

ESPACIALIZAÇÃO E ANÁLISE DAS INUNDAÇÕES NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO CAÍ/RS

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

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia.
Avenida Bento Gonçalves, 9500 – Campus do Vale – Agronomia. Caixa Postal: 15044. CEP 91501-970. Porto Alegre, RS.
Endereços eletrônicos: g.g.oliveira10@gmail.com; dejanira.saldanha@ufrgs.br; laurindo.guasselli@ufrgs.br

Introdução
Objetivos
Área de Estudo
Revisão Teórica
 Eventos Extremos
 Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento Aplicados ao Estudo de Inundações
 Interpoladores Para Geração de Grades Contínuas
Materiais e Métodos
 Materiais
 Métodos
 Manipulação dos Dados Fluviométricos
 Modelagem do Terreno com os Dados da DSG
 Mapeamento da Inundação de 24 e 25 de Setembro de 2007
 Modelagem das Áreas Inundadas Por Cota
Resultados e Discussões
 Cota Média, TR e Sazonalidade das Cheias e Inundações
 Espacialização das Inundações
 Inundação de 24 e 25 de Setembro de 2007
 Modelagem de Inundações a Partir dos MDE's SRTM e DSG
Considerações Finais
Referências Bibliográficas

RESUMO – Este estudo teve como objetivos espacializar e analisar as inundações na bacia hidrográfica do rio Caí, RS, a partir de dados obtidos por sensoriamento remoto, de dados fluviométricos e da aplicação de técnicas de geoprocessamento. O tempo de retorno (TR) das cheias no rio Caí foi obtido com base em séries históricas de cota de três estações fluviométricas. A análise dessas séries históricas possibilitou o entendimento da distribuição sazonal das cheias na bacia. Foram utilizados dois modelos digitais de elevação (MDEs). Um deles elaborado pela interpolação das curvas de nível, pontos cotados e linhas de drenagem das cartas da DSG e o outro, a partir dos dados SRTM, disponibilizado na forma matricial, com resolução de 90 m. Através da interpretação de variáveis morfométricas (declividades, curvatura, perfis do relevo, etc.) derivadas dos MDEs e em informações obtidas em trabalhos de campo, foi elaborado um mapa de referência dos limites da inundação ocorrida em 24-25/09/2007. Posteriormente, as áreas de inundação, por elevação do nível dos cursos d'água, foram modeladas a partir dos MDEs SRTM e DSG. Verificou-se que mais de 75% dos eventos de grande magnitude ocorrem entre os meses de junho e outubro. A partir do mapeamento da inundação de 2007, observou-se que os municípios mais afetados foram Montenegro e São Sebastião do Caí, e que existe uma tendência maior de inundações à margem esquerda do rio Caí, provavelmente em virtude da deflexão que ocorre no médio curso. De modo geral, os modelos de inundação superestimaram as áreas atingidas, mas representaram satisfatoriamente os locais de maior avanço das águas.

Palavras-chave: modelagem de inundações, sensoriamento remoto, geoprocessamento, geomorfologia.

ABSTRACT – G.G. de Oliveira, D.L. Saldanha, L.A. Guasselli - *Spatialization and analysis of flooding in the Caí River Basin/RS*. This study aimed to spatialize and analyze the floods in the Caí river basin, RS, from data obtained by remote sensing, from streamflow data and the application of geospatial technologies. The turnaround time (TT) flooding in Caí river was obtained based on historical data quota of three gauged stations. The analysis of historical data allowed an understanding of seasonal flooding in the basin. We used two digital elevation models (DEM's). One of them produced by interpolating the contour, measured points and drainage lines of the cartography of DSG and the other, from the SRTM data, available in matrix form, with a resolution of 90m. Through the interpretation of morphometric variables (slope, curvature, profile relief, etc.) derived from the DEM's and information obtained from field campaign, has produced a reference map of the boundaries of the flood that occurred in 24-25/09/2007. Subsequently, areas of flooding, by raising the level of water courses were modeled from the SRTM and DSG DEM's. It was found that over 75% of events of great magnitude occur between the months of June and October. From the mapping of the flood of 2007, it was observed that the municipalities most affected were Montenegro and São Sebastião do Caí, and there is a higher probability of floods on the left bank of the Caí river, probably due to the deflection that occurs in the middle course. Overall, the models overestimated the flood affected areas, but satisfactorily accounted for the biggest advance in local waters.

Keywords: modeling floods, remote sensing, geospatial technologies, geomorphology.

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).

No Brasil, as inundações são os mais frequentes, dentre os desastres naturais observados (Tucci & Bertoni, 2003), causando danos de elevada significância para as populações atingidas. Apesar disso, na maioria das cidades atingidas, observam-se poucos investimentos, tanto em medidas estruturais (obras de infraestrutura para amenizar os efeitos das inundações) quanto em medidas não-estruturais (mapeamentos, previsão e planejamento).

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 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 podem subsidiar a reorganização do espaço urbano, uma vez que são 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. De acordo com Mendes & Cirilo (2001), é essencial a existência de informações sistematizadas para subsidiar, por exemplo, a previsão e o controle de processos naturais ou induzidos pelo homem nas bacias.

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).

OBJETIVOS

Este estudo tem como objetivos gerais espacializar e analisar as inundações na bacia hidrográfica do rio Caí, Rio Grande do Sul, a partir de dados obtidos por sensoriamento remoto, de dados fluviométricos e da aplicação de técnicas de geoprocessamento.

Os objetivos específicos são: a) obter o tempo de retorno (TR) das cheias em três pontos do rio Caí; b) analisar a distribuição sazonal das cheias na bacia hidrográfica; c) elaborar o mapa da inundação de 24 e

25 de setembro de 2007, com base na interpretação visual de variáveis morfométricas (elevação, declividade, curvatura, sinuosidade dos cursos d'água, etc.), derivadas dos MDEs SRTM e DSG, e nas informações obtidas em trabalhos de campo; d) modelar as áreas de inundação, por elevação do nível dos rios, a partir de informações altimétricas (dados de elevação SRTM e da DSG); e) promover uma análise qualitativa e quantitativa dos resultados obtidos.

ÁREA DE ESTUDO

A bacia hidrográfica do rio Caí está situada na porção nordeste do estado do Rio Grande do Sul (Figura 1), entre as coordenadas geográficas 29°06' e 30°S, 50°24' e 51°40'W, e possui 4.981km². A população residente estimada é de 537.658, o que corresponde a 5% da população total do Rio Grande do Sul, dos quais 82,5% estão domiciliados em áreas urbanas (COMITECAÍ, 2007a). A bacia está inserida na região hidrográfica do Guaíba, juntamente de outras oito bacias, sendo uma das mais populosas e industrializadas da região.

Em virtude da histórica ocupação ao longo do rio Caí, os municípios mais afetados por inundações na bacia são Montenegro e São Sebastião do Caí, embora outros também apresentem prejuízos como Pareci Novo, Bom Princípio e Feliz. A periodicidade desses eventos em Montenegro e, principalmente, São Sebastião do Caí, é o fator mais preocupante. Estima-se que, em média, a área urbana deste último é atingida pelas águas a cada 1,5 anos.

