

# *Pesquisas em Geociências*

<http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias>

---

## **Modelos para a espacialização e previsão de áreas inundáveis na zona urbana de São Sebastião do Caí, RS, Brasil**

*Guilherme Garcia de Oliveira, Dejanira Luderitz Saldanha, Laurindo Antonio Guasselli*

*Pesquisas em Geociências, 38 (2): 132-146, maio/ago., 2011.*

Versão online disponível em:

<http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/article/view/26379>

---

Publicado por

## **Instituto de Geociências**

---



## **Portal de Periódicos UFRGS**

UNIVERSIDADE FEDERAL  
DO RIO GRANDE DO SUL

---

### **Informações Adicionais**

**Email:** [pesquisas@ufrgs.br](mailto:pesquisas@ufrgs.br)

**Políticas:** <http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/about/editorialPolicies#openAccessPolicy>

**Submissão:** <http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/about/submissions#onlineSubmissions>

**Diretrizes:** <http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/about/submissions#authorGuidelines>

---

Data de publicação - maio/ago., 2011.

Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil

## Modelos para a espacialização e previsão de áreas inundáveis na zona urbana de São Sebastião do Caí, RS, Brasil

Guilherme Garcia de OLIVEIRA, Dejanira Luderitz SALDANHA & Laurindo Antonio GUASSELLI

Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Av. Bento Gonçalves, 9500, CEP: 91540-000; Porto Alegre, RS, Brasil. E-mail: g.g.oliveira10@gmail.com, dejanira.saldanha@ufrgs.br, laurindo.guasselli@ufrgs.br.

Recebido em 03/2010. Aceito para publicação em 08/2011.

Versão online publicada em xx/xx/2011 ([www.pesquisasemgeociencias.ufrgs.br](http://www.pesquisasemgeociencias.ufrgs.br))

**Resumo** - O estudo tem como objetivo desenvolver modelos para a espacialização e a previsão de inundações na área urbana de São Sebastião do Caí, RS, Brasil. Para o cálculo do tempo de retorno (TR) e para a análise da sazonalidade das cheias, foi utilizada uma série hidrológica de uma estação fluviométrica localizada na cidade. No entanto, para o desenvolvimento do modelo matemático de previsão de inundações, foram utilizados dados hidrológicos de uma estação à montante para realizar a regressão com as cotas registradas nas duas estações. Para identificação das áreas planas inundáveis, foi produzido um modelo digital do terreno baseado em dados de elevação com escalas entre 1:2.000 e 1:10.000. A imagem de satélite QuickBird (com resolução espacial de 0,61m) foi usada somente para a espacialização do tipo de uso e cobertura do solo atingido em cada cenário de inundação. O mapeamento e a simulação em 3D das áreas afetadas por inundações foram obtidas para TR de 2, 5, 10 e 30 anos. Destacam-se os seguintes resultados: 1) o nível do rio aumenta entre 9,28 m e 11,98 m para tempos de retorno de 2 a 30 anos; 2) ao longo da série histórica, 75% das cheias ocorreram entre junho e outubro; 3) o modelo matemático de previsão de inundações apresentou um erro médio de 0,72 m, e a acurácia variou entre 0,62 e 1,84 m, de acordo com a magnitude prevista; 4) foi observado que 93 hectares da área urbana de São Sebastião do Caí são atingidos por inundações com TR de 30 anos (23% da área urbana); 5) foi observado que a modelagem de um recente episódio de inundação, ocorrido em 24/09/2007, apresentou valores semelhantes de área afetada com relação aos observados em campo.

**Palavras-chave:** geoprocessamento, sensoriamento remoto, inundações.

**Abstract**- MODELS FOR SPATIALIZATION AND FORECASTING OF FLOODED AREAS IN THE SÃO SEBASTIÃO DO CAÍ URBAN ZONE, RIO GRANDE DO SUL STATE, BRAZIL. The study aims at developing models for the spatialization and forecasting of floods in the urban area of São Sebastião do Caí, RS, Brazil. For the calculation of return period (RP), and in order to analyze the seasonality of floods, streamflow data from the station located in the city were used. However, for the development of a mathematical model for flood forecasting, the time series of a station upstream was also used in order to perform a regression with the quotas recorded in both seasons. For the identification of flood plains, a digital terrain model was produced based on elevation data in scales between 1:2,000 and 1:10,000. The QuickBird satellite image (spatial resolution of 0.61 m) was used only for the spatialization of the land use and land cover reached by each flood scenario. Mapping and 3D simulation of the areas affected by flooding were obtained for RP of 2, 5, 10 and 30 years. The following results are most significant: i) the river water level rises between 9.28 m and 11.98 m for RP of 2 to 30 years; ii) along the historical series, 75% of floods have occurred between June and October; iii) the mathematical model for flood forecasting showed an average error of 0.72 m, and the accuracy varies between 0.62 m and 1.84 m, according to the expected magnitude; iv) it was observed that 93 hectares of urban area in São Sebastião do Caí are hit by floods with a RP of 30 years (23% of the urban area); v) modelling of a recent flood event dated of 24/09/2007 has resulted in similar values for the simulated and observed flooded area.

**Keywords:** geoprocessing, remote sensing, floods.

### 1. Introdução

Historicamente a humanidade se estabeleceu nas proximidades dos corpos hídricos, principalmente em virtude da necessidade do uso da água, tanto para o consumo direto quanto para atividades como a agricultura, a pecuária e a indústria. Além disso, os rios são importantes vias de transporte, interligando as comunidades

ribeirinhas, localizadas nas várzeas e planícies dos rios, terrenos sujeitos às inundações provocadas pelas cheias. Geralmente, ao ocupar estas áreas, o homem enfrenta sérios problemas com o regime natural dos recursos hídricos (Enomoto, 2004).

As inundações são os mais frequentes, dentre os desastres naturais observados no Brasil (Tucci & Bertoni, 2003), causando danos de elevada significância para as populações atingidas.

Apesar disso, na maioria das cidades atingidas, se observa poucos investimentos, tanto em medidas estruturais (obras de infraestrutura para amenizar os efeitos das inundações) quanto em medidas não estruturais (mapeamentos de áreas de inundações, simulações e previsões hidrológica e meteorológica, e o planejamento ocupacional de áreas de risco a inundações).

O aperfeiçoamento dos sistemas de previsão de inundações e o mapeamento das áreas atingidas por esses eventos destacam-se como medidas não estruturais essenciais para o alerta da população e o planejamento de municípios que se desenvolvem junto aos rios. Essas medidas auxiliam substancialmente na amenização dos danos decorrentes das inundações. Além disso, os mapas de inundação subsidiam a reorganização do espaço urbano, uma vez que podem ser úteis para o estabelecimento de novas diretrizes de ocupação em uma cidade.

Atualmente, em virtude da capacidade de armazenamento e análise de informações geográficas, o geoprocessamento e os Sistemas de Informações Geográficas (SIGs) surgem como recursos dinâmicos que ampliam a capacidade de mapeamento e de análise. Aliada ao geoprocessamento, a observação por meio de satélites é uma das maneiras mais efetivas e econômicas de estudar alguns fenômenos espaciais da natureza, e permite coletar dados para

modelar alterações tanto no meio natural quanto no construído. A combinação de técnicas de sensoriamento remoto e de geoprocessamento com a utilização dos SIGs permite monitorar e simular os eventos decorrentes das cheias – as enchentes e inundações –, contribuindo com a leitura e compreensão desses fenômenos (Mendes & Cirilo, 2001).

Nesse sentido, este estudo tem como objetivo principal elaborar modelos para a espacialização das áreas inundáveis e para a previsão de inundações na mancha urbana de São Sebastião do Caí, RS, Brasil, a partir de dados fluviométricos e de sensoriamento remoto.

O município de São Sebastião do Caí está situado na porção nordeste do estado do Rio Grande do Sul (RS), entre as latitudes 29°30'S e 29°40'S, e longitudes 51°16'W e 51°25'W. A área do município é de 111,45 km<sup>2</sup> e a população residente é de 20.359 habitantes, dos quais, aproximadamente, 81% estão domiciliados na área urbana (IBGE, 2007). A cidade de São Sebastião do Caí está inserida na bacia do rio Caí (4.981 km<sup>2</sup>), um dos principais afluentes do rio Jacuí, que drena a região central do RS. De acordo com COMITECAÍ (2007a), São Sebastião do Caí é um dos municípios mais afetados pelas inundações na bacia do rio Caí, juntamente com Montenegro, Pareci Novo e Bom Princípio (Fig. 1).

