 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, Santana e São Pedro, para previsão de 4 horas (Tabela 4):

Tabela 4. Estatísticas da regressão cúbica: Santa Rosa (t+4h) versus Água Limpa, Santana e São Pedro.

Estação	R ²	MAD(m)	RMSE	Beta NSR(t+4h)	Beta NX(t)	Beta [NX(t)] ²	Beta [NX(t)] ³
Água Limpa	0,82	0,833	0,194	0,2991	1,7474	-0,3077	0,023
Santana	0,854	0,824	0,126	0,5381	2,0045	-0,2080	-0,0033
São Pedro	0,892	0,689	0,078	-0,8146	1,7982	-0,127	-0,0177

As equações resultantes para previsão de 4 horas, utilizando como variáveis independentes

os níveis em Água Limpa (Equação 3), Santana (Equação 4) e São Pedro (Equação 5):

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

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

$$NSR(t + 4h) = -0,8146 + 1,7982 * NSP(t) - 0,127 * [NSP(t)]^2 - 0,0177 * [NSP(t)]^3 \quad (5)$$

Validação e resultados do modelo de regressão polinomial

Foram selecionados de forma aleatória 2 eventos de cada uma das três estações definidas como variáveis explicativas (Água Limpa, Santana e São Pedro) do nível do rio Sapucaí na seção de controle, para a fase de validação. A duração de ocorrência de cada evento varia, desde eventos mais curtos, de 13 horas aproximadamente, até mais longos, durando 50 horas.

Os eventos escolhidos foram aplicados nos modelos ajustados para previsão de 4 horas. Os resultados são analisados a partir dos valores encontrados para os seguintes testes estatísticos: erro médio quadrático (RMSE) para medir a diferença 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 (R²).

A tabela 5 apresenta as estatísticas obtidas na validação dos eventos 1 e 2 de cada estação (Água Limpa, Santana e São Pedro) para explicar o nível em Santa Rosa.

A validação do modelo de previsão de 4 horas, utilizando os eventos em Água Limpa (Tabela 5), apresentou melhores resultados quando analisado o evento 2, com erro médio de aproximadamente 56,7 cm, enquanto para o evento 1, o erro foi maior, de 93,7 cm. Os valores de R² para os dois eventos em Água Limpa foram maiores de 80%.

Tabela 5. Resultados dos testes estatísticos: Santa Rosa versus Água Limpa, Santana e São Pedro.

		RMSE	MAD (m)	R ²
Água Limpa	Evento 1	0,2873	0,9372	0,8476
	Evento 2	0,0759	0,5667	0,8619
Santana	Evento 1	0,1469	0,898	0,8982
	Evento 2	0,0871	0,6384	0,9604
São Pedro	Evento 1	0,0613	0,6651	0,9858
	Evento 2	0,0676	1,0494	0,9582

A figura 4 ilustra as curvas previstas e a observada em Santa Rosa para os eventos 1 e 2. Pode-se observar que o evento 2, como demonstra as análises estatísticas, apresentou uma maior aderência, principalmente na previsão do pico de cheia, fato importante para

um sistema de monitoramento de inundações, enquanto o evento 1 subestimou o nível atingido pelo rio Sapucaí durante o evento em quase 1 metro.

Em relação às estatísticas obtidas na validação dos eventos 1 e 2 referentes a estação

Santana (Tabela 5), a previsão de 4 horas apresentou um R^2 de 96% para o evento 2, resultado mais preciso em relação ao evento 1. O erro médio do evento 2 foi de 63,8 centímetros aproximadamente, enquanto o evento 1 resultou em um valor aproximado de 89,8 cm.

A Figura 5 ilustra as curvas previstas e a observada em Santa Rosa. É possível observar que o resultado da previsão para o evento 2 apresentou maior aderência, acompanhando a variação do nível do rio Sapucaí observado, apesar de ter superestimado a fase de ascensão e subestimado o pico de cheia.