Os dados existentes indicam a ocorrência de muitos eventos extremos durante as últimas décadas

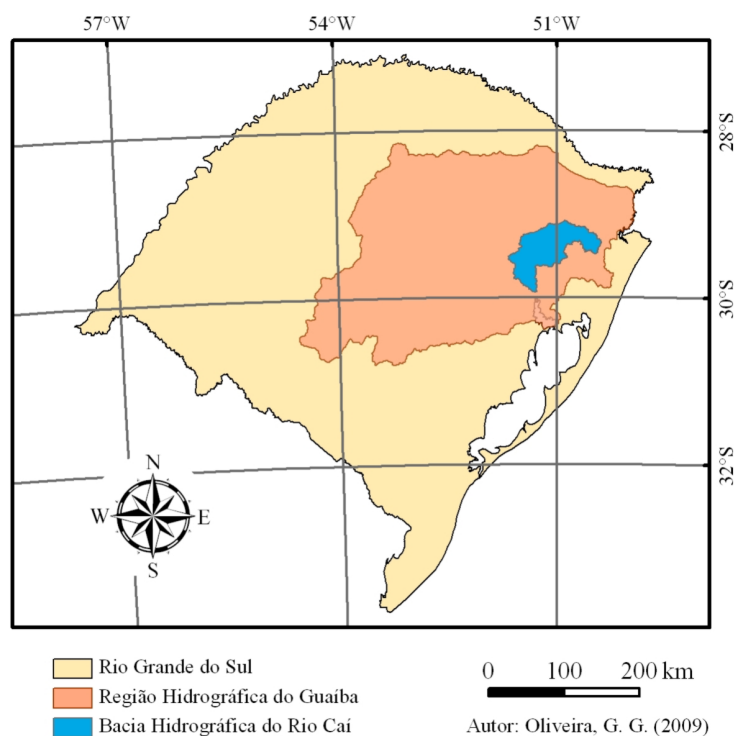


FIGURA 1. Localização da bacia hidrográfica do rio Caí, RS.

na bacia. Somente nos últimos dois anos, entre setembro de 2007 e 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 Estado do Rio Grande do Sul, 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. 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.

REVISÃO TEÓRICA

EVENTOS EXTREMOS

Eventos extremos relacionados ao regime fluvial têm como características principais a alta magnitude e a baixa frequência de ocorrência, sempre associada aos períodos de cheias. 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 precipitação pluviométrica, que pode ou não causar uma inundação. Castro (1998) define inundação como o extravasamento das águas do leito de escoamento (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 do sistema 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 produzida pelo homem, através da impermeabilização das superfícies e da canalização dos rios (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 dentro de um processo natural, com frequência média de dois anos. Segundo

Christofolletti (1981), esse processo pode ocorrer anualmente, o que definiria o leito maior normal do rio. Eventos extremos, com tempo de retorno superior a dois anos, são estudados para definir o leito maior excepcional.

A ocupação humana no leito maior dos rios ocorre em virtude das inundações terem uma distribuição irregular ao longo dos anos deixando a população exposta às águas dos rios (Tucci & Bertoni, 2003). Nas áreas urbanas, as principais consequências são danos materiais, problemas sanitários (contágio de 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 pecuária e à agricultura, com presença de poucas moradias, fazendo com que os impactos diretos sejam menores do que em meio urbano (Tucci et al., 1995).

SENSORIAMENTO REMOTO E GEOPROCESSAMENTO APLICADOS AO ESTUDO DE INUNDAÇÕES

Para 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, MDEs 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 de um 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.

Bates & De Roo (2000), por exemplo, desenvolveram uma modelagem de áreas inundadas no rio Meuse, na Holanda, através de informações altimétricas (modelos digitais de elevação). Para validação, utilizaram imagens *Sinthetic Aperture Radar* (SAR) do pico de uma inundação de grande altitude. Os resultados obtidos na modelagem foram satisfatórios, apresentando 82% de concordância com o observado na realidade.

Townsend & Walsh (1998) apresentam 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, em 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 (1996). Estes realizaram uma avaliação dos aspectos fisiográficos da planície de inundação do rio dos Sinos, sob condições hídricas distintas, através do uso das imagens. Foram mapeados, neste estudo, um fenômeno de cheia (1984), um de estiagem (1986) e um de vazão intermediária (1988).

A relação entre as áreas de inundação e os aspectos morfométricos é observada em Trentin et al. (2008). Foi avaliada a ocorrência de enchentes na área de abrangência do Rio Jacuí e sua relação com a altimetria e a declividade do terreno. 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.

Eckhardt (2008) também salienta que 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 na cidade de Lajeado/RS. A imagem de satélite foi utilizada para caracterizar o uso e ocupação do solo nas áreas atingidas pelos eventos.

INTERPOLADORES PARA GERAÇÃO DE GRADES CONTÍNUAS

De acordo com Gomes (1990), a interpolação é uma “técnica utilizada para se estimar o valor de uma determinada grandeza a partir de um conjunto de amostras”. A interpolação é necessária quando se deseja inferir valores em localizações particulares entre os pontos amostrados. Geralmente, as interpolações são utilizadas em modelagens, pois necessitam de valores contínuos para representar a realidade.

Como regra geral, num processo de interpolação, considera-se que a correlação entre dois pontos diminui à medida que aumenta a distância entre eles. Assim, é comum a utilização de uma ponderação em função da

distância (Mendes & Cirilo, 2001). Destacam-se os métodos de interpolação pelo inverso do quadrado da distância, por krigagem, *spline* e por triangulação. Cada método apresenta uma série de vantagens e desvantagens de acordo com a disposição geográfica dos pontos e da utilização de critérios estatísticos (Silva, 1999).

O inverso do quadrado da distância é um interpolador de médias ponderadas. Ao calcular o valor de um ponto numa grade, são atribuídos pesos para os pontos amostrais, inversamente proporcionais à distância ao quadrado. A soma total dos pesos é um. Quanto mais próximo uma amostra estiver do ponto da grade calculado, maior será seu peso no valor interpolado do mesmo. Trata-se de um interpolador

eficiente também do ponto de vista computacional, isto é, de rápido processamento.

O *Topo to Raster* é um método projetado especificamente para a criação de MDEs hidrologicamente corretos, originado no programa ANUDEM da *The Australian National University*, e também disponibilizado no ArcGis 9.2. O algoritmo de interpolação mescla a eficiência computacional dos métodos de interpolação locais (como o inverso do quadrado da distância) com a continuidade da superfície de métodos de interpolação globais, como a krigagem e o *spline*. Essencialmente, trata-se de uma técnica *spline* discretizada que permite representar as mudanças abruptas do terreno, como os rios e os cumes (Wahba, 1990; Hutchinson, 1993).

MATERIAIS E MÉTODOS

MATERIAIS

Para alcançar os objetivos propostos neste estudo foram utilizados os seguintes materiais:

- Dados fluviométricos: série histórica de cotas das estações Barca do Caí (localizada em São Sebastião do Caí), Nova Palmira (no município de Caxias do Sul) e Passo do Montenegro (em Montenegro), operadas pela Companhia de Recursos Minerais (CPRM);
- Dados da Diretoria de Serviço Geográfico (DSG) – Curvas de nível, pontos cotados, hidrografia e banhados – digitalizados e vetorizados;
- Dados *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), resolução espacial de 90m, disponibilizada pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA);
- GPS de navegação, com precisão de posicionamento aproximada de 10 m.

MÉTODOS

Neste item são apresentados os métodos adotados no estudo, de acordo com a seguinte estruturação: a) manipulação dos dados fluviométricos; b) modelagem do terreno com dados da DSG; c) mapeamento da inundação de 24-25/09/2007; d) modelagem de inundações por cota.

Manipulação dos Dados Fluviométricos

O processamento das séries históricas de cotas compreendeu a obtenção da cota média do rio, do TR e da distribuição sazonal das cheias e inundações, em cada estação. A série de Nova Palmira apresenta dados a partir de outubro de 1942, a estação Barca do Caí desde abril de 1947 e a estação Passo do Montenegro

a partir de dezembro de 1939. As três séries apresentam algumas falhas e/ou erros de leitura. Ainda assim, pode-se afirmar que são consistentes, principalmente se comparada à maior parte das estações em operação no Brasil. A Figura 2 ilustra a localização das estações.

A cota média do rio foi obtida pela soma das cotas registradas dividida pelo número de registros. O cálculo do TR – o período que decorre entre duas cheias de igual magnitude – se baseou em Christofolletti (1981), que 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:

$$TR = N + 1 / M$$

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.