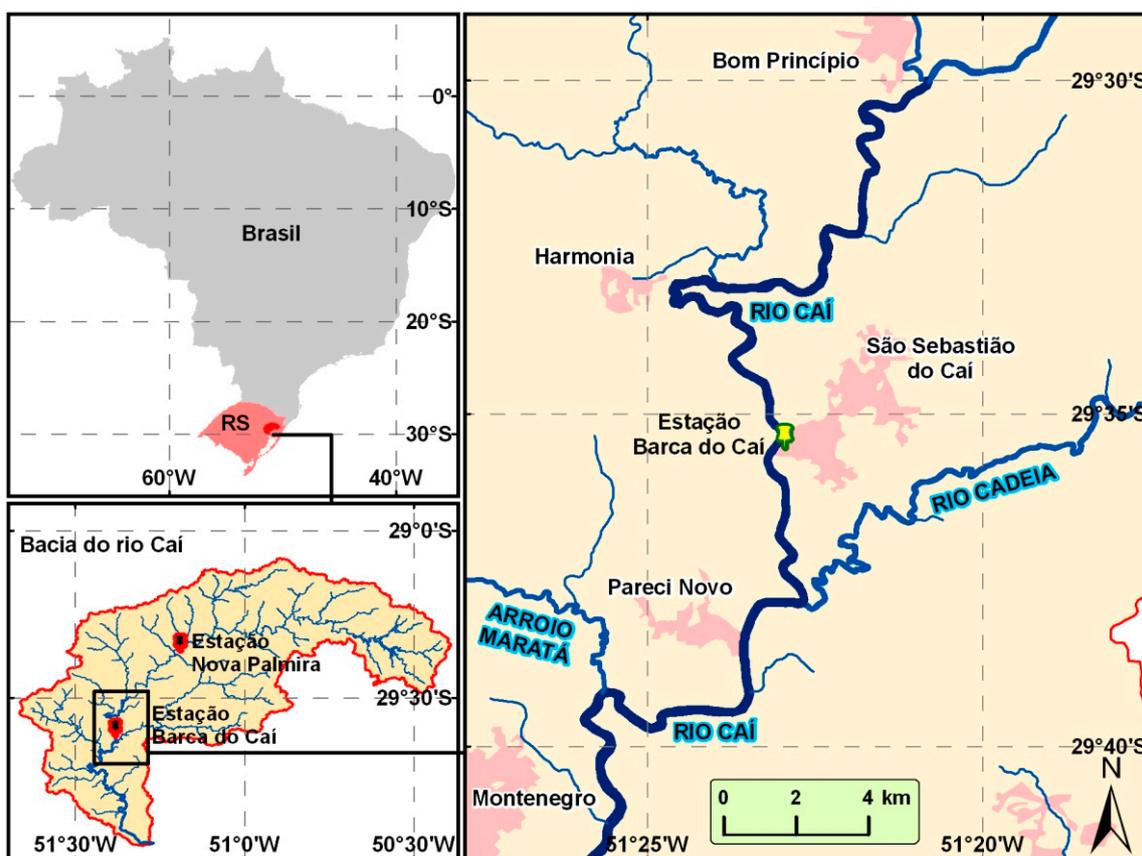


Figura 1. Localização das estações fluviométricas e da cidade de São Sebastião do Caí, RS, Brasil.

A periodicidade desses eventos em São Sebastião do Caí é o fator mais preocupante. Estima-se que, em média, a área urbana do município seja atingida pelas águas a cada 1,5 anos (COMITECAÍ, 2007b). Os dados existentes indicam a ocorrência de muitos eventos extremos durante as últimas décadas na bacia. Somente entre 09/2007 e 09/2009 a área urbana de São Sebastião do Caí foi atingida cinco vezes, sendo que as três últimas ocorreram num intervalo de 45 dias, entre agosto e setembro de 2009. Das cinco inundações, a maior inundação ocorreu em setembro de 2007.

De acordo com a Defesa Civil do Rio Grande do Sul (<http://www.defesacivil.rs.gov.br>), a inundação de 24 de setembro de 2007 afetou 14.331 habitantes no município de São Sebastião do Caí, sendo que, destes, 3.038 ficaram desalojados, desabrigados ou foram deslocados. Além disso, centenas de estabelecimentos comerciais e industriais foram atingidos, dos quais, 120 foram danificados, acarretando em altos prejuízos econômicos. Houve danos em serviços urbanos essenciais, como no abastecimento de água, energia e no sistema de transporte. Nas propriedades rurais, grande parte da produção de hortaliças foi perdida, além das áreas adubadas para o plantio na várzea do rio Caí, afetando a única fonte de sustento de inúmeras famílias.

## 2. Revisão teórica

### 2.1 Eventos extremos

Eventos extremos relacionados ao regime fluvial têm como características principais a elevada magnitude e a baixa frequência de ocorrência, sempre associados aos períodos de cheia. Segundo Castro (1998), as enchentes consistem na elevação do nível de água de um rio, acima de sua capacidade natural de escoamento, em períodos de alta pluviosidade, podendo causar inundações. O conceito de inundação está associado ao extravasamento das águas do leito menor de um corpo hídrico para a planície de inundação (leito maior), em virtude do excesso de volume de água não drenado pela falta de capacidade fluvial.

Muitas vezes, em cidades ou comunidades ribeirinhas, as águas atingem as moradias, as vias públicas (ruas, rodovias e passeios), as áreas de lazer, o comércio e a indústria, entre outros. Estes eventos ocorrem naturalmente, ou seja, são processos vinculados ao regime fluvial sendo, no entanto, potencializados pela alteração do uso do solo produzida pelo homem, dada por meio da impermeabilização das superfícies, da canalização e do assoreamento dos corpos d'água (Tucci & Bertoni,

2003; Enomoto, 2004; Eckhardt, 2008).

De acordo com Tucci *et al.* (1995), nos períodos com chuvas abundantes, os rios podem sair do seu leito menor e ocupar o leito maior com frequência média de dois anos. Segundo Christofolletti (1981) esse processo pode ocorrer anualmente, definindo dessa forma o leito maior normal do rio. Eventos extremos, com tempo de retorno (TR) superior a dois anos, são estudados para definir o leito maior excepcional.

A ocupação humana no leito maior dos rios desconsidera o fato das inundações terem uma distribuição irregular ao longo dos anos, o que deixa a população exposta às águas dos rios (Tucci & Bertoni, 2003). Nas áreas urbanas, as principais consequências são danos materiais, problemas sanitários (contágio humano por doenças transmissíveis pela água) e, em casos extremos, perdas de vida. Em ambiente rural, a planície de inundação é ocupada geralmente por usos antrópicos relacionados à agropecuária, com presença de poucas moradias, fazendo com que os impactos diretos à população sejam menores do que em meio urbano (Tucci *et al.*, 1995).

### 2.2 Sensoriamento remoto e geoprocessamento no mapeamento de áreas de inundação

Para a elaboração de mapas de inundação comumente se observa a aplicação de dados obtidos por sensoriamento remoto, manipulados por técnicas de geoprocessamento disponíveis nos SIGs. Nesses casos, os materiais mais utilizados são imagens orbitais multiespectrais e de radar, modelos digitais de elevação (MDE) e informações físicas da bacia, como hidrografia, declividades, solos e vegetação nativa, entre outras.

Silva & Barbosa (2007), por exemplo, elaboraram um mapa de inundação para vários tempos de retorno em Itajubá, MG, Brasil, a partir do histórico das cheias, do levantamento altimétrico e do sistema de drenagem. O SIG utilizado foi o SPRING, com a ferramenta "mancha de inundação", que necessita de pontos com cotas de inundação e de um modelo digital de elevação para a modelagem.

No estudo de Bates & De Roo (2000), a modelagem das áreas de inundação na planície do rio Meuse, na Holanda, foi desenvolvida a partir de modelos digitais de elevação. Para validação, utilizaram imagens *Sinthetic Aperture Radar* (SAR) do pico de uma inundação de grande magnitude. Os resultados obtidos foram satisfatórios, apresentando 82% de concordância com o observado na realidade.

