

A enchente de São Luis do Paraitinga: evidências de sua dimensão obtidas a partir de dados orbitais

Nelson Wellausen Dias^{1,2}
Getulio Teixeira Batista²
Celso de Souza Catelani²

¹ Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE
Av. Francisco Porto, 107 – 49000-000 – Aracaju – SE, Brasil
nelson.dias@ibge.gov.br

² Universidade de Taubaté - UNITAU
Est. Mun. Dr. José Luiz Cembranelli, 5000 - 12081-010 - Taubaté - SP, Brasil
getulio@agro.unitau.br; cscatelani@gmail.com

Abstract. The town of São Luis do Paraitinga was heavily affected by a flood in the 2010 New Year's Eve. According to initial assessment Paraitinga River water rose 15 meters above its normal level. Precipitation measuring equipment was either nonexistent or non-operational during the storm. Churches built in the 19th century with weak structures were completely destroyed during the flood. The objective of this article was to answer the following question: do the marks left by the flood in a Landsat image obtained 40 days after the event could provide significant information toward understanding the intensity and location of the torrential rains that caused this catastrophic event? Methods included Landsat TM classification through a decision tree technique to identify the actual flooded area. The classified raster map was converted to vector for both post-classification edition and comparison with a DEM dataset (provided by TOPODATA Project) to measure elevation in 72 transects distributed 1,000 meter apart along the river channel. Results indicate that the river raised an average of 22m with 10.8m standard deviation during the flood. Above the confluence of Paraitinga and Jacui rivers, transect elevation show that Paraitinga may have a channel more deeply carved in the landscape. Flood reach 34m at Paraitinga compared to 25m at Jacui, which shows wider flooded areas. As a conclusion it can be stated that both rivers contributed similarly to the flood and rains might have dropped at similar intensity in both catchment areas.

Palavras-chave: flood impact assessment, hydrographic basin, remote sensing, avaliação do impacto de enchente, bacia hidrográfica, sensoriamento remoto.

1. Introdução

O município de São Luis do Paraitinga, localizado no Cone Leste do Estado de São Paulo, sofreu a maior enchente de sua história durante a virada do ano de 2009 para 2010. Informações veiculadas na imprensa afirmaram que o nível do rio Paraitinga atingiu 15 m acima do nível normal (Marra, 2010). Informações preliminares e informais de técnicos do Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE) indicavam a ocorrência de vazões acima de 1.000 m³/s durante o evento do dia 1º de janeiro de 2010 e possibilidade deste representar uma precipitação com tempo de retorno da ordem de 300 anos. Prédios históricos tombados na área central da cidade ficaram extremamente danificados ou foram destruídos pela ação da água da cheia sobre a estrutura frágil de prédios antigos. A igreja Nossa Senhora das Mercês, erguida em 1814, tinha sua estrutura toda em taipa e, por isso, não resistiu à ação da água da enchente e sofreu destruição total. Imagens do campanário da igreja matriz São Luiz de Toloza na praça central da cidade desmoronando após várias horas desde o início da enchente ficaram gravadas na memória daqueles que conheciam este monumento histórico construído em diversas fases durante o século 19 e concluída em 1927 (Gerbelli, 2010).

O rio Paraitinga que contorna a cidade possui sua bacia inserida na porção ocidental da Serra do Mar, a qual se caracteriza por apresentar um relevo com elevada diversidade topográfica, conhecida pelo seu “mar de morros” (Ab’Saber, 2003). A maior parte da vegetação natural de Mata Atlântica que cobria esses terrenos acidentados foi removida pela

influência dos ciclos de produção agrícola que passaram pela região, principalmente o café. Com isso os solos da região ficaram desprotegidos contra a ação da erosão e consequente perda de fertilidade. Tornaram-se, portanto, terrenos incapazes de reter a água da chuva aumentando o escoamento superficial associado às chuvas torrenciais de verão, principalmente após o solo já estar encharcado pelo ocorrência de chuvas prolongadas. Ranzani et al. (2004) afirmam que bacias como essas, onde ocorreu o corte raso da cobertura vegetal, sofrem um aumento significativo do volume de vazão, redução do tempo de pico, aumento das áreas de saturação e consequente potencialização do escoamento superficial. O rio Paraitinga é um dos dois principais rios formadores da represa de Paraibuna, neste contexto outros autores já apontaram que os efeitos da ação antrópica afetam diretamente a erosão e o transporte de sedimentos e se constituem em um processo dinâmico e sujeito a alterações diversas (Castro et al., 2004, Benassi et al., 2005, Dill et al., 2005) que dificulta sua exata compreensão.