Modelagem do Terreno com os Dados da DSG

A geração do MDE a partir dos dados vetorizados das cartas da DSG teve como embasamento teórico a proposta de Hutchinson (1993), que descreve um algoritmo para interpolação de curvas de nível e pontos cotados. O interpolador se diferencia dos demais, por considerar as linhas de drenagem, o que resulta numa superfície hidrologicamente correta, aspecto essencial para a modelagem das áreas de inundação. O algoritmo está implementado no ArcGis 9.2, na ferramenta *Topo to Raster*.

Os dados de entrada foram as curvas de nível com equidistância de 20 m, os pontos cotados, as linhas de drenagem com orientação de montante para jusante e os corpos hídricos fechados (represas, lagos e

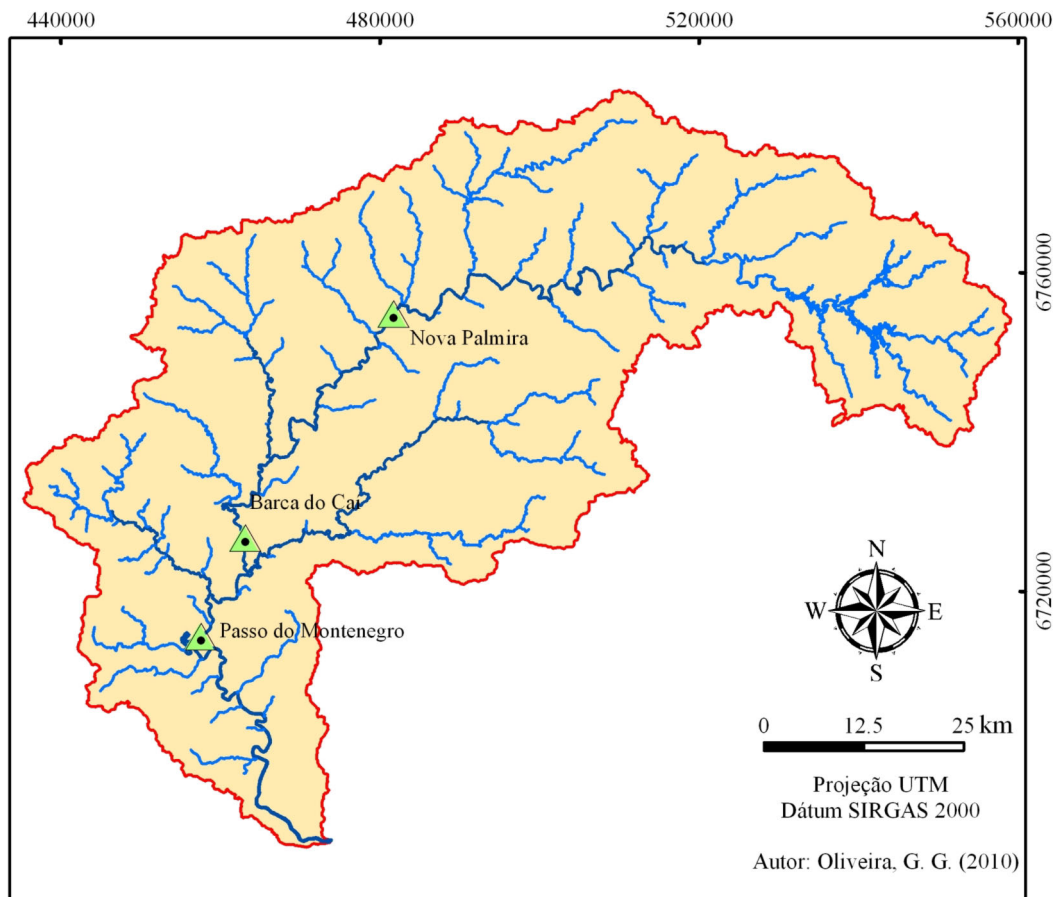


FIGURA 2. Localização das estações fluviométricas na bacia hidrográfica do rio Caí, RS.

açudes). Os parâmetros de processamento e saída do modelo foram: a) resolução espacial: 30 m; b) interações: 40; c) fonte primária de informações: curvas de nível; d) raio de interpolação: 20 pixels.

Mapeamento da Inundação de 24-25 de Setembro de 2007

A inundação ocorrida em setembro de 2007 foi uma das maiores já registradas na bacia. A espacialização deste evento contribuiu para o entendimento das inundações e permite também avaliar a qualidade dos dados altimétricos utilizados no trabalho. Além disso, por se tratar de um evento de alta magnitude, possibilita estimar, no futuro, o avanço da água em inundações com maior TR.

Esse mapeamento foi realizado a partir de informações coletadas em campo (consulta aos moradores, órgãos competentes, observações de marcas em construções, entre outras), da interpretação das bases derivadas dos MDEs (declividade, curvaturas horizontal e vertical, sombreamento do relevo, curvas de nível) e das características associadas à geomorfologia fluvial (sinuosidade, largura e forma do canal).

A primeira etapa consistiu numa análise exploratória (sobre as bases derivadas dos MDEs e as características fluviais), identificando as áreas de visitação em campo. Depois, foram realizados três trabalhos de campo, com o objetivo de delimitar a inundação de 2007 ao longo das áreas de planície e de terraços. A última etapa compreendeu a interpretação visual das bases morfométricas derivadas dos MDEs para a delimitação da inundação onde não foi possível a observação *in situ*.

Modelagem das Áreas Inundadas por Cota

O objetivo desta etapa foi modelar, com base nos dois MDEs (SRTM e DSG), as áreas atingidas por inundações a partir da elevação do nível dos principais cursos d'água, de modo a espacializar o avanço da água sobre a superfície da bacia para cada metro de subida no nível do rio.

Para identificar os principais cursos, foi necessário ordená-los, conforme a metodologia de Strahler (1952), na qual a ordem do curso se altera no encontro com outro de mesma ordem. A partir disso, foram selecionados somente os cursos d'água de ordem superior ou

igual a 4. Esse critério foi adotado com o auxílio de trabalhos de campo, onde se verificou que cursos de ordem inferior a 4 não apresentam volume de água suficiente para a ocorrência de grandes inundações. Em seguida, foi realizado um recorte da hidrografia principal, de modo a selecionar somente os cursos localizados em cotas altimétricas inferiores a 60m, uma vez que acima desta cota não se observa a presença de várzeas ou terraços planos, característicos das áreas de inundação.

Após o ordenamento e o recorte, os vetores de hidrografia foram segmentados nos vértices, e estes foram convertidos para pontos através da ferramenta *feature to point*, no ArcGis 9.2. Nesse procedimento, gera-se um ponto no centro de cada segmento. Esta conversão é necessária para a extração dos valores de elevação para a hidrografia, já que só é possível executá-la em arquivo de pontos. A extração foi realizada na extensão *Spatial Analyst*, ferramenta *Extract Values to Points*. Esse processamento gera um arquivo de pontos com o valor de elevação na tabela de atributos. Foram extraídos dois valores de elevação por ponto, um do MDE SRTM e outro do MDE DSG.

Para modelar a elevação do nível da água nos rios foram criados novos campos na tabela de atributos do arquivo de pontos. Um campo para cada nível de simulação. Com base nos dados fluviométricos e no que foi observado em campo optou-se por modelar cenários de elevação do nível da água entre 1 e 12 m,

sendo esta última, a máxima registrada ao longo do rio Caí. Dessa forma, foram criados 24 campos na tabela de atributos, sendo 12 para simular o aumento do nível de acordo com os dados do MDE SRTM e 12 com os dados do MDE DSG.

A expressão utilizada para cada campo foi a seguinte:

$$C = CR + AN$$

onde: C é a cota atingida pelo rio no cenário modelado; CR é a cota normal do rio; AN é o aumento no nível.