A relação entre as áreas de inundação e os aspectos morfológicos é observada em Trentin *et al.* (2008), em que foi avaliada a ocorrência de enchen-

tes na área de abrangência do Rio Jacuí e sua relação com a altimetria e a declividade do terreno. Neste estudo foram utilizadas imagens *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) e *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM).

Kafle *et al.* (2006) realizam um estudo no Rio Bagmati, na região de Terai, Nepal, no qual integram imagens de sensoriamento remoto e um modelo de simulação de inundações composto por dados topográficos, hidrológicos e socioeconômicos. Neste trabalho, a combinação entre os modelos hidrológicos e o modelo de elevação digital identificou as áreas de inundação e a extensão do extravasamento do rio onde é difícil se obter imagens do pico de cheia.

Townsend & Walsh (1998) apresentaram a integração entre imagens de radar *Japanese Earth Resource Satellite* (JERS-1) e imagens de satélite Landsat para delimitar a extensão máxima de inundações na várzea fluvial do rio Roanoke, na Carolina do Norte, Estados Unidos. O estudo conclui que o uso desses materiais é eficaz para o mapeamento das áreas com potencial de ocorrência de inundações.

Outro trabalho que utilizou imagens de satélite Landsat foi o de Saldanha & Verdum (1995). Estes realizaram uma avaliação dos aspectos fisiográficos da planície de inundação do rio dos Sinos, sob condições hídricas distintas, através do uso das imagens. Neste estudo, foi espacializado um fenômeno de cheia (1984), um de estiagem (1986) e um de vazão intermediária (1988).

De acordo com Eckhardt (2008), o mapeamento das áreas inundáveis através de imagens de satélite e de radar, pode ser inviabilizado em virtude do pico do evento apresentar curta duração. No caso das imagens obtidas por sensores ópticos, a nebulosidade e a baixa resolução temporal dificultam ainda mais a delimitação das inundações. Em virtude disso, este autor utilizou um MDE e dados fluviométricos de duas estações no rio Taquari para a geração de um modelo cartográfico aplicado ao mapeamento das áreas de inundações em Lajeado, RS. A imagem de satélite foi utilizada para caracterizar o uso e ocupação do solo nas áreas atingidas pelos eventos.

### 2.3 Modelo de previsão de inundações

A previsão da cota de inundação pode ser obtida ao relacionar dados de estações fluviométricas. Eckhardt (2008) apresenta um modelo matemático baseado nas séries históricas de duas estações, uma à montante e outra no local onde se implantaria o sistema de previsão. A cota estimada à jusante é obtida por uma regressão, na qual se identifica a

função de melhor ajuste dos dados através do Qui-Quadrado Reduzido.

Esta metodologia é conhecida como relação cota-cota, uma vez que o nível à jusante é estimado a partir do nível do rio à montante. O tempo de antecedência na previsão é proporcional à distância entre as estações, ou seja, quanto maior a distância, maior a antecedência. Ao contrário, a precisão do modelo decresce consideravelmente à medida que aumenta a distância entre as mesmas. Logo, necessita-se conciliar os dois aspectos (antecedência e precisão), de modo a viabilizar o uso do modelo nos planos de remoção e evacuação de objetos e pessoas durante os eventos de grande magnitude.

No entanto, levando em consideração a escassez de estações hidrológicas no Brasil, são poucos os casos em que o pesquisador ou técnico pode optar pela utilização de uma ou outra série, ficando este, dependente dos dados existentes, muitas vezes insuficientes para se obter uma boa precisão ou tempo de antecedência na previsão. Além disso, não existe na bibliografia consultada nenhum critério para estabelecer a precisão ou o tempo de antecedência adequados, sendo necessário um estudo prévio da área de estudo e consultas aos órgãos responsáveis pela remoção e evacuação da população.

### 3. Materiais e métodos

A seleção dos materiais e métodos teve como base a proposta de Eckhardt (2008), o qual utilizou um modelo digital do terreno, dados históricos de cota e uma imagem orbital de alta resolução espacial para a simulação de áreas atingidas por inundações em Lajeado, RS. No entanto, a metodologia foi adaptada em função da disponibilidade dos dados e das características da área de estudo.

Neste estudo, foram utilizados os seguintes materiais:

a) Dados fluviométricos: série histórica de cotas das estações Barca do Caí (localizada em São Sebastião do Caí) e Nova Palmira (cerca de 55 km a montante, no município de Caxias do Sul), ambas operadas pela Companhia de Recursos Minerais (CPRM);

b) Nivelamento municipal (pontos cotados e curvas de nível), fornecido pela Companhia Riograndense de Saneamento (CORSAN), realizado por técnicas de topografia, escala aproximada 1:2.000;

c) Dados altimétricos (curvas de nível e pontos cotados), obtidos junto à Secretaria Estadual do Meio Ambiente (SEMA), compatíveis com a escala 1:10.000;

d) Imagem de satélite QuickBird, georreferenciada através de posicionamento relativo por GPS, com resolução espacial de 0,61 m;

e) Receptor de sinal GPS, de navegação, com precisão de posicionamento aproximada de 10 m.

Os métodos adotados no estudo são apresentados sob a seguinte estruturação: a) tratamento dos dados fluviométricos; b) modelagem matemática para previsão de inundações; c) modelagem do terreno; d) espacialização e simulação das áreas de inundação por tempos de retorno.

O processamento da série histórica de cotas da estação Barca do Caí compreendeu a obtenção da cota média do rio, dos tempos de retorno e da distribuição sazonal das cheias e inundações. Foram utilizadas as medidas de cotas de 1947 a 2008, totalizando 62 anos de registros. Em virtude de algumas falhas na série histórica, três anos — foram descartados para não comprometer o resultado dos cálculos.

A cota média do rio foi obtida pela soma das cotas registradas dividida pelo número de registros. O cálculo do tempo de retorno – o período que decorre entre duas cheias de igual magnitude – se baseou em Christofolletti (1981). O método compreende a seleção do evento de maior magnitude em cada ano da série histórica, o ordenamento dos eventos conforme a sequência de magnitude, dos valores mais elevados para os menores e a aplicação da seguinte equação:

$$TR = \frac{N + 1}{M}$$

Onde: TR é o tempo de retorno; N é o número total de eventos considerados na série; M é o número de ordem que representa a posição da cheia na escala organizada.

A segunda etapa do trabalho compreendeu a criação do modelo matemático de previsão de inundação para São Sebastião do Caí. Neste processo, utilizaram-se os valores de cotas das duas estações fluviométricas – Nova Palmira (à montante) e Barca do Caí (em São Sebastião do Caí), de acordo com a abordagem de Eckhardt (2008), mencionada no item anterior.

O modelo se baseia na relação entre as cotas máximas atingidas nas duas estações em eventos de grande magnitude ao longo da série histórica. A seleção de eventos para o processo de modelagem matemática teve como referência a série de São Sebastião do Caí e baseou-se em dois critérios: a) o maior evento anual registrado; b) todos os eventos com TR superior a dois anos.

Depois de selecionados os eventos e extraídas as cotas atingidas em São Sebastião do Caí, foram coletadas as cotas alcançadas na estação à

montante (Nova Palmira) para verificação da correlação e posterior regressão. Estes foram inseridos no software LabFit, que seleciona uma das centenas de funções de ajuste de curva para os dados, de acordo com o Qui-Quadrado Reduzido. O algoritmo utilizado para o ajuste foi o Levenberg-Marquardt.

O resultado é uma expressão que calcula a cota a ser atingida na Barca do Caí, em função da cota registrada à montante, além de um arquivo gráfico com a espacialização das amostras e a curva ajustada. Além disso, o pacote estatístico LabFit disponibiliza as faixas de confiança e a precisão do modelo para vários intervalos ao longo da curva ajustada, permitindo assim uma avaliação mais criteriosa da modelagem.

A modelagem do terreno foi realizada através dos materiais disponíveis para o município – o nivelamento municipal (pontos cotados em escala aproximada de 1:2.000), as curvas de nível e os pontos cotados de uma base altimétrica disponibilizada pela SEMA, na escala 1:10.000. Ressalta-se que a qualidade e precisão desses dados são inferiores aos obtidos por uma restituição aerofotogramétrica, que seriam mais adequados para a elaboração do presente estudo.