Este evento catastrófico que assolou São Luis do Paraitinga mobilizou diversas instituições no intuito de gerar subsídios que permitissem conhecer a intensidade, localização e duração das chuvas torrenciais que caíram na madrugada do dia 01 de janeiro de 2010. Isso porque na região não existiam equipamentos em funcionamento que permitissem medir, com a precisão necessária, a localização da chuva, o volume precipitado e a duração do evento.

Ao obter-se uma imagem Landsat TM de fevereiro de 2010 para fins de geração de um mapa atualizado do uso e cobertura do solo do Vale do Paraíba Paulista por meio de classificação supervisionada, observou-se claramente na imagem, via interpretação visual e por coincidência, as marcas da enchente deixadas nas margens dos principais rios da bacia do rio Paraitinga. Ao observar-se a imagem tinha-se a impressão de que a maior parte da enchente teria vindo do rio Jacui, um dos principais afluentes do rio Paraitinga a montante da área urbana de São Luis do Paraitinga. A partir dessa observação preliminar decidiu-se investigar mais profundamente os dados orbitais disponíveis com o objetivo de responder a seguinte questão: as marcas deixadas pela enchente na imagem Landsat obtida cerca de 40 dias após o evento de São Luis do Paraitinga, fornecem subsídios significativos para compreender a intensidade e localização das chuvas torrenciais deste evento catastrófico?

Para responder a essa questão formulou-se um estudo com o objetivo de avaliar a relevância dos dados orbitais disponíveis (multiespectral e radar) na geração de informações quantitativas que permitam estimar a dimensão e distribuição das chuvas que ocasionaram a enchente de São Luis do Paraitinga em janeiro de 2010.

2. Material e Métodos

Para o desenvolvimento desta pesquisa foram utilizadas imagens orbitais do sensor Landsat TM (Órbita/Ponto 218/076) e do SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*), por sua vez reprocessadas pelo Projeto TOPODATA do Instituto Nacional e Pesquisas Espaciais (INPE). A pesquisa foi desenvolvida tendo como objeto a bacia hidrográfica do rio Paraitinga com área aproximada de 2.685 km² e localizado na margem ocidental da Serra do Mar em seu trecho no Estado de São Paulo. A área abrangeu o intervalo de coordenadas geográficas entre 22° 29' e 23° 09' de latitude sul e 44° 22' e 45° 25' de longitude oeste.

2.1. Mapeamento de uso e cobertura do solo e das áreas de inundação

O primeiro passo dessa pesquisa foi realizar um mapeamento atualizado das principais classes de uso e cobertura do solo presentes na área da bacia. Para isso foi realizada uma classificação supervisionada sobre a imagem Landsat 5 TM obtida no dia 06 de fevereiro de 2010 utilizando as bandas 3, 4 e 5. Para a realização dessa classificação foram coletadas amostras de treinamento para as classes Pasto, Urbana, Regeneração/Cultivo,

Reflorestamento, Mata e Água. A classificação foi implementada utilizando o programa SPRING versão 4.3 com o classificador MaxVer (Máxima Verossimilhança).