Esse cálculo foi aplicado para simular 12 cenários diferentes (com AN entre 1 e 12 m), para os dois tipos de informação altimétrica (SRTM e DSG). Como resultado, se obteve a cota atingida pelas águas para cada metro de aumento de nível.

Em seguida, iniciou-se o processo de interpolação desses pontos. Foi realizada uma interpolação para cada um dos campos criados, gerando uma superfície de cota atingida para cada cenário e tipo de dado. Nestas superfícies, cada célula tem um valor interpolado da cota que é atingida pelas águas.

A espacialização das áreas afetadas pelas águas (inundadas) ocorre através do cruzamento de cada superfície com o seu respectivo MDE. Se a cota do pixel avaliado é igual ou inferior à cota atingida pela água nele, o mesmo é dado como inundado. Esse procedimento foi realizado de forma automática através da ferramenta *Raster Calculator*.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

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

COTA MÉDIA, TR E SAZONALIDADE DAS CHEIAS E INUNDAÇÕES

Os valores de cota média foram importantes para a obtenção da verdadeira magnitude das inundações, uma vez que o valor registrado na régua não representa o aumento do nível do rio.

A cota média – nível normal das águas na régua – foi de 1m em Nova Palmira, de 2,72 m na Barca do Caí (São Sebastião do Caí) e de 1,62 m em Montenegro. A maior cota registrada em Nova Palmira foi de 9m, aumento no nível médio de 8 m; em São Sebastião do Caí foi de 14,75m (12,03 m acima da média), e em Montenegro foi 9,2 m (7,58 m acima da média).

O resultado dos cálculos de TR das cheias em Nova Palmira, Barca do Caí e Passo do Montenegro é

apresentado, sinteticamente (dez maiores cheias), nas Tabelas 1A, 1B e 1C, respectivamente. A Tabela 2 ilustra a cota atingida e o aumento do nível em TR de 2, 5, 10, 20 e 30 anos.

De acordo com os resultados expostos na Tabela 1, três das cinco maiores inundações registradas em Nova Palmira e as duas maiores em São Sebastião do Caí ocorreram na década atual. Esse dado acena para a possibilidade de um aumento na frequência de eventos de grande magnitude na região, uma vez que a régua não sofreu nenhum tipo de desnivelamento. No entanto, em virtude das falhas existentes nas séries e também dos eventuais erros de leitura, não é possível garantir que a periodicidade desses eventos tenha se alterado significativamente nas últimas décadas.

Observa-se que apenas três inundações tiveram grandes magnitudes em todas as estações, sendo elas: a) 1982 (3ª maior cheia nas três estações) com TR médio de 20,6 anos; b) 2000 (ordem 2; 1; 7 – respectivamente (a), (b) e (c)) com TR médio de

TABELA 1. TR das maiores cheias em Nova Palmira (A), Barca do Caí (B) e Montenegro (C).

A				B			
Ano	Cota (m)	Ordem	TR (anos)	Ano	Cota (m)	Ordem	TR (anos)
1986	9,00	1	62,00	2000	14,75	1	60,00
2000	8,80	2	31,00	2007	14,70	2	30,00
1982	8,00	3	20,67	1982	14,60	3	20,00
2007	7,80	4	15,50	1956	14,50	4	15,00
2003	7,40	5	12,40	1980	13,98	5	12,00
1990	7,20	6	10,33	1990	13,98	6	10,00
1980	7,19	7	8,86	1954	13,90	7	8,57
1975	7,03	8	7,75	1965	13,74	8	7,50
1988	6,98	9	6,89	1997	13,66	9	6,67
1983	6,68	10	6,20	1984	13,60	10	6,00

C			
Ano	Cota (m)	Ordem	TR (anos)
1941	9,20	1	63,00
2007	8,70	2	31,50
1982	8,52	3	21,00
1942	8,38	4	15,75
1965	8,32	5	12,60
1967	8,32	6	10,50
2000	8,24	7	9,00
1956	8,20	8	7,88
1988	8,20	9	7,00
1984	8,13	10	6,30

TABELA 2. Cota atingida e aumento no nível do rio por TR.

Nova Palmira			Barca do Caí			Passo do Montenegro		
TR	Cota	Aumento no nível do rio (AN)	TR	Cota	Aumento no nível do rio (AN)	TR	Cota	Aumento no nível do rio (AN)
30	8,80	7,80	30	14,70	11,98	30	8,70	7,08
20	8,00	7,00	20	14,60	11,88	20	8,50	6,88
10	7,20	6,20	10	14,00	11,28	10	8,30	6,68
5	6,40	5,40	5	13,60	10,88	5	8,00	6,38
2	5,20	4,20	2	12,00	9,28	2	7,30	5,68

33,3 anos; c) 2007 (ordem 4; 2; 2) com TR médio de 25,7 anos.

A maior parte dos eventos listados na Tabela 1 aparece somente em uma série, ou seja, teve grande magnitude em um dos três pontos estudados. Embora exista a possibilidade de erro de leitura nas medidas, esse fato pode ser explicado por fatores locais, como o remanso das águas, as obstruções nos canais, as variações na forma do vale, o microclima, entre outros.

A Tabela 2 mostra que o AN é superior na estação Barca do Caí, em São Sebastião do Caí. Isso se deve, em parte, a um maior desnível (aproximadamente 8 m) entre o rio e a planície de inundação neste ponto do curso. Além desse, outro fator ajuda a explicar o elevado AN no local: a presença de um ponto de “estrangulamento” do rio a 2 km, no sentido jusante, onde o curso principal passa entre dois morros de vertentes íngremes, indicado pela seta na Figura 3.

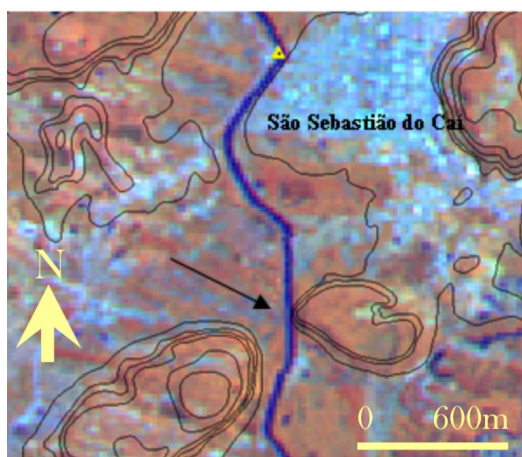


FIGURA 3. Estrangulamento do rio à jusante de São Sebastião do Caí, RS.

Outro aspecto observável na Tabela 2 é que a diferença de cota entre eventos de baixa magnitude (TR de 2 anos) e de alta (30 anos) decresce de montante à jusante, isto é, das áreas de maior declividade onde o rio está encaixado no vale às áreas de várzeas. A diferença é de 3,6 m em Nova Palmira, decresce para 2,7 m em São Sebastião do Caí e é de apenas 1,40 m em Montenegro.

Quanto à distribuição sazonal das cheias ao longo das séries históricas, a Tabela 3 revela que há uma concentração entre junho e outubro, representando 77% das cheias em Nova Palmira, 75% em São Sebastião do Caí e 79% em Montenegro. O mês de setembro se destaca em duas estações, sendo que, em São Sebastião do Caí, representa mais do que 25% das cheias. O resultado condiz com o esperado, pois corresponde ao período mais chuvoso do ano (INMET, 2009).

TABELA 3. Sazonalidade das cheias.