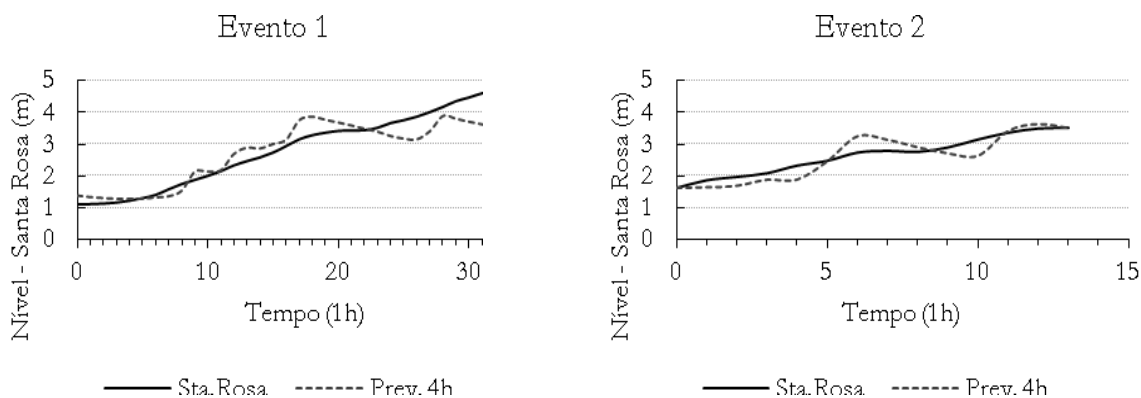


Figura 4. Evento 1 e 2: nível previsto e o observado no rio Sapucaí: Santa Rosa versus Água Limpa.

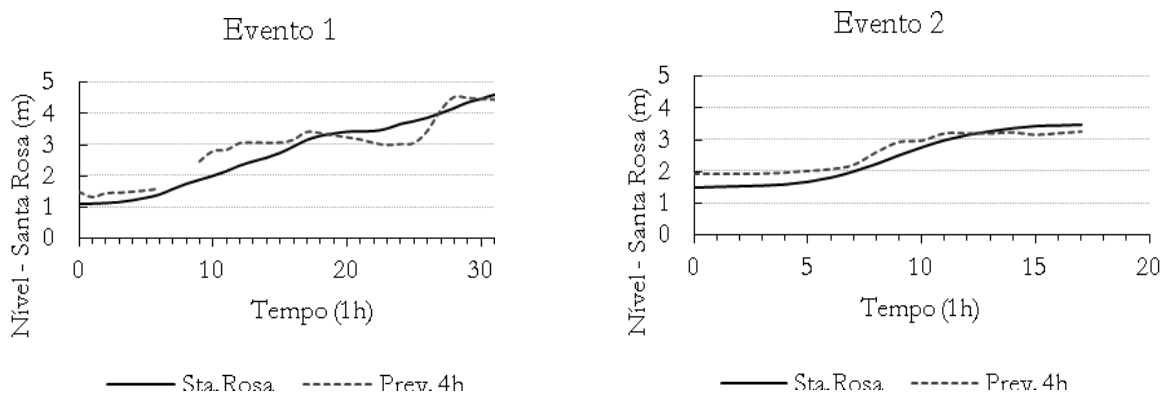


Figura 5. Evento 1 e 2: nível previsto e o observado no rio Sapucaí: Santa Rosa versus Santana.

Os resultados das estatísticas dos dois eventos selecionados para representar São Pedro, apresentaram altos valores de R^2 , acima de 95%. Ao mesmo tempo, em comparação com as outras estações, os eventos 1 e 2 apresentaram um erro médio absoluto maior, de aproximadamente 66,5 cm e 1 m.

Como a intenção é utilizar os modelos ajustados como modelos de 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, somado ao fato de que esta estação representa a vazão oriunda de toda a cabeceira do rio Sapucaí. A análise visual da figura 6 permite observar, principalmente, a maior precisão na previsão do pico de cheia

para os dois eventos, característica importante, tendo em vista a sua aplicação em sistemas de monitoramento e alerta. No evento dois, a previsão subestimou a fase de ascensão, porém previu com precisão o nível máximo atingido pelo rio durante o evento.

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, o que auxilia a tomada de medidas e ações necessárias a fim de minimizar os danos causados pelos eventos de inundações.