O segundo passo foi realizar, sobre as mesmas bandas da imagem Landsat, um processo de classificação que permitisse identificar as áreas que sofreram a ação da enchente no início de janeiro do mesmo ano. Para isso foi utilizada a ferramenta de classificação por Árvore de Decisão (*Decision Tree*) do programa ENVI versão 4.5. Inicialmente, foi realizada uma análise dos valores numéricos em cada uma das três bandas espectrais que melhor representassem as áreas inundadas. Os intervalos definidos para cada banda, aplicados ao modelo, foram: vermelho (banda 3) de 20 a 60; infravermelho próximo (banda 4) de 8 a 80; e infravermelho médio (banda 5) de 6 a 160. O produto da classificação em formato *raster* foi convertido para vetorial no mesmo programa para os procedimentos de pós-classificação. Os polígonos em formato *shapefile* foram editados no programa Quantum GIS Enceladus para permanência apenas das áreas de inundação próximas às margens dos principais rios tendo-se a malha hidrográfica do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) na escala 1:50.000 e a imagem Landsat como planos de informação de apoio à edição.

2.2. Levantamento dos perfis das áreas inundadas

Para a obtenção das altitudes do espelho d'água dos rios e das margens das áreas inundadas foi gerado um Modelo Digital do Terreno (MDT) pela geração de um mosaico equalizado das imagens correspondentes à quatro quadrantes (22_45_ZN, 23_45_ZN, 22_465_ZN e 23_465_ZN) obtidos do Projeto TOPODATA, descrito em Valeriano e Rosseti (2008), utilizando o programa ENVI versão 4.3. Uma vez gerado o mosaico, a imagem foi recortada utilizando como plano de corte o limite da bacia do rio Paraitinga, em formato vetorial, disponível de pesquisa anterior (Dias et al., 2005).

O MDT recortado foi utilizado para retirada das informações das altitudes dos perfis. Os perfis foram coletados a partir da confluência do rio do Chapéu com o rio Paraitinga a cada trecho de 1.000 metros ao longo do canal do rio Paraitinga e, a partir da confluência com o rio Jacui, em trechos de mesma distância ao longo dos dois canais. No total foram coletados 72 perfis, sendo 52 entre as confluências com o rio do Chapéu e o rio Jacui e 10 em cada trecho a montante da segunda confluência.

2.3. Análise dos perfis

Os produtos finais desta pesquisa foram gerados a partir da análise estatística das altitudes das duas margens e do canal central dos rios. Os valores de cada margem e do canal foram analisadas em separado aplicando-se a análise de regressão linear a fim de ajustar os valores medidos em cada perfil a uma linha que melhor represente a declividade natural do rio ao longo de seu curso.

Os valores coletados nos perfis foram compilados em uma planilha eletrônica para o desenvolvimento das análises estatísticas.

3. Resultados e Discussão

A distribuição das áreas de inundação identificadas sobre a imagem Landsat TM, convertidas para o formato vetorial sobrepostas ao MDT gerado a partir de dados do TOPODATA é apresentada na Figura 1. O detalhe na figura mostra a abrangência da inundação nas proximidades da confluência dos rios Paraitinga e Jacui. Pode-se notar que as áreas sobre o rio Jacui apresentam porções com larguras significativamente maiores que o rio Paraitinga a montante da confluência. Essa constatação é coerente com a primeira impressão tida ao se observar a imagem Landsat original. Por isso, a primeira impressão era de que o volume de água que teria vazado pelo canal do Jacui seria maior que o volume do rio Paraitinga. O que levou a inferir, inicialmente, que a chuva mais intensa que causou a

enchente em São Luis do Paraitinga teria caído sobre a sub-bacia do Jacui e não na porção superior da bacia do Paraitinga. Pode-se notar também, na imagem superior da mesma figura, que a largura da área de inundação aumenta significativamente a partir da confluência desses dois rios até o exutório do rio Paraitinga no lago da represa de Paraibuna (final das áreas de inundação em amarelo na porção sudoeste da imagem).