Nova Palmira			Barca do Caí			Passo do Montenegro		
Mês	Cheias	Proporção	Mês	Cheias	Proporção	Mês	Cheias	Proporção
Jan	2	3,28%	Jan	2	3,39%	Jan	2	3,23%
Fev	2	3,28%	Fev	1	1,69%	Fev	1	1,61%
Mar	1	1,64%	Mar	1	1,69%	Mar	1	1,61%
Abr	1	1,64%	Abr	2	3,39%	Abr	2	3,23%
Mai	1	1,64%	Mai	2	3,39%	Mai	2	3,23%
Jun	10	16,39%	Jun	8	13,56%	Jun	11	17,74%
Jul	6	9,84%	Jul	6	10,17%	Jul	10	16,13%
Ago	7	11,48%	Ago	7	11,86%	Ago	9	14,52%
Set	13	21,31%	Set	15	25,42%	Set	9	14,52%
Out	11	18,03%	Out	8	13,56%	Out	10	16,13%
Nov	1	1,64%	Nov	1	1,69%	Nov	1	1,61%
Dez	6	9,84%	Dez	6	10,17%	Dez	4	6,45%

ESPAIALIZAÇÃO DAS INUNDAÇÕES

Inundação de 24-25 de Setembro de 2007

A Figura 4 representa a espacialização da inundação ocorrida em 24 e 25 de setembro de 2007. O mapeamento, embora apresentado em escala inferior, é compatível com a escala 1:250.000.

A maior parte das áreas inundadas na ocasião está localizada nas áreas planas das várzeas e terraços fluviais do rio Caí, que se estendem desde a área urbana de Feliz até o exutório da bacia. Outras áreas menores são observadas ao longo do rio Cadeia (PT5) e do arroio Maratá (PT3). Em alguns pontos próximos à foz do rio Caí, constatou-se um extravasamento de até 8 km das águas.

A declividade média, de acordo com os dados SRTM, da área de inundação no evento foi de 1,36%, em uma área total de 347 km² (6,97% da bacia). A área de extravasamento do rio está bem relacionada com o volume de água e a área de concentração, uma vez que, geralmente, esta aumenta na medida em que se aproxima da foz. No entanto, verificam-se pontos de afunilamento do rio, sem a presença de áreas de várzea ou terraços aluviais (indicação com setas na Figura 4). Geralmente, à montante desses pontos, forma-se uma extensa área de inundação, possivelmente associada ao represamento das águas.

O mapa mostra também que a maior parte das áreas inundadas está localizada junto à margem esquerda do rio principal, evidenciando que o processo

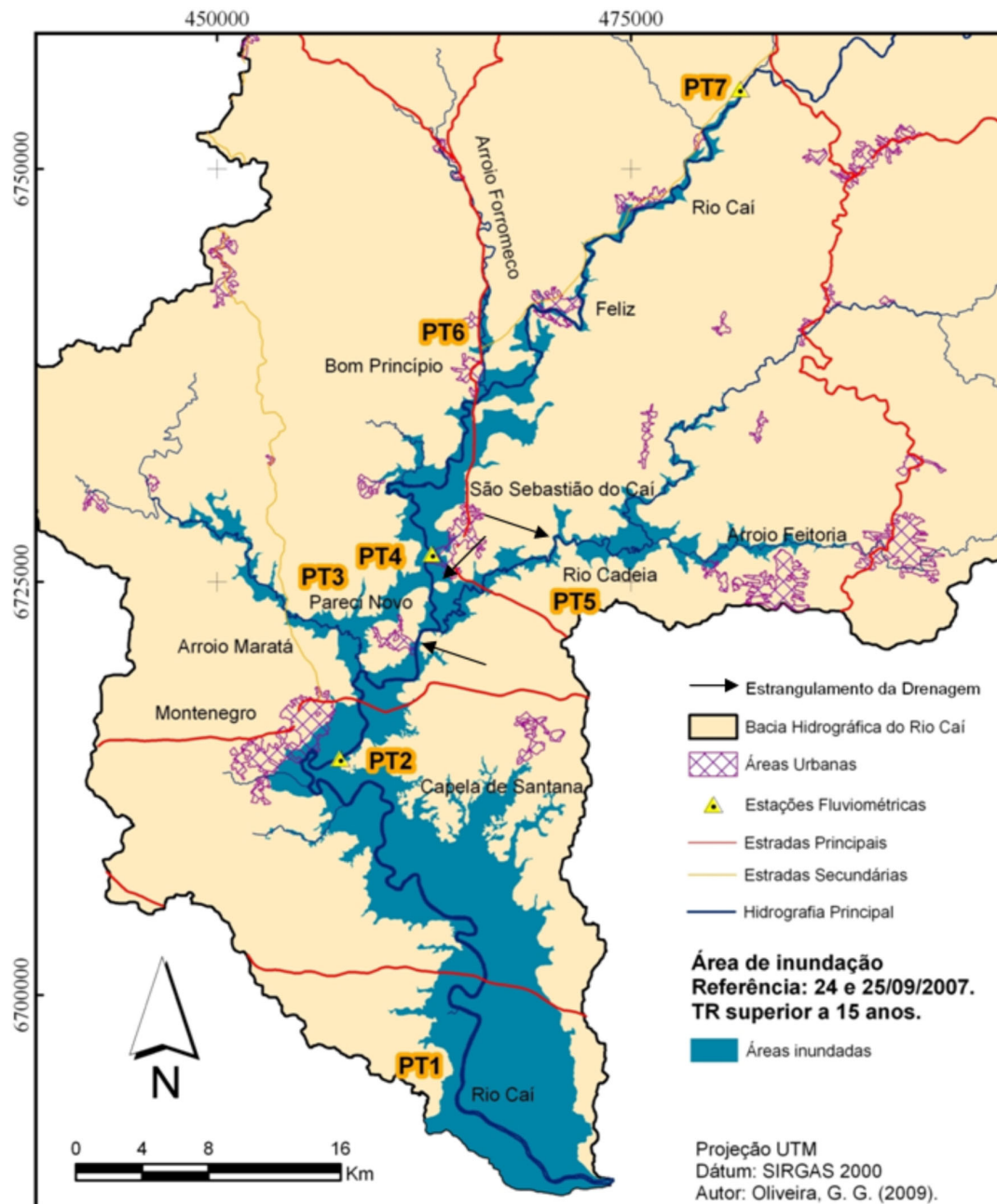


FIGURA 4. Áreas inundadas em 24-25/09/2007 na bacia hidrográfica do rio Caí, RS.

de deposição foi mais intenso nessa margem do que na outra, originando extensas áreas de várzea. Além disso, verificou-se que o rio possui uma forma arqueada, onde à montante da estação Nova Palmira (PT7) tem dois sentidos preferenciais, Sudeste-Noroeste e Leste-Oeste, e à jusante assume os sentidos Nordeste-Sudoeste, Norte-Sul e Noroeste-Sudeste. Estas características estão relacionadas à estrutura geológica da bacia. Seria necessária, portanto, uma análise detalhada do arcabouço geológico e geomorfológico para a compreensão das mudanças de direção do rio e das grandes diferenças espaciais de deposição e erosão, bem como suas relações com as inundações.

Quanto aos municípios mais afetados na inundação de 2007, destacaram-se Montenegro, Pareci Novo, São Sebastião do Caí, Bom Princípio e Feliz. As duas áreas urbanas mais afetadas foram Montenegro (158,86 ha) e São Sebastião do Caí (118,40 ha). A lâmina d'água chegou a cobrir completamente algumas casas nesses dois municípios, tal a magnitude do evento.

No PT1 (Figura 4) observou-se em campo e na base da DSG a presença de uma extensa área úmida, composta por diversos banhados. A largura do rio no trecho varia entre 120 e 150 m, sendo que uma elevação de dois a quatro metros no nível da água do rio já é suficiente para o extravasamento do leito menor e para

a inundação de grandes extensões de  rea. Embora não se tenha dados precisos (medidas de vazão ou cota), dificilmente a varia o de nível acima da média ultrapassaria os cinco metros, tendo em vista o volume do rio e a área a ser inundada. Estima-se, através de conversas com moradores locais, que as águas subiram entre 3 e 4 m durante a inunda o de 2007.

