

# Modelos de Elevação do Parque Estadual do Peruaçu - MG, Requisitos e Qualidade Geométrica Necessária para Aplicações em Geomorfologia

Marcos Antônio Timbó Elmiro  
Hercules Elias Gonçalves Xavier de Lira  
Philippe Maillard  
Luciano Vieira Dutra  
Sérgio Donizete Faria

Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG/IGC  
Avenida Antônio Carlos, 6627 – 31270-901 – Belo Horizonte – MG  
[mtimbo@ufmg.br](mailto:mtimbo@ufmg.br), [hegxl@yahoo.com.br](mailto:hegxl@yahoo.com.br), [philippe@ufmg.br](mailto:philippe@ufmg.br), [dutra@dpi.inpe.br](mailto:dutra@dpi.inpe.br)

**Abstract.** Digital elevation models (DEM) are numerical representation of terrain elevation used in a wide range of spatial analysis applications. DEM derived analyses for use in geomorphology studies are increasing in very significant rates. As DEM applications in geomorphology studies are becoming widespread, so does concern about the quality of the available elevation data and the propagation of errors through the analysis. However, available DEM frequently report only scarce information about their geometric quality. The geometric quality information presented in many DEM, if available, is limited to the average of errors as the root mean square error (RMSE), which does not provide information on the spatial patterns of the DEM errors. This paper presents a methodology of DEM evaluation that provides calculation of global and local quality of two available DEM that cover Peruaçu State Reservation in Minas Gerais, Brazil. The tested DEM were produced by ASTER sensor and SRTM NASA mission. Results demonstrated that DEM generated by different methods have also different spatial accuracies, globally and locally. DEM quality parameters should be adequately characterized in order to permit evaluation of error propagation in derived geomorphologic analyses.

**Key-words:** terrain error evaluation, digital elevation model, spatial analysis.

**Resumo.** Modelos digitais de elevação (MDE) são representações numéricas da superfície do terreno utilizadas em diversas aplicações de análises espaciais em diferentes áreas de pesquisas. As análises derivadas desses modelos para uso em estudos de geomorfologia estão crescendo de forma rápida e consistente. A qualidade geométrica de um MDE influencia muito no resultado das análises derivadas do modelo para extração dos parâmetros e atributos topográficos que compõem estudos geomorfológicos. Infelizmente, os MDE existentes não fornecem informações adequadas sobre suas qualidades ou defeitos. Este trabalho apresenta um método de avaliação que permite a determinação da qualidade global e local de dois MDE disponíveis que cobrem a região do Parque Estadual do Peruaçu em Minas Gerais. Os modelos foram produzidos pelo sensor ASTER e pela missão SRTM da NASA. Os resultados mostraram que os MDE produzidos por diferentes métodos apresentam também diferentes qualidades em termos de precisão e exatidão global e local. Os erros de MDE existentes devem ser adequadamente caracterizados para permitir ao analista de processos geomorfológicos fazer estimativas da propagação dos erros nos produtos derivados de análises de MDE.

**Palavras-chave:** avaliação de erros do terreno, modelo digital de terreno, análise espacial.

## 1. Introdução

A Topografia da superfície terrestre controla o fluxo da energia, a distribuição dos nutrientes, o movimento das massas e a dispersão da água na grande maioria das paisagens.