As medidas de elevação (ou altitude) das margens esquerda e direita bem como do canal do rio Paraitinga, desde a confluência com o rio do Chapéu até a confluência com o rio Jacui, são apresentadas na Figura 2. Pode-se notar nessa figura que as três medidas mostram-se com variação menor à medida que se segue em direção a montante do rio a partir do ponto inicial. Da mesma forma, as variações nas medidas das margens mostraram-se maiores que as medidas do canal. Observou-se, durante a coleta dessas medidas, que existiam variações bruscas nos valores de altitude entre pixels próximos e até mesmo vizinhos no MDT. Essas variações podem ser indicações de inconsistências nos valores interpolados por krigagem na geração dos produtos do Projeto TOPODATA. No sentido de adotar uma estratégia consistente para obtenção das medidas procurou-se tomar o valor mais alto dentre os pixels das margens que se localizavam próximos ao eixo do perfil. Se por um lado esta estratégia possa ter exacerbado as variações entre valores de perfis próximos, por outro reduziu o grau de subjetividade na escolha do pixel que deveria representar a elevação da marca de cheia no respectivo perfil.

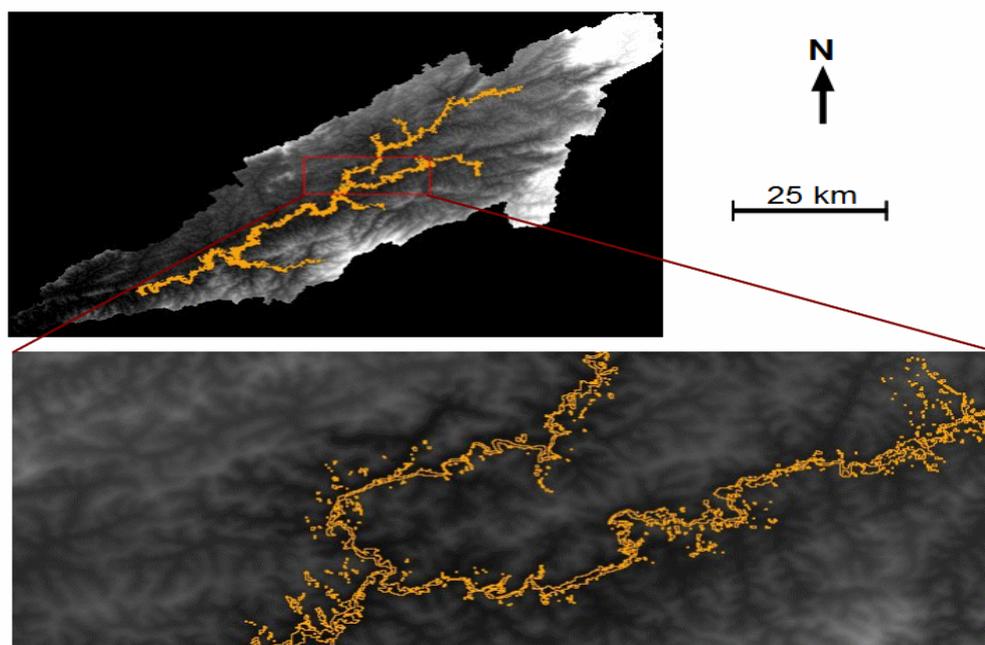


Figura 1. Mapa ilustrando as áreas de inundação (em amarelo) sobre a MDT (superior) e detalhe do retângulo vermelho mostrando a área de inundação próxima à confluência dos rios Paraitinga e Jacui.