O PT2, localizado em Montenegro, também representa uma área de inunda o de interesse para o estudo, justamente por afetar o município mais populoso às margens do rio Ca . A largura do rio   de aproximadamente 60 m e o extravasamento das águas ocorre quando o nível do rio aumenta 6 m em rela o   média (em 2007 o nível subiu 7,08 m). Em campo, foram observados diversos banhados, geralmente com cotas inferiores às observadas no limite do leito menor, em virtude, muitas vezes, dos diques naturais e artificiais observados nas proximidades.

Também   interessante notar a alta sinuosidade do rio neste ponto, indicando a existência de um condicionamento do substrato e/ou simplesmente uma “tentativa” do regime fluvial de diminuir a velocidade do fluxo. De acordo com COMITECAÍ (2007b), em eventos de alta magnitude o meandro observado no PT2 fica totalmente submerso pelas águas, fazendo com que a velocidade do fluxo aumente consideravelmente.

Outra  rea que merece destaque   denominada de Várzea do Parec , local sinalizado pela linha tracejada junto ao PT3. Neste ponto, em eventos de grande magnitude como o de 2007, ocorre uma jun o de duas áreas de inunda o (conexão da várzea do arroio Maratá com os terraços aluviais do rio Ca , na mancha urbana de São Sebastião do Caí). Esse fen meno pode formar uma extensa ilha (um alto topográfico com afloramentos basálticos – Forma o Gramado – circundados pelo Arenito Botucatu), isolando a área urbana de Parec  Novo das cidades vizinhas.

Para evitar esse isolamento, foi promovida uma obra que pode causar impactos no município de São Sebastião do Caí. A estrada estadual que margeia o rio Ca  foi elevada em mais de um metro em alguns trechos. Isso pode ampliar a magnitude das inunda es na outra margem, pois será necessária mais área inundada para dar vazão ao volume do rio.

O PT4 está relacionado   estac o Barca do Caí, em São Sebastião do Caí. Neste ponto o rio tem em média 45 m de largura e somente uma eleva o de 7,8 m no nível médio do rio provoca o extravasamento das águas do leito menor. Dos pontos visitados em campo, este   o que apresenta a maior varia o na cota do rio, podendo chegar aos 12 m. Em 2007, por exemplo, o rio subiu 11,98 m em rela o   média. No período entre

set/07 e set/09, o rio transbordou cinco vezes, todas atingindo moradias da área urbana do município.

Ao longo do rio Cadeia se observa também algumas áreas de inunda o, especialmente na confluência com o arroio Feitoria (PT5). Neste ponto, as inunda es costumam ter baixa dura o, em virtude da declividade ser mais acentuada do que nos quatro pontos detalhados anteriormente. A largura do rio Cadeia não ultrapassa os 30 m na foz, e 15 m no PT5. As  guas transbordam o leito menor sob uma eleva o de nível superior a três metros.

Assim como no PT5, o PT6, que está localizado próximo   foz do arroio Forromeco, caracteriza-se como uma área de inunda es rápidas. No PT6, no entanto, não ocorrem inunda es com a freq ncia observada nos demais pontos. Além disso, a área de inunda o ao longo deste arroio   pequena. Isso se deve   declividade elevada desse trecho do arroio, a qual confere mais velocidade ao escoamento da  gua. Além disso, o arroio possui baixa sinuosidade, fator que também contribui para aumentar a velocidade do fluxo. A largura do curso   de 20 m no PT6 e o extravasamento das águas ocorre em eleva es superiores a quatro metros do nível do arroio.

Por fim, o último ponto destacado   o PT7, localidade de Nova Palmira, em Caxias do Sul. A largura média do rio Ca  neste trecho   de 30 m e o extravasamento das águas   muito raro, em virtude da alta velocidade de escoamento no rio. Em 2007, o nível do rio ficou em 6,8 m acima da média, e resultou em poucos pontos de inunda o na área, de rápida dura o.

Modelagem de Inunda es a Partir dos MDE's SRTM e DSG

As Figuras 5 e 6 apresentam as áreas de inunda o na bacia do rio Ca  através da utiliza o dos dados SRTM e da DSG, respectivamente, na qual se observa o avanço da água em fun o da eleva o de 1 a 12 m do nível médio dos rios.

Na modelagem a partir dos dados SRTM (Figura 5) pode-se observar que há uma superestima o das áreas inundadas, principalmente no que se refere   eleva o de 1 m no nível dos rios (magnitude insuficiente para o extravasamento das águas do leito menor dos principais cursos d' gua). Esse aspecto condiz com o que era esperado, uma vez que os dados SRTM não possuem acurácia vertical suficiente para identificar o leito menor dos rios existentes na bacia, fazendo com que praticamente não haja desnível entre o curso d'água e as várzeas ou terraços aluviais adjacentes.

A modelagem das áreas de inunda o por eleva o do nível dos principais rios com os dados das cartas da DSG (Figura 6), embora também tenha superestimado as áreas de inunda o, apresentou maior

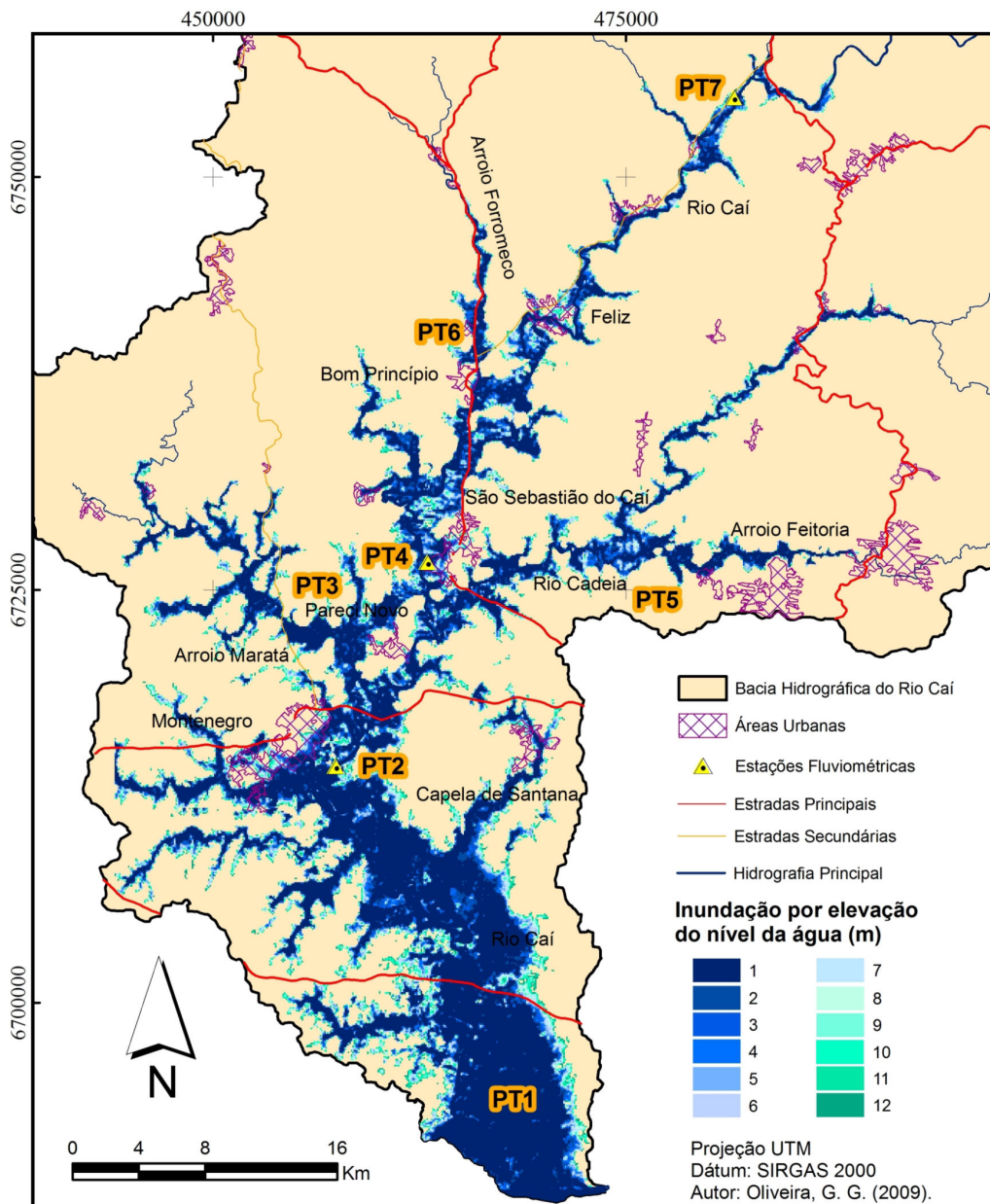


FIGURA 5. Áreas de inundação por elevação do nível dos principais rios (MDE SRTM).