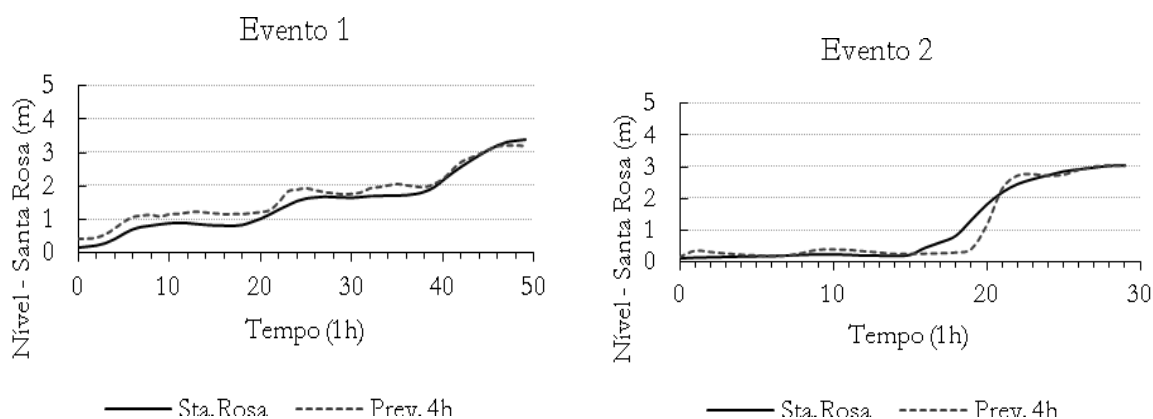


Figura 6. Evento 1 e 2: nível previsto e o observado no rio Sapucaí: Santa Rosa *versus* São Pedro.

Olivo (2004) observou que, quando testados e validados com dados de níveis fluviométricos, estes modelos de regressão polinomial podem ser utilizados para construir um modelo de previsão em tempo real com confiabilidade necessária para ser utilizado em um sistema de monitoramento e previsão em bacias com escassez de dados.

Sistema de monitoramento e alerta de inundação

A utilização dos modelos de regressão polinomial no Sistema de Monitoramento e Alerta de inundações criado na plataforma TerraMA², gerou os seguintes resultados.

A definição das melhores variáveis explicativas e os modelos ajustados serviram como modelos de análises para a construção do sistema, sendo elas:

- Estações Água Limpa, São Pedro e Santana: previsão de 4 horas de antecedência;

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

- Analise_SantaRosa(AguaLimpa_prev4h);
- Analise_SantaRosa(SaoPedro_prev4h);
- Analise_SantaRosa(Santana_prev4h);
- 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 três

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.

A Figura 7 ilustra como os resultados da Analises_PCDs podem ser visualizados na interface *web* construída com a plataforma TerraMA².

A Analise_SantaRosa(AguaLimpa_prev4h) previu o estado de atenção para o rio Sapucaí no evento ocorrido nos dias 12 e 13 de janeiro de 2011. Às 23h do dia 12, a previsão identificava a alteração do estado de alerta, de normal para observação. Uma hora depois, às 0h do dia 13, a análise indicou o aumento do estado de alerta, prevendo o estado de atenção para às 4h do dia 13.

A Analise_SantaRosa(Santana_prev4h) baseou a previsão do nível do rio Sapucaí a partir da variação do nível observado na estação Santana. Para o evento que começou às 22 horas do dia 7 de dezembro de 2009, 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.