A base altimétrica na escala 1:10.000 só foi utilizada nas áreas sem ocupação urbana, justamente as de menor interesse neste estudo. O nivelamento abrange a área urbanizada do município e apresenta um bom detalhamento. No entanto, neste segundo, os valores não representam a elevação, mas sim cotas ajustadas a um referencial no terreno.

Assim, a primeira etapa da elaboração do modelo do terreno compreendeu a compatibilização das bases, na qual foram estabelecidas relações entre os valores de elevação da base altimétrica e os dados do nivelamento para a interpolação. A diferença de valores entre as bases foi verificada numa análise pixel a pixel em diversos pontos do município com ambos os registros. Os valores da base altimétrica na escala 1:10.000 foram convertidos para a escala de valores do nivelamento municipal.

A etapa de interpolação dos dados foi realizada pelo método conhecido por Rede Irregular de Triângulos - *Triangular Irregular Network* (TIN) - uma adaptação da triangulação de Delaunay, desenvolvida por Peucker *et al.* (1979), a qual baseia-se em um algoritmo que cria triângulos através da ligação de pontos (Silva, 1999). A escolha desse método está associada ao fato do interpolador ser

mais exato, uma vez que o valor dos pixels localizados nas arestas dos triângulos (pontos) não é interpolado. O resultado deste processo é um MDT de alta precisão nas áreas urbanizadas e de média nas demais áreas.

A última etapa do trabalho compreendeu a espacialização das áreas de inundação por TR (2, 5, 10 e 30 anos) e a identificação dos tipos de uso e cobertura do solo atingidos. O mapeamento das áreas atingidas foi gerado de forma automatizada, utilizando um algoritmo que cria um arquivo vetorial compreendendo todas as áreas com cota inferior à desejada, desde que não haja impedimentos para a passagem de água (diques ou barreiras). A identificação dos usos e coberturas, se deu através da interpretação visual na imagem QuickBird e de trabalhos de campo. Juntamente com o mapa de inundação na zona urbana de São Sebastião do Caí, foram elaboradas simulações em 3D para ilustração dos cenários observados no município.

A avaliação do modelo do terreno e da espacialização das áreas de inundação foi realizada a partir do mapeamento da inundação ocorrida em 24/09/2007 (TR de 30 anos). A verificação da real extensão da inundação nesta data se deu em trabalhos de campo, tomando como referência as informações fornecidas pela Defesa Civil e pela população local, além das marcas de inundação causadas pelas águas do rio, observadas nas paredes e muros. O posicionamento foi realizado a partir do receptor de sinal GPS.

#### 4. Resultados e discussões

Neste item são apresentadas as discussões pertinentes ao estudo e os principais resultados obtidos a partir da aplicação dos procedimentos metodológicos mencionados.

##### 4.1 Cota média, TR e sazonalidade das cheias

Os cálculos da cota média do rio na estação e do TR das enchentes são essenciais para a adoção de medidas não estruturais, como o mapeamento das áreas afetadas e a elaboração de um sistema de previsão e alerta de inundações. A análise da sazonalidade das cheias identifica o período do ano que, ao longo da série, registrou o maior número de ocorrência desses eventos.

A estimativa do valor médio da cota do rio é importante para a obtenção da verdadeira magnitude das inundações, uma vez que o valor da régua não representa o aumento do nível do rio (AN). Com base na análise dos registros da CPRM, a

cota média do rio na régua em São Sebastião do Caí, é de 2,72 m. A maior cota registrada no local foi de 14,75 m, representando uma elevação de 12,03 m no nível do rio.

A tabela 1 apresenta as cotas de inundação e o aumento do nível do rio (a partir da cota média), para TR de 2, 5, 10, e 30 anos, no município de São Sebastião do Caí. O ordenamento dos eventos de maior magnitude por ano da série histórica e os respectivos tempos de retorno são observados na tabela 2.

De acordo com os resultados apresentados na tabela 1, pode-se afirmar que existe grande variação no nível do rio nos episódios de cheias. O aumento no nível médio do rio, em São Sebastião do Caí, é superior a 9 m em TR de 2 anos, e atinge 12 m em TR de 30 anos.

Ao conjugar esses dados com uma análise exploratória do terreno, verificou-se que uma elevação de 8 m no nível do rio é suficiente para o extravasamento das águas para a planície de inundação. Em enchentes de maior magnitude, não há uma significativa elevação no nível do rio e sim um aumento de área atingida, já que se observa uma variação de apenas 1,1 m na cota do rio entre uma inundação com TR de 5 anos e outra com TR de 30 anos.

A tabela 2 mostra que a cota de extravasamento do leito (10,72 m) – valor obtido pela observação do modelo do terreno – é atingida, em média, a cada 1,28 anos. O rio atinge a cota 11 m, em média, a cada 1,4 anos, a cota 12 m num intervalo de 2 anos, 13 m a cada 3,33 anos e 14 m com TR de 10 anos.

É interessante também observar que os dois maiores eventos registrados na série histórica ocorreram na última década (2000 e 2007), embora existam indícios (relatos de moradores mais antigos) de outros eventos de magnitude superior.

De acordo com a série disponível, a inundação de maior magnitude ocorreu em outubro de 2000, quando o rio atingiu a cota 14,75 m (aproximadamente 4 m acima do nível máximo do leito menor). Além disso, através de uma observação preliminar dos dados de janeiro a setembro de 2009 (não utilizados na elaboração da tabela de TR) constatou-se que o rio atingiu a cota de 13 m (TR de 3,33 anos) em três ocasiões, sendo que em uma delas ultrapassou a cota 14 m (TR de 10 anos).

Considerando que a régua não tenha sofrido nenhum tipo de ajustamento, e desconsiderando os possíveis erros em algumas leituras de cota, esses dados acenam para um aumento na frequência de eventos de grande magnitude nos

Tabela 1. Cota de inundação e aumento do nível do rio por TR em São Sebastião do Caí, RS.

<b>Tempo de Retorno</b>	<b>Cota na Régua</b>	<b>Aumento no nível do rio (AN)</b>
30	14,70	11,98
10	14,00	11,28
5	13,60	10,88
2	12,00	9,28

Tabela 2. Tempo de retorno das cheias na estação Barca do Caí em São Sebastião do Caí, RS.

<b>Ano</b>	<b>Cota da régua (m)</b>	<b>Ordem</b>	<b>TR (anos)</b>	<b>Ano</b>	<b>Cota da régua (m)</b>	<b>Ordem</b>	<b>TR (anos)</b>
2000	14,75	1	60,00	1992	11,98	31	1,94
2007	14,70	2	30,00	1993	11,87	32	1,88
1982	14,60	3	20,00	2005	11,74	33	1,82
1956	14,50	4	15,00	1969	11,58	34	1,76
1980	13,98	5	12,00	1976	11,54	35	1,71
1990	13,98	6	10,00	1973	11,50	36	1,67
1954	13,90	7	8,57	1994	11,50	37	1,62
1965	13,74	8	7,50	1995	11,46	38	1,58
1997	13,66	9	6,67	1974	11,44	39	1,54
1984	13,60	10	6,00	1970	11,40	40	1,50
1985	13,60	11	5,45	1967	11,10	41	1,46
1988	13,58	12	5,00	1949	11,00	42	1,43
2003	13,46	13	4,62	1955	11,00	43	1,40
2008	13,38	14	4,29	1953	10,80	44	1,36
1987	13,34	15	4,00	1991	10,80	45	1,33
1986	13,16	16	3,75	1978	10,79	46	1,30
1959	13,15	17	3,53	1964	10,72	47	1,28
1963	13,00	18	3,33	1951	10,60	48	1,25
1961	12,86	19	3,16	1981	10,38	49	1,22
1966	12,68	20	3,00	1996	10,20	50	1,20
2001	12,56	21	2,86	1999	10,10	51	1,18
1998	12,52	22	2,73	1960	9,84	52	1,15
1975	12,50	23	2,61	1950	9,70	53	1,13
2002	12,48	24	2,50	1979	9,37	54	1,11
1983	12,36	25	2,40	1958	9,10	55	1,09
1957	12,24	26	2,31	1968	8,66	56	1,07
1971	12,18	27	2,22	1948	8,40	57	1,05
1977	12,10	28	2,14	1952	7,58	58	1,03
1989	12,10	29	2,07	1962	5,88	59	1,02
1972	11,98	30	2,00				

últimos anos. Para compreender os fatores que levam a esse aumento, faz-se necessário, em futuros trabalhos, um estudo aplicado no âmbito da climatologia e meteorologia, e uma investigação a respeito de um possível desnivelamento da régua ou de erros de leitura de cota.