concordância com o observado em campo, se comparada à modelagem com dados SRTM. O método de interpolação utilizado (*Topo to Raster*) foi fundamental para a obtenção dos bons resultados nesta modelagem. Os problemas verificados se devem, em geral, à escassez de pontos cotados ao longo dos rios e das margens e à escala de mapeamento.

Porém, ao analisar a distribuição espacial das áreas modeladas como inundáveis, ambos os resultados foram considerados satisfatórios. O padrão de distribuição das áreas atingidas pela água nos modelos (Figuras 5 e 6) se assemelha ao observado em 24-25/09/2007 (Figura 4).

Analisando pontualmente a qualidade dos modelos,

verificou-se que os modelos não representaram satisfatoriamente as áreas de inundação no PT1. O modelo oriundo do MDE SRTM (Figura 5) até simulou bem a inundação de 2007, onde se verificou que as áreas de inundação até uma elevação de 4 m no nível do rio (provável magnitude do evento) se correlacionam com o observado na Figura 4. No entanto, ao utilizar o MDE SRTM para simular inundações com magnitudes inferiores, observa-se que o mesmo superestima as áreas afetadas no PT1. Já no modelo com o MDE DSG (Figura 6), verificou-se o contrário: a) baixa qualidade no mapeamento de eventos de maior magnitude (como o de 2007), subestimando a área inundada no PT1 (devido à escassez de pontos cotados);

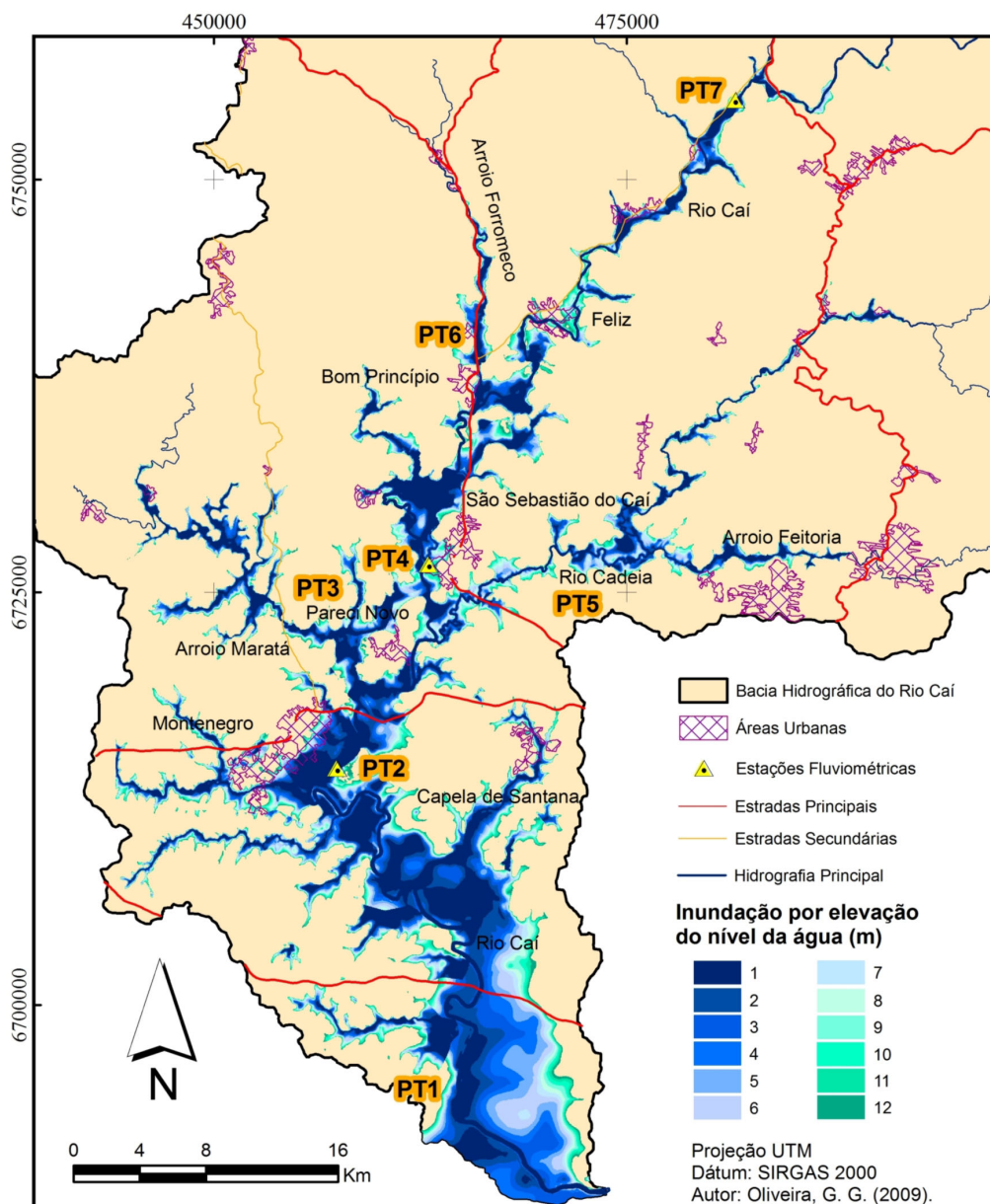


FIGURA 6. Áreas de inundação por elevação do nível dos principais rios (MDE DSG).

b) melhor representação de eventos de magnitude inferior a 3 m no PT1.

No PT2, em Montenegro, os MDEs SRTM e DSG superestimaram as áreas inundadas em 2007 (considerando elevação de 7 m no nível). A área urbana inundada, de acordo com o modelo SRTM, foi de 474,58 ha, ou seja, três vezes superior ao mapeado na Figura 4 (158,86 ha). Com o modelo DSG se obteve um resultado mais realista, com 291,61 ha atingidos pela inundação.

Em São Sebastião do Caí, o modelo de inundação a partir do MDE DSG representou melhor a inundação de 2007 (elevação de 12 m no nível do rio). A área urbana atingida, de acordo com o cruzamento entre o modelo e a mancha urbana de São Sebastião do Caí, foi

de 100,48 ha (subestimação de 18 ha). O MDE SRTM novamente superestimou a área atingida (275,33 ha).

Nos outros pontos observou-se uma boa correlação entre o padrão de distribuição das áreas inundadas nos modelos e no mapeamento de referência. O MDE SRTM, em geral, superestimou mais as áreas atingidas do que o MDE DSG. O motivo disso é o erro associado às áreas inundadas com a elevação de apenas um metro no nível dos rios (em virtude da baixa acurácia vertical).

Essa constatação é bem ilustrada na Tabela 4, a qual apresenta as áreas inundadas por elevação da cota do rio nos dois modelos. Para os outros níveis de elevação, a área inundada no modelo DSG é maior do que a observada nos dados SRTM.

TABELA 4. Área inundada nos modelos SRTM e da DSG, na bacia hidrográfica do rio Caí, RS.