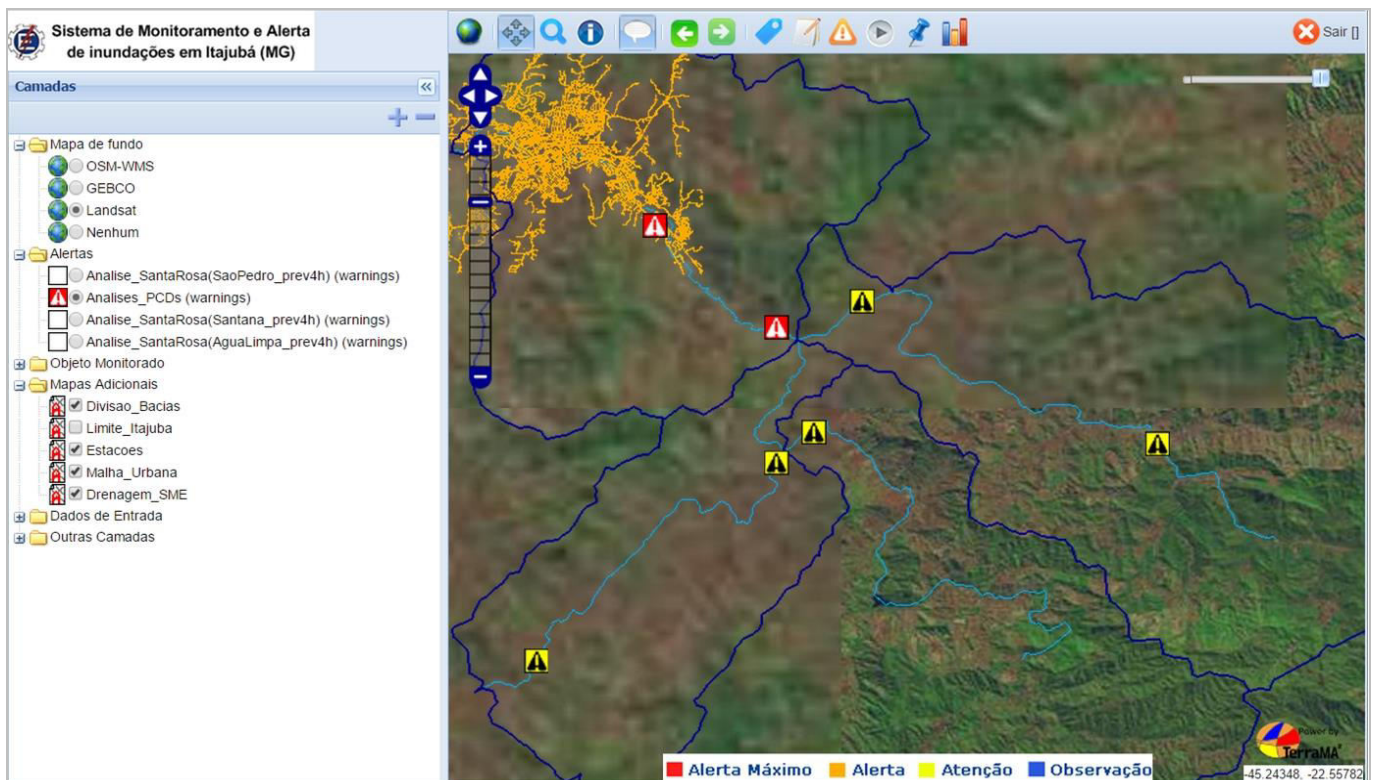


Figura 7. Interface *web* apresentando resultados da análise com PCDs (Analises_PCDs).

O módulo de apresentação *web* possibilitou um amplo campo de visão da área monitorada. Na Figura 8 é possível identificar a estação Santa Rosa em estado de alerta máximo, resultado da análise com alcance de 4 horas de previsão. A TerraMA² ainda gera automaticamente imagens dos alertas no formato JPEG (.jpg), cobrindo a área em torno das estações de coleta de dados.

Devido à pouca disponibilidade de dados de nível fluviométrico da estação São Pedro, que

entrou em operação no início do ano de 2011, foram obtidos poucos eventos para calibração, validação e aplicação no sistema de monitoramento. Nos períodos dos eventos selecionados para esta estação, 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.

CONCLUSÕES

Conclui-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 situação de perigo, e que estes alertas pudessem ser disponibilizados às autoridades de regiões afetadas por inundações periódicas, para que orientem as tomadas de medidas necessárias.

A utilização de modelos matemáticos para previsão de inundações, em substituição aos tradicionais modelos hidrológicos, mostrou-se eficaz. Os métodos adotados neste trabalho são

modelos matemáticos que, embora simplificados, foram ajustados e testados para medir a sua confiabilidade quando empregados para compor um sistema de previsão e alerta de inundações, utilizando, basicamente, os dados de nível do rio de sete estações de coleta de dados.