O gráfico da figura 2 apresenta as máximas anuais ao longo da série e a linha de tendência por média móvel dos cinco anos anteriores. Observa-se que existem dois períodos em que a média móvel superou os 13 m: entre 1986 e 1990; e 2008. Antes da década de 1980, apenas em duas oportunidades (entre 1957 e 1959; e 1967) a média móvel ultrapassou a cota de 12 m, reforçando ainda mais a tendência observada de aumento na frequência de inundações de maiores magnitudes a partir da década de 1980. Cabe ressaltar que parte desse

incremento nas cotas observadas pode estar associada ao assoreamento do rio.

A tabela 3 apresenta a distribuição sazonal dos eventos de maior magnitude ao longo de cada ano da série histórica. Verifica-se uma tendência de concentração das cheias entre os meses de junho e outubro, nas estações de inverno e primavera. Aproximadamente 75% das cheias ou inundações, entre 1947 e 2008, no rio Caí, ocorreram em algum desses meses, o que indica a maior probabilidade de ocorrência desses eventos no período. O mês de setembro foi o que registrou mais eventos (15), ou seja, 26% do total de ocorrências. O resultado condiz com o esperado, pois corresponde ao período mais chuvoso do ano no município de São Sebastião do Caí, de acordo com os dados do INMET (2009).

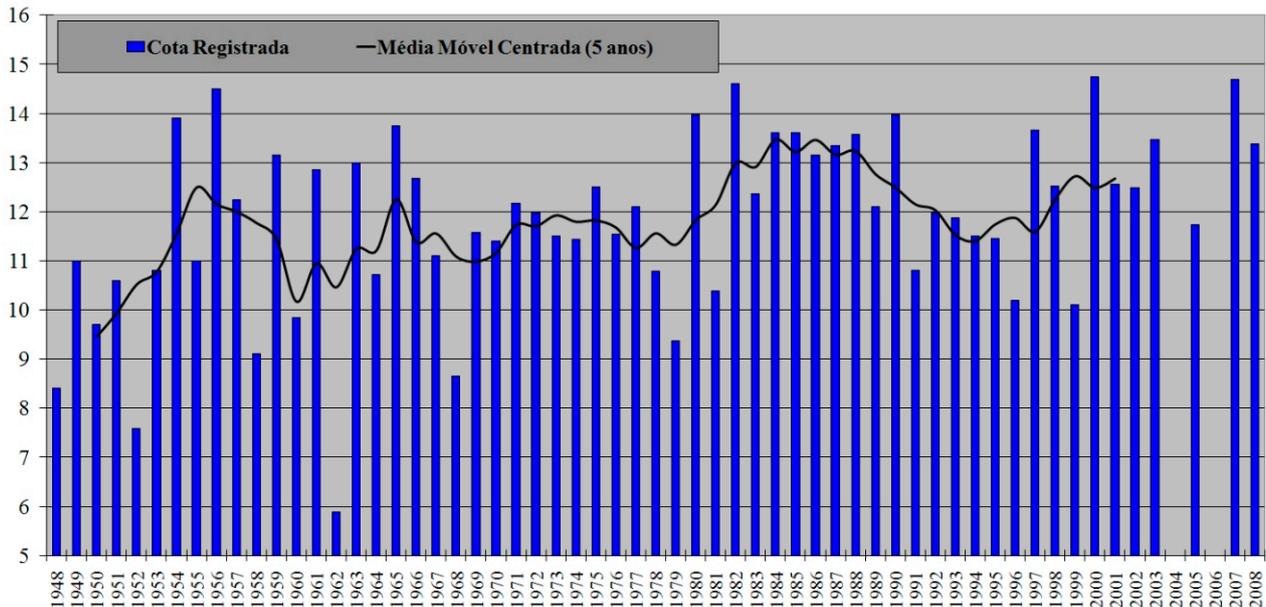


Figura 2. Cotas máximas anuais na estação Barca do Caí em São Sebastião do Caí, RS.

Tabela 3. Distribuição sazonal das cheias e inundações no município de São Sebastião do Caí, RS.

Mês	Nº Cheias	Proporção
Jan	2	3,39%
Fev	1	1,69%
Mar	1	1,69%
Abr	2	3,39%
Mai	2	3,39%
Jun	8	13,56%
Jul	6	10,17%
Ago	7	11,86%
Set	15	25,42%
Out	8	13,56%
Nov	1	1,69%
Dez	6	10,17%

#### 4.2 Modelo matemático de previsão de inundações

Para o processo de modelagem, foram selecionados 77 pares de cotas (Barca do Caí – Nova Palmira), de acordo com a metodologia apresentada. O coeficiente de correlação dos dados foi de 79,72%. A função que apresentou o melhor ajuste dos dados é expressa pela seguinte equação (ver também gráfico da figura 3):

$$Y_p = \frac{1}{\left(-0,1695 + 0,048 * x + \frac{0,577}{x}\right)} + 1,28 * x$$

Onde:  $Y_p$  é a cota prevista para São Sebastião do Caí e  $X$  é a cota registrada em Nova Palmira.

O coeficiente de determinação da regressão ( $R^2$ ) adotada na modelagem foi de 0,723. Esse valor indica que houve um bom ajuste dos dados. O resíduo médio foi de 0,72 m e a amostra que

apresentou maior discrepância entre o medido e o previsto obteve um erro de 2,27 m. As faixas de confiança variam de acordo com a magnitude da inundação a ser prevista. Nos intervalos de cota com maior quantidade de amostras a precisão do modelo e o grau de confiabilidade na previsão são maiores.

As tabelas 4 e 5 apresentam, respectivamente, a síntese das características relacionadas à confiabilidade do modelo matemático e as cotas previstas para São Sebastião do Caí nos 77 eventos selecionados. A precisão média do modelo para a previsão de cotas entre 1 m e 12 m é de 0,62 m. Logo, se a cota prevista em São Sebastião do Caí for de 11,4 m, significa que com 95,4% de confiança o nível do rio ficará entre 11,09 m e 11,71 m (0,31 m para mais ou para menos). A mesma regra se aplica para os outros intervalos de previsão.

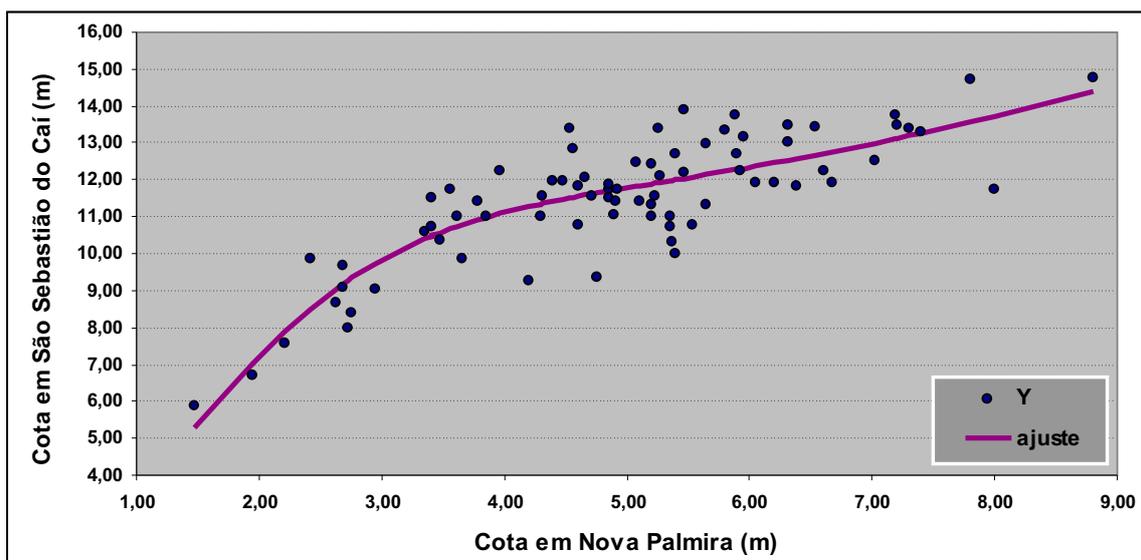


Figura 3. Linha de ajuste para a previsão de cota do rio Caí em São Sebastião do Caí, RS.