Elevação da cota do rio	Área inundada SRTM (ha)	Área inundada DSG (ha)
1 m	292,77	133,80
2 m	40,19	52,32
3 m	33,77	47,24
4 m	28,54	40,29
5 m	24,87	35,24
6 m	22,83	30,63
7 m	20,86	23,92
8 m	19,17	22,58
9 m	18,55	21,18
10 m	18,39	20,66
11 m	16,82	18,52
12 m	16,98	18,15
Total	553,74	464,53

É importante lembrar ainda que, embora a área inundada pelo MDE DSG, em cenário de um metro de elevação do nível, seja bastante inferior à observada pelo uso do MDE SRTM, esta também não condiz com

o observado na realidade. Como já fora citado anteriormente, uma cheia de magnitude tão baixa não ocasiona problemas com inundações em nenhum dos cursos d'água estudados detalhadamente.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A espacialização da inundação de 24-25 de setembro de 2007 apresentou bons resultados e poderá servir de referência para diversas aplicações, uma vez que identifica as áreas suscetíveis às inundações com TR de mais de 25 anos. Além disso, esse mapeamento contribuiu na avaliação preliminar dos modelos construídos neste estudo.

De modo geral, as modelagens apresentaram resultados satisfatórios, tendo em vista as limitações impostas pela baixa acurácia vertical e resolução espacial dos dados SRTM e da DSG. Mesmo com todas as limitações inerentes aos dados de entrada nos modelos, foram obtidos dois mapas que identificam o padrão de distribuição das áreas inundadas em diferentes cenários de elevação das águas dos rios. Os resultados obtidos neste trabalho incentivam a aplicação do método em outras bacias, ou o aprimoramento do mesmo com a entrada de outros dados ou variáveis.

Quanto ao MDE elaborado a partir da interpolação

de dados da DSG, é importante destacar que o interpolador *Topo to Raster* ofereceu melhores resultados do que com a aplicação de outras técnicas, como triangulações, a krigagem e o inverso do quadrado da distância. A inserção de variáveis como linhas de drenagem, lagos, entre outras, possibilita a elaboração de um modelo de superfície hidrologicamente mais realista, fator determinante para o estudo de recursos hídricos.

Para finalizar, é importante destacar que o presente estudo está inserido em um projeto de pesquisa que tem como objetivos, em curto prazo, modelar e mapear com precisão submétrica as áreas de inundação por TR e por cota nas manchas urbanas de Montenegro e São Sebastião do Caí, e conceber um modelo matemático de previsão de inundações, baseado na correlação cota-cota, para os dois municípios. Os resultados obtidos pela execução do projeto subsidiarão o sistema de alerta de cheias e inundações da bacia do rio Caí, de responsabilidade da CPRM.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BATES, P.D. & DE ROO, A.P.J. A simple raster-based model for floodplain inundation. *Journal of Hydrology*, n. 236, p. 54-77, 2000.
- CASTRO, A.L.C. **Glossário de defesa civil, estudos de riscos e medicina de desastres**. 2ª.ed. Brasília: Ministério do Planejamento e Orçamento, 283 p., 1998.

3. CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia Fluvial**. v. 1, Canal Fluvial, Editora Edgard Blücher, 313 p., 1981.
4. COMITECAÍ. **Plano de Bacia – Bacia Hidrográfica do Rio Caí**. Relatório Temático A1 – Dinâmica Social. Comitê de Gerenciamento da Bacia Hidrográfica do Rio Caí, Porto Alegre, 2007 (a). Disponível em: <<http://www.comitecai.com.br/plano/download.html>>. Acesso em: 10nov2009.
5. COMITECAÍ. **Plano de Bacia – Bacia Hidrográfica do Rio Caí**. Relatório Temático A2 – Disponibilidade Hídrica. Comitê de Gerenciamento da Bacia Hidrográfica do Rio Caí, Porto Alegre, 2007 (b). Disponível em: <<http://www.comitecai.com.br/plano/download.html>>. Acesso em: 10nov2009.
6. ECKHARDT, R.R. **Geração de modelo cartográfico aplicado ao mapeamento das áreas sujeitas às inundações urbanas na cidade de Lajeado/RS**. Porto Alegre, 2008. 116 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
7. ENOMOTO, C.F. **Método para elaboração de mapas de inundação: estudo de caso na bacia do rio Palmital, Paraná**. Curitiba, 2004. 122 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.
8. GOMES, P.F. **Curso de estatística experimental**. 13^a. ed. Piracicaba: Nobel, 468 p., 1990.
9. HUTCHINSON, M.F. Development of a continent-wide DEM with applications to terrain and climate analysis. In: **Environmental Modeling with GIS**. New York: Oxford University Press, p. 392-399, 1993.
10. INMET. **Normais climatológicas 1961 – 1990**. Instituto Nacional de Meteorologia, Brasília, 2009. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/html/clima/mapas/?mapa=prec>>. Acesso em 11nov2009.
11. KAFLE, T.P.; HAZARIKA, M.K.; SHRESTHA, K.G.; PRATHUMCHAI, K.; SAMARAKOON, L. Integration of remote sensing and GIS with flood simulation model for flood hazard mapping in the Bagmati River, Nepal. Thailand: **New Technologies for Urban Safety of Mega Cities in Asia**, p. 257-268, 2006.
12. MENDES, C.A.B. & CIRILO, J.A. **Geoprocessamento em Recursos Hídricos: Princípios, Integração e Aplicação**. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 536 p., 2001.
13. OLIVEIRA G.G. **Mapas aplicados às inundações na bacia hidrográfica do rio Caí, Rio Grande do Sul**, 2009.
14. OLIVEIRA G.G. **Modelos para previsão, espacialização e análise das áreas inundáveis na bacia hidrográfica do rio Caí, RS**. Porto Alegre, 2010. 148 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
15. SALDANHA, D.L. & VERDUM, R. Mapeamento e Avaliação das áreas inundáveis do Rio dos Sinos através da utilização de imagens TM-Landsat 5. **Revista de Geografia da UNESP**, Editora Unesp, v. 13, p. 127-144, 1996.
16. SILVA, A.B. **Sistemas de Informações Geo-referenciadas: conceitos e fundamentos**. Campinas: Unicamp, 236 p., 1999.
17. SILVA, A.P.M. & BARBOSA, A.A. Validação da função mancha de inundação do SPRING. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13, 2007, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: INPE, 2007, p. 5499-5505.
18. STRAHLER, A.N. Dynamic basis of Geomorphology. **Geological Society America Bulletin**, v. 63, p. 923-938, 1952.
19. TOWNSEND, P.A. & WALSH, S.J. Modeling floodplain inundation using an integrated GIS with radar and optical remote sensing. **Geomorphology**, v. 21, p. 295-312, 1998.
20. TRENTIN, C.B.; LACRUZ, M.S.P.; SOUSA JR., M.A.; SILVA, V.O. **Análise da ocorrência de enchentes na área de abrangência do Rio Jacuí/RS com a utilização de imagens MODIS e dados SRTM**. 2008. Disponível em: <<http://www.inpe.br/crs/geodesastres/imagens/publicacoes>>. Acesso em: 23dez2008.
21. TUCCI, C.E.M. & BERTONI, J.C. (Orgs.). **Inundações urbanas na América do Sul**. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 474 p., 2003.
22. TUCCI, C.E.M.; PORTO, R.L.L.; BARROS, M.T. DE. **Drenagem Urbana**. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 428 p., 1995. (Coleção ABRH de Recursos Hídricos).
23. WAHBA, G. Spline models for Observational data. In: CBMS-NSF REGIONAL CONFERENCE SERIES IN APPLIED MATHEMATICS, 1990, Philadelphia. **Paper...** Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 1990, 180 p.

*Manuscrito Recebido em: 24 de maio de 2010
Revisado e Aceito em: 3 de agosto de 2010*