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.

A plataforma TerraMA² possibilitou o desenvolvimento do sistema de monitoramento e alerta. 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.

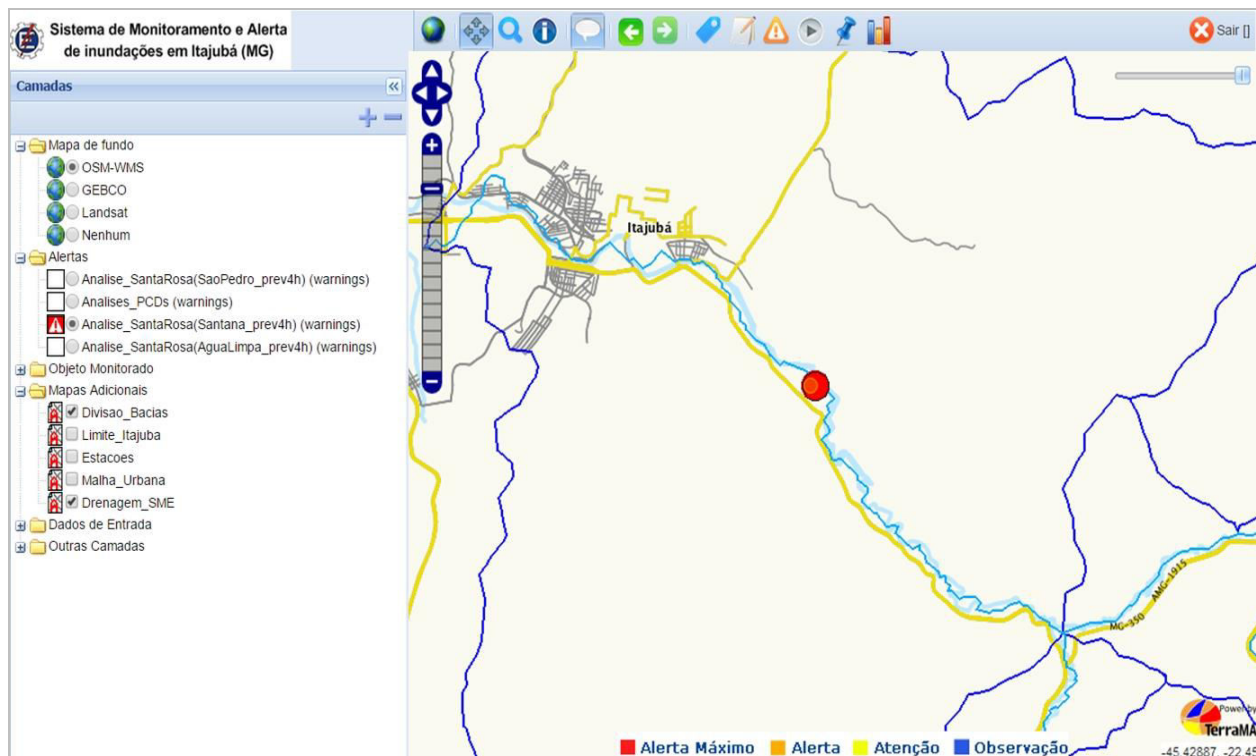


Figura 8. Interface web apresentando o alerta da análise Analise_SantaRosa(Santana_prev4h).

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. A TerraMA² e o TerraHidro são ferramentas desenvolvidas e distribuídas livremente, *open source*, tornando-as ainda mais viáveis e interessantes para o uso.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

1. 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.
2. GUHA-SAPIR, D.; VOS F.; BELOW R.; PONSERRE S. **Annual Disaster Statistical Review 2011: The Numbers and Trends**. Brussels: CRED; 2012.
3. IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo demográfico 2010**. (XII Censo Demográfico). Disponível em: <<http://cod.ibge.gov.br/2349C>> Acesso em: out. 2014.
4. INPE - INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Terra Monitoramento Análise e Alerta – TerraMA²**. 2012. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/terrama2/>>. Acesso em: out. 2014.
5. IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2007: The Physical Science Basis**. Working Group I, AR4, Chapter 11. Regional Climate Projections. Paris, 2007.