Tabela 4. Síntese das características para avaliação da confiabilidade do modelo.

$R^2$	0,723
Resíduo Médio	0,72m
Erro Mínimo	0,02m
Erro Máximo	2,27m
<b>Faixa de Confiança (95,4%)</b>	
Previsão de cotas entre 11 e 12m	de $(Y_p - 0,31m)$ a $(Y_p + 0,31m)$
Previsão de cotas entre 12 e 13m	de $(Y_p - 0,32m)$ a $(Y_p + 0,32m)$
Previsão de cotas entre 13 e 14m	de $(Y_p - 0,59m)$ a $(Y_p + 0,59m)$
Previsão de cotas > 14m	de $(Y_p - 0,92m)$ a $(Y_p + 0,92m)$
<b>Precisão do Modelo (95,4%)</b>	
Previsão de cotas entre 11 e 12m	0,62m
Previsão de cotas entre 12 e 13m	0,64m
Previsão de cotas entre 13 e 14m	1,18m
Previsão de cotas > 14m	1,84m

O intervalo de tempo entre o pico da enchente em Nova Palmira e o pico em São Sebastião do Caí é de aproximadamente 24 h. Isso significa que, para determinados intervalos de cotas, pode-se obter uma precisão submétrica na previsão do pico em São Sebastião do Caí com um dia de antecedência. Isso permitiria elaborar planos de ação para o deslocamento de pessoas e a instalação destas em local seguro e a remoção de móveis e outros bens, reduzindo assim os danos provocados pelas inundações.

Quanto aos dados apresentados na tabela 5, pode-se destacar que 59 eventos (76,62%) obtiveram resíduo inferior a 1 m na cota prevista, comprovando a eficiência do modelo matemático. Os três maiores resíduos em ordem decrescente foram: 15/12/1979 (2,27); 11/07/2000 (2,01); 29/06/1982 (1,99). Nota-se que nos três eventos o modelo matemático superestimou a cota em São Sebastião do Caí, o que não é tão negativo se comparada a uma subestimação.

É importante destacar que o modelo matemático proposto neste trabalho pode ser refinado com a inclusão de novos dados. De acordo com a CPRM, está prevista a instalação de equipamentos para leitura automática de hora em hora nas estações ativas na bacia do rio Caí. As duas estações, utilizadas neste estudo, passarão, portanto, a operar com maior confiabilidade, o que permitirá monitorar com mais precisão a elevação do nível do rio.

Além disso, está prevista a instalação de régua em outros pontos da bacia, o que permitirá a inclusão de mais cotas de referência para a previsão. Um desses pontos foi estrategicamente selecionado para aprimorar a modelagem em São Sebastião do Caí. A nova régua deverá ser instalada na foz do arroio Forromeco, um importante tributário do rio Caí, a aproximadamente 20 km a montante da estação Barca do Caí (estimativa de 10 h de antecedência na previsão). A conciliação entre os dados de Nova Palmira e desta nova estação

poderá inferir mais confiabilidade às previsões de inundação em São Sebastião do Caí.

Por fim, outra medida interessante para aprimorar a previsão de magnitude das inundações seria elaborar um modelo distribuído para estimar

o escoamento superficial e a vazão a partir de dados de chuva. Essa modelagem aumentaria o tempo de antecedência na previsão, e poderia servir de alerta para o início do monitoramento das cotas do rio.

Tabela 5. Cotas registradas, previsão de cota e resíduo.

Data	X	Y	Yp	Resíduo	Data	X	Y	Yp	Resíduo
30/9/1947	4,30	11,00	11,35	0,35	7/12/1978	5,54	10,79	12,08	1,29
24/7/1948	2,76	8,40	9,34	0,94	15/12/1979	4,76	9,37	11,64	2,27
21/9/1949	5,20	11,00	11,89	0,89	30/7/1980	7,19	13,74	13,11	-0,63
17/10/1950	2,69	9,70	9,18	-0,52	23/8/1980	4,61	11,81	11,55	-0,26
19/10/1951	3,35	10,60	10,40	-0,20	3/12/1980	4,54	13,41	11,51	-1,90
29/6/1952	2,21	7,58	7,88	0,30	8/6/1981	3,47	10,35	10,56	0,21
16/9/1953	5,39	10,00	11,99	1,99	29/6/1982	8,00	11,74	13,73	1,99
4/10/1953	4,61	10,80	11,55	0,75	24/6/1983	6,38	11,81	12,57	0,76
22/7/1954	5,47	13,90	12,04	-1,86	7/7/1983	6,68	11,92	12,76	0,84
23/9/1954	5,27	12,10	11,93	-0,17	2/8/1983	4,48	11,97	11,47	-0,50
20/4/1955	3,85	11,00	10,98	-0,02	17/8/1983	5,20	12,43	11,89	-0,54
19/9/1956	4,85	11,72	11,69	-0,03	20/6/1984	5,90	12,70	12,28	-0,42
9/9/1957	3,96	12,24	11,08	-1,16	13/8/1985	6,54	13,45	12,67	-0,78
12/6/1958	2,68	9,10	9,16	0,06	26/9/1988	5,80	13,33	12,22	-1,11
23/6/1959	5,95	13,15	12,31	-0,84	24/9/1989	6,20	11,94	12,46	0,52
25/6/1960	2,95	9,02	9,74	0,72	30/5/1990	5,36	10,72	11,98	1,26
1/9/1960	2,42	9,84	8,50	-1,34	13/10/1990	7,20	13,49	13,12	-0,37
6/9/1961	4,56	12,86	11,52	-1,34	28/5/1992	5,10	11,43	11,83	0,40
30/9/1961	4,93	11,72	11,74	0,02	12/7/1993	3,40	11,51	10,47	-1,04
15/1/1962	1,47	5,88	5,28	-0,60	26/5/1994	4,90	11,05	11,72	0,67
11/10/1963	5,65	13,00	12,14	-0,86	20/6/1994	5,36	11,00	11,98	0,98
2/9/1964	3,41	10,72	10,48	-0,24	20/7/1995	3,62	11,01	10,74	-0,27
21/8/1965	5,89	13,74	12,27	-1,47	26/10/1996	2,73	7,97	9,27	1,30
12/9/1965	4,85	11,89	11,69	-0,20	4/8/1997	5,26	13,40	11,92	-1,48
20/12/1966	5,40	12,68	12,00	-0,68	16/8/1998	5,93	12,23	12,30	0,07
20/9/1967	6,61	12,25	12,71	0,46	15/10/1999	3,66	9,85	10,79	0,94
7/11/1968	2,63	8,66	9,04	0,38	11/7/2000	4,20	9,26	11,27	2,01
19/2/1969	4,31	11,58	11,35	-0,23	13/10/2000	8,80	14,75	14,40	-0,35
6/6/1970	4,91	11,40	11,73	0,33	21/7/2001	5,20	11,35	11,89	0,54
17/3/1971	5,47	12,18	12,04	-0,14	12/6/2002	5,08	12,46	11,82	-0,64
14/8/1971	4,66	12,08	11,58	-0,50	21/2/2003	7,40	13,30	13,26	-0,04
20/7/1972	6,05	11,94	12,37	0,43	9/7/2003	6,32	13,46	12,53	-0,93
20/9/1972	4,40	11,98	11,42	-0,56	1/9/2005	3,56	11,74	10,67	-1,07
19/9/1973	5,64	11,35	12,13	0,78	17/10/2005	4,72	11,58	11,62	0,04
10/6/1974	3,78	11,44	10,91	-0,53	22/6/2006	1,95	6,70	7,04	0,34
13/6/1975	5,37	10,34	11,98	1,64	11/7/2007	6,31	13,02	12,52	-0,50
15/9/1975	7,03	12,50	13,00	0,50	24/9/2007	7,80	14,70	13,57	-1,13
9/8/1976	5,23	11,54	11,91	0,37	27/10/2008	7,30	13,38	13,19	-0,19
18/8/1977	4,86	11,49	11,70	0,21					

**X e Y representam, respectivamente, a cota medida em Nova Palmira e São Sebastião do Caí; Yp é a cota prevista em São Sebastião do Caí.**

#### 4.3 Mapa de inundação por TR e simulações em 3D

O mapa de inundação e as simulações em 3D foram obtidos após a manipulação dos dados fluviométricos e a modelagem digital do terreno. Foram espacializadas (através do fatiamento do MDT) sobre a imagem de satélite as áreas atingidas com TR de 2, 5, 10 e 30 anos na área urbana de São

Sebastião do Caí. Como resultados foram obtidos: a) mapa de inundação por TR; b) simulações em 3D de cada cenário; c) quantificações a respeito da área atingida, bairros e tipos de uso e ocupação afetados diretamente.