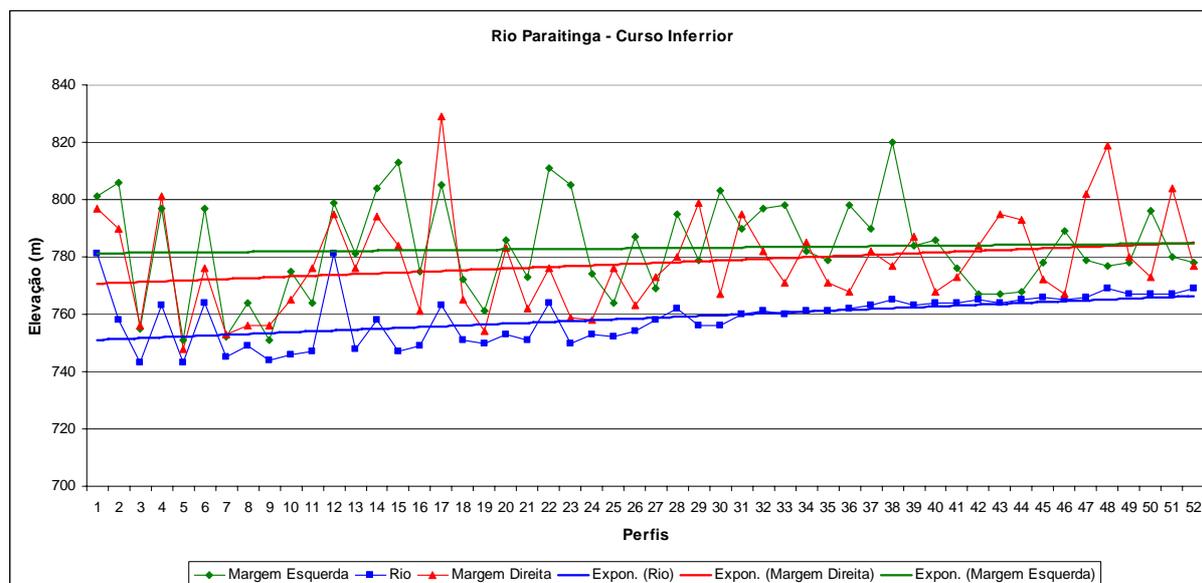


Figura 2. Valores das elevações (ou altitudes) dos pontos referentes à margem esquerda, margem direita e canal do rio em cada perfil do trecho do rio Paraitinga entre as confluências com rio do Chapéu e com o rio Jacuí. Além da curva de regressão linear correspondente a cada um.

As linhas que representam o resultado das regressões lineares do três conjuntos de dados (apesar de apresentarem valores de r^2 baixos em função da grande variação nos dados), permitem observar que a margem esquerda (verde) tende a apresentar elevações maiores que a margem direita a qual, por sua vez, tende a acompanhar melhor a declividade do rio. Para se determinar a altura média da cheia nesse trecho do rio, subtraiu-se da elevação média entre as duas margens a elevação do canal para todos os 52 perfis. Dessa análise obteve-se que altura média da enchente foi de 22 m com desvio padrão de 10,8 m. Para a margem esquerda a elevação média foi de 783 m com desvio padrão de 16,8 m, Para a margem direita a elevação média foi de 778 m e desvio padrão de 17 m. E para o canal do rio a elevação média foi de 758 m e desvio padrão de 8,8 m. Considerando a elevação do canal do rio nas duas confluências e a extensão aproximada de 52 km entre os dois pontos, pode-se afirmar que a declividade do canal neste trecho é de 0,05%.

As medidas de elevação das margens e do canal do rio Paraitinga a montante da confluência com o rio Jacuí são apresentadas na Figura 3. Nesses trechos de 10 km a montante da confluência, em cada rio, nota-se que as três medidas também apresentam variações expressivas nas duas margens e menor variação no canal dos rios. Como mencionado acima, foram observadas variações bruscas nos valores de altitude entre pixels próximos e até mesmo vizinhos no MDT durante a obtenção das medidas, as quais podem indicar a existência de inconsistências nos valores interpolados por krigagem para geração de uma grade com maior resolução espacial (30 metros) do Projeto TOPODATA a partir dos dados originais com resolução menor (100 metros) gerados pelo SRTM. Para estes dois trechos de rio foi adotada a mesma estratégia para obtenção das medidas tomando-se o valor maior dentre os pixels das margens que se localizavam próximos ao eixo do perfil.

Da mesma forma que a Figura 2, a Figura 3 apresenta linhas retas que representam o resultado das regressões lineares do três conjuntos de dados, os quais apresentam valores relativamente maiores de r^2 do que o trecho anterior, a saber: 0,54 e 0,41 para o canal dos rios Piratininga e Jacuí, respectivamente; e 0,39 e 0,60 para a margem esquerda dos mesmos dois trechos. Ao determinar-se a altura média da cheia nesses dois trechos dos rios tomou-se as médias das medidas das margens e do canal dos rios para os 10 perfis obtidos de cada um. Os