6. NASA SRTM. **Shuttle Radar Topography Mission**. 2014. Disponível em: <<http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>> Acesso em: out. 2014.
7. KOBAYAMA, 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. 109 p. p. 30-47.
8. LIH – Laboratório de Informações Hídricas. **Sistema de Monitoramento de Enchentes**. 2014. Disponível em: <<http://www.enchentes.unifei.edu.br/>> Acesso em: out. 2014.
9. LOPES, E. S. S. **TerraMA²: Manual do usuário versão 3.0.2**. São José dos Campos: INPE, 2012. 158p.
10. MCBEAN, G.; RODGERS, C. Climate hazards and disasters: the need for capacity building. **Interdisciplinary Reviews: Climate Change**, v. 1, number 6, p. 871-884, nov/dec 2010.
11. 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
12. MILLY, P. C. D.; BETANCOURT, J.; FALKENMARK, M.; HIRSCH, R. M.; KUNDZEWICZ, Z. W.; LETTENMAIER, D. P.; STOUFFER, R. J. Stationarity is dead: whither water management? **Science**, v. 319, p. 573-574, 2008.
13. MORAES, J. M. **Rio Sapucaí – Vereda da visão de uma Alvorada**. ACR & Associados. 2003. 128 p.
14. 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: out. 2014.
15. PINDYCK, G. S.; RUBINFELD, D. L. **Econometric models and economic forecast**. New York: McGraw-Hill, 1999.
16. PINHEIRO, V. M. **Avaliação Técnica e Histórica das Enchentes em Itajubá – MG**. Dissertação de Mestrado em Engenharia da Energia, UNIFEI. 2005.
17. OLIVO, A. A. **Modelos matemáticos para a previsão de cheias fluviais**. Tese de Doutorado. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São José dos Campos - SP. 151 p. 2004.
18. RODRIGUEZ, J.; VOS, F.; BELOW, R.; GUHA-SAPIR, D. **Annual Disaster Statistical Review 2008: The Numbers and Trends**. Brussels: CRED; 2009.
19. ROSIM, S.; OLIVEIRA, J. R. F.; JARDIM, A. C.; NAMIKAWA, L. M.; RENNÓ, C. D. TerraHidro: A Distributed Hydrology Modelling System With High Quality Drainage Extraction. In: International Conference on Advanced Geographic Information Systems, Applications, and Services, 5., 2013, Nice. **Proceedings...** p. 161-167, 2013.
20. STEFFEN, W.; SANDERSON, A.; TYSON, P. D.; JÄGER, J.; MATSON, P. A.; MOORE III, B.; OLDFIELD, F.; RICHARDSON, K.; SCHELLNHUBER, H. J.; TURNER II, B. L.; WASSON, R. J. **Global Change and the Earth System: A Planet Under Pressure**. IGBP Book Series. Springer Verlag, 336 p. 2004. ISBN 3-540-40800-2.
21. THIELEN, J.; BARTHOLMES, J.; RAMOS, M. H.; DE ROO, A. The European Flood Alert System – Part 1: Concept and development. **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, v. 13, p. 125-140, 2009.
22. TOMINAGA, L. K., SANTORO, J., AMARAL, R. **Desastres naturais: conhecer para prevenir**. 1°.ed., 2°reimpressão. – São Paulo: Instituto Geológico, 2011.
23. UNFPA - United Nations Population Fund. **The state of world population 2001: people and possibilities in a world of 7 billion**. Information and External Relations Division of UNFPA, 2001.
24. UN-ISDR - United Nations International Strategy for Disaster Reduction. **Living with Risk: a global review of disaster reduction initiatives**. Genebra, Suíça: Inter-Agency Secretariat International Strategy for Disaster Reduction (ISDR), 2004. 457 p.

*Manuscrito recebido em: 23 de Outubro de 2014
Revisado e Aceito em: 08 de Outubro de 2015*