A figura 4 apresenta o mapa de inundação por TR da mancha urbana de São Sebastião do Caí, RS. As simulações em 3D são visualizadas nas

figuras 5, 6, 7, 8 e 9, de acordo com o cenário modelado.

As áreas mais extensas de inundação estão localizadas às margens dos arroios que deságuam no rio Caí – arroios Bonito e Sem Nome. O extravasamento médio das águas para TR de 2, 5, 10 e 30 anos é, respectivamente, de 150 m, 500 m, 550 m e de 800 m. Ao todo, seis bairros são afetados diretamente pelas inundações com TR de até 30 anos: Navegantes, Quilombo, Centro, Jardim Blauth, Esperança e Vila Rica.

As simulações em 3D ilustram o avanço da água sobre a cidade de São Sebastião do Caí em cenários entre 2 e 30 anos de TR. Na figura 9

(cenário para TR de 30 anos) pode-se observar a grande porção de área urbana impactada pelo aumento no nível do rio. Trata-se de uma área muito plana com declividades inferiores a 1%, onde muitas residências ribeirinhas ficam totalmente encobertas pela água em eventos de grande magnitude (como na inundação de 24/09/2007).

A área urbana atingida pelas inundações por TR e os bairros afetados (Tab. 6), e a estimativa da quantidade de pessoas afetadas diretamente (desalojadas, desabrigadas ou deslocadas) por TR (Tab. 7) são indicadores importantes para a avaliação dos impactos causados pelas inundações em cada nível de magnitude.

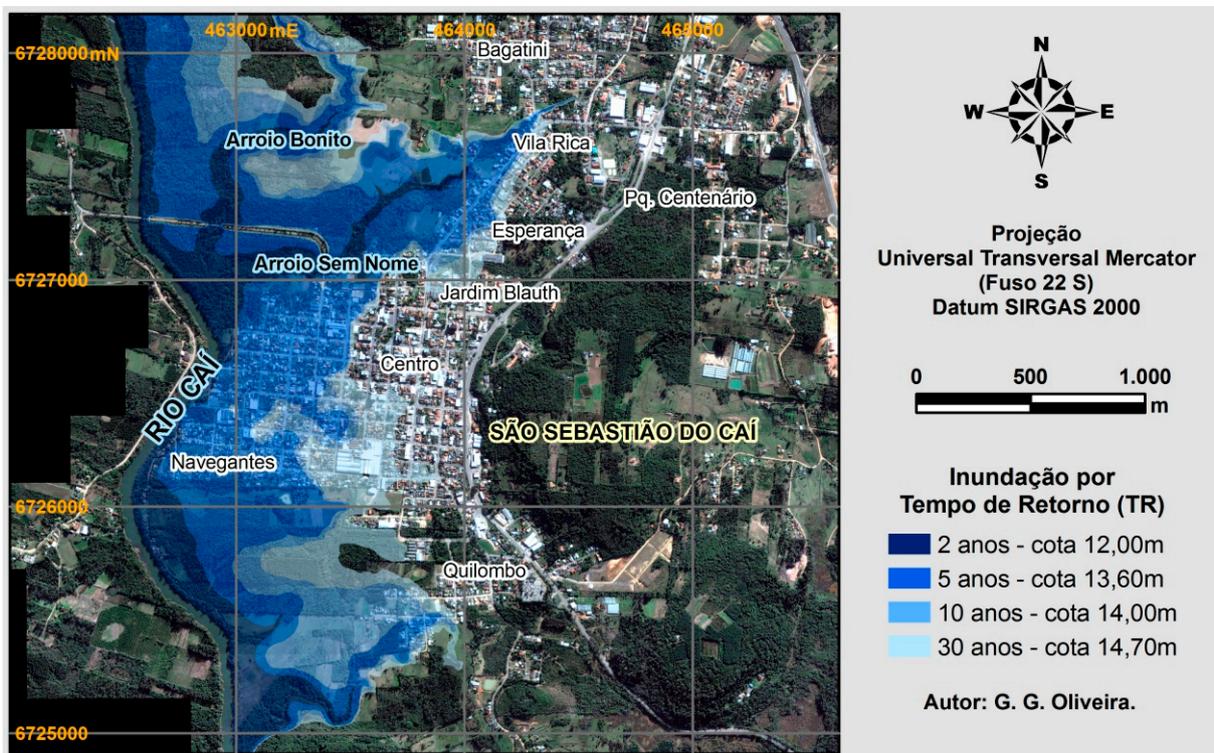


Figura 4. Mapa de inundação da mancha urbana do município de São Sebastião do Caí, RS.



Figura 5. Cenário TR 0 ano



Figura 6. Cenário TR 2 anos.



Figura 7. Cenário TR 5 anos.



Figura 8. Cenário TR 10 anos.



Figura 9. Cenário TR 30 anos.

Tabela 6. Área urbana atingida e bairros afetados por TR, no município de São Sebastião do Caí, RS.

TR (anos)	Área Urbana atingida (ha) - acumulada	Proporção (%) - em relação à área urbana total - acumulada	Bairros afetados
2	3,34	0,83	1
5	58,64	14,55	4
10	70,00	17,37	5
30	92,89	23,05	6

Tabela 7. Estimativa de população atingida diretamente pelas inundações em São Sebastião do Caí, RS.

População urbana (IBGE, 2007)	16.491
Área urbana (medida sobre a imagem QuickBird)	403 ha
Densidade populacional	40,92 hab/ha
<b>População afetada diretamente (com base no mapa e nas simulações)</b>	
TR 2 anos	137
TR 5 anos	2.400
TR 10 anos	2.864
TR 30 anos	3.801
População afetada em 24/09/2007 [TR 30] (Defesa Civil)	3.038

O único bairro afetado por inundações com TR de 2 anos é o Navegantes, onde dezenas de casas são atingidas pela água, totalizando 3,34 ha, com estimativa de 137 pessoas desabrigadas. No entanto, a área urbana atingida aumenta significativamente para eventos com TR de 5 anos, o que implica em danos para centenas de famílias nos bairros Navegantes, Quilombo, Esperança e Vila Rica. Neste cenário, aproximadamente 15% da área urbana municipal fica tomada pelas águas, e a estimativa de população atingida é de 2.400 pessoas.

De acordo com as tabelas 6 e 7, não há um significativo aumento de área atingida para TR de 10 anos. Em eventos dessa magnitude, aproximadamente 17% da área urbana de São Sebastião do Caí é atingida pelas águas (70 ha), fazendo com que mais de 2.800 pessoas sejam deslocadas. Além dos quatro bairros mencionados no cenário com TR de 5 anos, o bairro central passa a ser atingido.

No último cenário (TR de 30 anos) a área urbana atingida é de 92,9 ha (23% da área urbana municipal). De acordo com a estimativa apresentada na tabela 7, mais de 3,8 mil são atingidas pelas águas nessa magnitude. Neste cenário, as águas avançam significativamente sobre o bairro central (Fig. 10), além de atingirem o bairro Jardim Blauth.

De acordo com os dados da Defesa Civil, 3.038 habitantes foram deslocados de suas casas no evento de 2007 (TR 30 anos). Observa-se, portanto, uma diferença de 800 pessoas entre o valor estimado e o valor real. Essa diferença pode ser explicada pelo seguinte fato: muitas das casas atingidas apresentaram uma lâmina d'água baixa, o que provavelmente não implicou no deslocamento e/ou remoção das pessoas.

O tipo de uso mais impactado na área urbana é o residencial, independente da magnitude da inundação (Fig. 11). Os estabelecimentos comerciais e industriais são afetados com



Figura 10. Bairro central de São Sebastião do Caí,RS, na inundação de 12/10/2000 (Fonte: COMITECAÍ, 2008).