valores obtidos dessa análise foram 34 m com desvio padrão de 13,7 m para o trecho do rio Paraitinga e 25 m com desvio padrão de 12,7 m para o trecho do rio Jacuí. A margem esquerda do rio Paraitinga apresentou elevação média de 817 m com desvio padrão de 18,3 m e a margem direita apresentou elevação média foi de 807 m com desvio padrão de 13,1 m. Já para o trechos do rio Jacuí, a margem esquerda apresentou elevação média de 807 m com desvio padrão de 12,1 m e a margem direita apresentou elevação média de 801 m com desvio padrão de 24,1 m. Já o canal dos dois rios apresentaram elevação média de 778 m e desvio padrão de 6,6 m para o Paraitinga e 779 m com desvio padrão 5,2 m para o rio Jacuí. Nesses dois trechos (de 10 km de extensão) a declividade média do canal foi calculada em 0,12% e 0,17% para o Paraitinga e Jacuí, respectivamente.

Com base nesses valores, podemos afirmar que o trecho do rio Paraitinga, por apresentar maior altura de cheia e menor declividade, deve ter seu canal mais encaixado na topografia e, por isso, não deixou marcas tão acentuadas na imagem Landsat como o que aconteceu no trecho do rio Jacuí. Este último, por sua vez, deve ter planícies de inundação mais largas e por isso deixou marcas mais acentuadas na imagem. Com isso não se pode dizer que a intensidade da chuva tenha sido mais forte sobre a sub-bacia do rio Jacuí do que na porção superior do rio Paraitinga, como inferido inicialmente. O mais provável é que ambas porções da bacia tenham recebido volumes semelhantes de chuva e ambas contribuíram equivalentemente para a enchente de São Luis do Paraitinga.

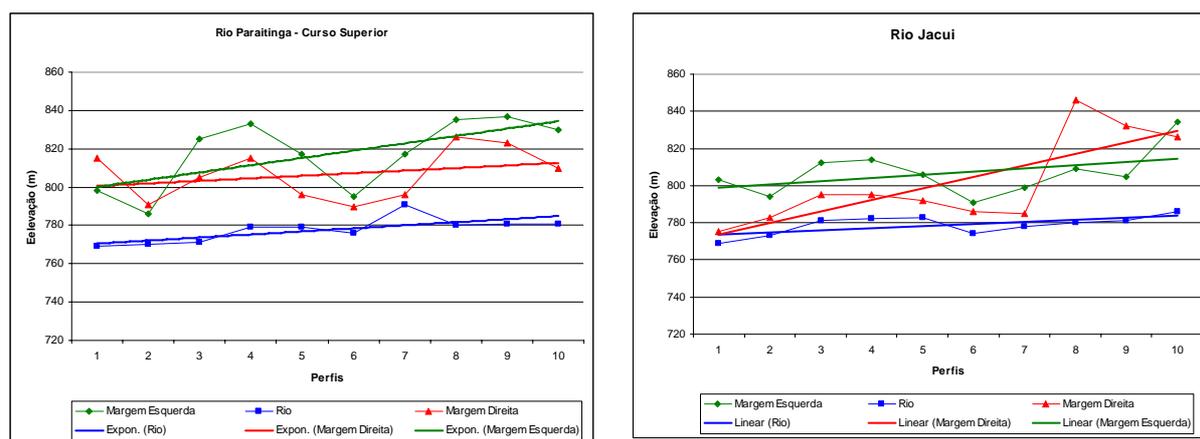


Figura 3. Valores das elevações (ou altitudes) dos pontos referentes à margem esquerda, margem direita e canal do rio em cada perfil do trecho dos rios Paraitinga (esquerda) e Jacuí (direita) a montante da confluência dos dois. Além da curva de regressão linear correspondente a cada trecho.

As características de uso e cobertura do solo da bacia do rio Paraitinga são apresentadas na Tabela 1. As classes Pasto e Regeneração/Cultivo, juntas, somam 66% da área total da bacia. As áreas de mata, apesar de apresentarem um percentual significativo (quase 26%), são formadas por fragmentos dispersos por grande parte da área da bacia, o que, além de inviabilizar a preservação da biodiversidade, impede que a vegetação mais robusta minimize os efeitos das chuvas aumentando o escoamento superficial. Portanto, a combinação de cobertura do solo pouco eficiente na retenção da água da chuva no solo e com relevo bastante acidentado (o chamado “mar de morros”) torna-se um fator de risco elevado para a ocorrência de enchentes na região associadas a chuvas torrenciais típicas dos meses de verão.