Figura 11. Bairro residencial atingido pelas águas da inundação de 2007 (Fonte: COMITECAÍ, 2008).

inundações de magnitude superior a 2 anos.

Quando as águas atingem o bairro central, o setor comercial é seriamente impactado (TR igual ou superior a 10 anos). É importante salientar

que a análise realizada neste trabalho teve enfoque nas áreas atingidas diretamente (com lâmina d'água) na área urbana. Se contabilizados os danos indiretos (equipamentos e serviços urbanos dani-

ficados, produção das áreas rurais comprometida, etc.) o número de pessoas afetadas aumenta significativamente. De acordo com os cálculos da Defesa Civil, o impacto da inundação de 2007 foi muito grande, afetando indiretamente 13 mil moradores de São Sebastião do Caí (65% da população total).

#### 4.4 Avaliação do mapeamento

A avaliação do mapeamento das inundações por TR foi realizada a partir de dados de campo. Como referência utilizou-se o evento ocorrido em 24 de setembro de 2007. Essa escolha foi motivada por dois fatores: a) atualidade do evento (informações mais precisas); b) magnitude da inundação (permite avaliar a precisão do modelo do terreno e do mapeamento para eventos que causam mais danos).

Nos trabalhos de campo foram coletados pontos indicando o limite do episódio. De modo geral, comprovou-se que o mapeamento da inundação apresentou uma acurácia maior do que a esperada. O erro planimétrico médio das amostras foi de apenas 19 m, indicando que o mapa superestimou um pouco as áreas inundadas. O valor é baixo se considerada a extensão média das áreas de inundação de 800 m, a ausência de ortorretificação na imagem de satélite e a forma de elaboração do MDT.

#### 5. Conclusões

De modo geral, os resultados do presente estudo foram satisfatórios e os objetivos foram alcançados com êxito, tendo em vista a precisão planimétrica constatada na avaliação do modelo na inundação de 2007 e o resíduo médio de 72 cm na previsão matemática de cota. Esses valores são semelhantes aos verificados no estudo de Eckhardt (2008).

O modelo matemático de previsão de inundações apresentou precisão submétrica para a estimativa de cotas entre 11 m e 13 m, e precisão de até 1,9 m para cotas superiores a 13 m. Esse resultado é satisfatório e permitirá um excelente avanço na antevisão das inundações, contribuindo assim para a diminuição dos possíveis danos que estas possam causar. Desta forma, acredita-se que o presente modelo é suficientemente confiável para sua utilização no sistema de previsão e alerta de enchentes previsto pela CPRM.

A qualidade do modelo digital do terreno elaborado e adotado para a espacialização das áreas atingidas também foi comprovada pelo pro-

cesso de avaliação em campo. O erro planimétrico médio verificado (19 m, no evento de 2007) pode ser considerado baixo, principalmente se comparado à extensão do extravasamento das águas nesse ano, aproximadamente 800 m.

Para finalizar, fazem-se ainda as seguintes considerações: a) seria interessante expandir o mapeamento para as áreas rurais do município para estimar o impacto nas áreas rurais e delimitar as áreas de risco; b) para aumentar a confiabilidade das espacializações seria necessária a aquisição de um modelo restituído por aerofotogrametria; c) este estudo está inserido em um projeto de pesquisa que envolve também o mapeamento das áreas de inundação na bacia do rio Caí (escala de análise menos detalhada) e a elaboração de um modelo matemático de previsão de enchentes e inundações para Montenegro.

#### Referências

- Bates, P. D. & De Roo, A. P. J. 2000. A simple raster-based model for floodplain inundation. *Journal of Hydrology*, 236: 54-77.
- Castro, A. L. C. 1998. *Glossário de defesa civil, estudos de riscos e medicina de desastres*. 2. ed., Brasília, Ministério do Planejamento e Orçamento, 283p.
- Christofoletti, A. 1981. *Geomorfologia Fluvial*. v. 1, São Paulo, Editora Edgard Blücher, 313p.
- COMITECAÍ. Comitê de Gerenciamento da Bacia Hidrográfica do Rio Caí. 2007a. *Plano de Bacia – Bacia Hidrográfica do Rio Caí. Relatório Temático A1 – Dinâmica Social*. Porto Alegre, COMITECAÍ, 117p. Disponível em: <<http://www.comitecai.com.br/plano/download.html>>. Acesso em: 10 nov. 2009.
- COMITECAÍ. Comitê de Gerenciamento da Bacia Hidrográfica do Rio Caí. 2007b. *Plano de Bacia – Bacia Hidrográfica do Rio Caí. Relatório Temático A2 – Disponibilidade Hídrica*. Porto Alegre, COMITECAÍ, 204p. Disponível em: <<http://www.comitecai.com.br/plano/download.html>>. Acesso em: 11 nov. 2009.
- COMITECAÍ. Comitê de Gerenciamento da Bacia Hidrográfica do Rio Caí. 2008. *Acervo de Fotos*. São Sebastião do Caí, COMITECAÍ. 1 CD-ROM.
- Eckhardt, R. R. 2008. *Geração de modelo cartográfico aplicado ao mapeamento das áreas sujeitas às inundações urbanas na cidade de Lajeado/RS*. Porto Alegre, 116p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Sensoriamento Remoto, Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Enomoto, C. F. 2004. *Método para elaboração de mapas de inundação: estudo de caso na bacia do rio Palmital, Paraná*. Curitiba, 122p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2007. *Banco de Dados Agregados – Sistema de Recuperação Automática (SIDRA): Censo Demográfico e Contagem da População*. Rio de Janeiro, IBGE. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/tabela/listabl.asp?z=cd&o=7&i=P&c=2093>>. Acesso em: 08 nov. 2009.
- INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. 2009. *Normais climatológicas 1961 – 1990*. Brasília, INMET. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/html/clima/mapas/?mapa=prec>>. Acesso em: 11 nov. 2009.
- Kafle, T. P., Hazarika, M. K., Shrestha, K. G., Prathumchai, K. & Samarakoon, L. 2006. Integration of remote sensing and GIS with flood simulation model for flood hazard mapping in the Bagmati River, Nepal. *In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NEW TECHNOLOGIES FOR URBAN SAFETY OF MEGA CITIES IN ASIA*, 5, 2006, Phuket, Thailand. *Proceedings...*, Pathumthani, GIC - Asian Institute of Technology, p. 257-268.
- Mendes, C. A. B. & Cirilo, J. A. 2001. *Geoprocessamento em Recursos Hídricos: Princípios, Integração e Aplicação*. Porto Alegre, Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 536p.
- Peucker, T. K., Fowler, R. J., Little, J. J. & Mark, D. M. 1979. The Triangulated Irregular Network. *In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON COMPUTER-ASSISTED CARTOGRAPHY*, 4, 1979, Reston, United States. *Proceedings...*, Reston, AUTO-CARTO, v.2, p. 96-103.
- Saldanha, D. L. & Verdum, R. 1995. Mapeamento e Avaliação das áreas inundáveis do Rio dos Sinos através da utilização de imagens TM-Landsat 5. *Revista de Geografia*, 13: 127-144.
- Silva, A. B. 1999. *Sistemas de Informações Georeferenciadas: conceitos e fundamentos*. Campinas, Unicamp, 236p.
- Silva, A. P. M. & Barbosa, A. A. 2007. Validação da função mancha de inundação do SPRING. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO*, 13, 2007, Florianópolis. *Anais...*, São José dos Campos, INPE, p. 5499-5505.
- Townsend, P. A. & Walsh, S. J. 1998. Modeling floodplain inundation using an integrated GIS with radar and optical remote sensing. *Geomorphology*, 21: 295-312.
- Trentin, C. B., Pardi Lacruz, M. S., Sousa Junior, M. A. & Silva, V. O. 2008. Análise da ocorrência de enchentes na área de abrangência do Rio Jacuí/RS com a utilização de imagens MODIS e dados SRTM. *In: SEMINÁRIO LATINO-AMERICANO DE GEOGRAFIA FÍSICA*, 5., 2008, Santa Maria. *Anais...*, Santa Maria, p. 3803-3903.
- Tucci, C. E. M. & Bertoni, J. C. (Org). 2003. *Inundações urbanas na América do Sul*. Porto Alegre, Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 389p.
- Tucci, C. E. M., Porto, R. L. L. & Barros, M. T. de. 1995. *Drenagem Urbana*. Porto Alegre, Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 428p.