Tabela 1. Área total de cada classe de uso e cobertura do solo na bacia do rio Paraitinga com respectiva percentagem.

Classe	Area (km ²)	Percentagem
Pasto	932,6	34,7
Urbana	28,0	1,0
Regeneração/Cultivo	842,3	31,4
Eucalipto	188,5	7,0
Mata	690,2	25,7
Água	2,8	0,1

4. Conclusões

Os resultados desta pesquisa demonstraram o grau de efetividade no uso de dados de altitude derivados de MDT gerados a partir de dados orbitais na determinação da extensão de uma enchente delimitada pelas marcas deixadas na paisagem por meio da classificação de dados multiespectrais também obtidos de plataforma orbital.

Apesar de se reconhecer que uma análise da altura de uma cheia, bem como outros atributos importantes tais como volume e vazão de cheia, necessita de dados de elevada precisão topográfica e cartográfica normalmente obtidos por levantamentos de campo utilizando teodolito ou GPS geodésico, os resultados obtidos demonstram, também, uma forma de se avaliar a extensão de uma enchente de forma relativamente rápida em função da visão sinóptica dos dados de sensoriamento remoto.

Entretanto, a disponibilidade de dados no formato de MDT com maior consistência e resolução espacial permitiria desenvolver aplicações muito mais acuradas e representativas da realidade que os dados orbitais procuram representar.

Referências Bibliográficas

- Ab'Saber, A.N. Os **Domínio de Natureza no Brasil: Potencialidades Paisagísticas**. Ateliê Editorial, São Paulo, 152 p., 2003.
- Benassi, S. F., Tonin, L., Marenha, L. D., Fontes Júnior, H. M., Teixeira, P. H. Temporal analyses of sediment discharge into the Itaipu Reservoir basin by means of automatic monitoring. In: Symposium on Sediment Budgets, **Anais...** Foz do Iguaçu, IAHS, 2005.
- Castro, C. B., Mendonça, A. S. F. Impactos de ações antrópicas em bacias de manancial rurais de montanha sobre parâmetros de qualidade de água. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, 9 (1), p. 17-26, 2004.
- Dias, N. W., Batista, G. T., Targa, M. S., Catelani, C. S. Análise da carga de sedimentos da represa de Paraibuna com base em dados multiespectrais. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, **Anais...**, João Pessoa, ABRH, 2005.
- Dill, P. R. J., Paiva, E. M. C. D., Paiva, J. B. D. A. Assoreamento do reservatório de Vacacaí Mirim / Santa Maria e sua relação com a deteriorização da bacia hidrográfica contribuinte. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, 9 (1), p. 7-15, 2004.
- Gerbelli, L. G. **Aos poucos, Paraitinga reconstrói patrimônio**. Estadão. Disponível em: <http://www.estadao.com.br/estadaodehoje/20101017/hot_imp625766,0.php>. 17/10/2010. Acesso em: 5 nov. 2010.

Marra, L. **Chuva isola São Luis do Paraitinga (SP) e deixa quase toda a população fora de casa.** Folhaonline. Disponível em: <<http://www1.folha.uol.com.br/folha/cotidiano/ult95u673855.shtml>>. 02/01/2010. Acesso em: 5 nov. 2010.

Ranzini, M., Righeto, A M., Guandique, M. E. G., Moraes, J. M., Arcova, F. C., Cicco, V. Modelagem hidrológica de uma bacia hidrográfica na Serra do Mar, SP. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, 9 (4), p. 33-44, 2004.

Valeriano, M. M. e Rosseti, D. F. TOPODATA: **Seleção de Coeficientes Geostísticos para o Refinamento Unificado de Dados SRTM.** INPE, São José dos Campos, 50 p., 2008.