Além disso, as características da superfície topográfica têm sido fatores importantes para exploração de possibilidades alternativas e para o fornecimento de elementos técnicos nas decisões e intervenções no ambiente. Esses aspectos têm gerado demandas por dados topográficos e por métodos que forneçam informações tridimensionais do terreno para subsidiar o estudo de processos da paisagem distribuídos no espaço geográfico, principalmente nos estudos relacionados à geomorfologia. Os modelos digitais de elevação (MDE) são dados topográficos que têm sido muito utilizados em aplicações de análises espaciais envolvendo estudos em diferentes áreas das ciências da Terra. Seu uso nas aplicações e estudos relacionados à geomorfologia tem crescido continuamente. A medida que essas aplicações ficam mais difundidas, cresce também a preocupação com a qualidade dos dados de elevação e com a propagação dos erros nas análises extraídas dos MDE para uso nos estudos geomorfológicos. Erros presentes nos MDE afetam significativamente os resultados das análises derivadas (Heuvelink, 1998). O problema maior é que os modelos de elevação disponíveis, quando muito, relatam somente o valor médio dos erros, tal como o erro médio quadrático, que não fornece informação de tendências ou padrões espaciais da distribuição dos erros no MDE nem dos seus comportamentos locais (Albani e Klinkenberg, 2003). Este trabalho apresenta um método de avaliação de MDE que fornece a qualidade local e global de dois modelos disponíveis provenientes de diferentes fontes que cobrem a região do parque estadual do Peruaçu. Os MDE analisados no trabalho foram obtidos pelo sensor ASTER e pela missão SRTM da NASA. Modelos produzidos por diferentes processos possuem, também, qualidades diferentes em termos de erros, o que afeta os resultados dos parâmetros geomorfológicos extraídos, tais como declividades, concavidades, convexidades, linhas e pontos de máximos e mínimos do terreno, e muitos outros atributos. Esses erros, que afetam com frequência quaisquer tipos de modelos disponíveis, são geralmente decorrentes de diferentes fatores relacionados ao processo de formação do MDE, como a geometria de imageamento do sensor, o processamento dos dados e a topografia do terreno imageado. As referências cartográficas usadas na avaliação consistem de uma estrutura de pontos de controle obtidos através de mapas topográficos com precisão e localizações adequadas. O método de avaliação apresentado no trabalho forneceu indicadores da qualidade global e local dos modelos e os resultados mostraram estimativas numéricas confiáveis da precisão dos modelos disponíveis.

## 2. Caracterização da área de estudo

A área de estudo é parte do Parque Estadual Veredas do Peruaçu no Estado de Minas Gerais e está limitada pelas seguintes coordenadas geográficas: latitudes de  $15,00305931^{\circ}$  S a  $15,21226061^{\circ}$  S e longitudes de  $44,41997059^{\circ}$  W a  $44,92003719^{\circ}$  W. O Parque Veredas do Peruaçu abrange aspectos muito relevantes do cerrado brasileiro, sendo composto por camadas de arenito sobre carbonatos do proterozóico superior e tendo topografia bastante plana de formato tabular. O clima predominante é o semi-árido, com temperaturas médias superiores a 25 graus Celsius. O Rio Peruaçu que é afluente da margem esquerda do Rio São Francisco atravessa o Parque. A vegetação predominante é o cerrado, no entanto são encontrados corredores de veredas, determinados pela disponibilidade hídrica. As veredas são caracterizadas por diferentes estratos vegetais, variando entre campos gramíneos e estratos arbóreos. A Figura 1 ilustra uma composição colorida de imagens LANDSAT que fornece uma visão geral da área de estudo situada no parque do Peruaçu.



Figura 1 – Composição colorida de imagens LANDSAT da área de estudo.

## 3. Materiais e métodos

### 3.1. Modelos de teste e pontos de controle

Os dados de altimetria dos dois tipos de MDE utilizados, ASTER e SRTM, estão disponibilizados na forma de imagens de superfícies em formato de grade regular (2.5D) com células de 30x30 metros. Este formato de dados representa diretamente a estrutura tridimensional da cena imageada. O ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) é um instrumento sensor carregado a bordo do satélite Terra, lançado pela NASA em dezembro de 1999. Pode obter imagens em 14 bandas espectrais que variam desde o espectro visível ao infravermelho termal e possui o recurso de visada inclinada na mesma órbita que permite obter imagens estereoscópicas na banda 3, situada na região do

infravermelho próximo. A configuração em estéreo é possibilitada através da obtenção de uma imagem da banda 3 em visada vertical, *nadir* (3N), e outra imagem em visada a retaguarda, *backward* (3B). O início da aquisição da imagem 3B ocorre 55 segundos após o término da aquisição da imagem 3N. Considerando a curvatura da Terra, o ângulo entre as imagens 3N e 3B é de 27,6°, permitindo uma boa formação de pares estereoscópicos para geração do MDE (Gonzáles, 2005).

O MDE SRTM foi obtido da missão *Shuttle Radar Topography Mission* da NASA que disponibiliza gratuitamente dados de elevação globais do planeta obtidos através do método de interferometria de imagens de radar de abertura sintética (InSAR), constituindo a base de dados topográfica digital mais completa da Terra, já feita até agora, entre 60° de latitude norte e 56° de latitude sul. O SRTM é um sistema de radar especialmente modificado que voou a bordo do ônibus espacial *Endeavour* durante uma missão de 11 dias em fevereiro de 2000 (Senus, 2000). O sistema radar usado na missão SRTM foi composto por dois conjuntos de antenas, em banda C e banda X, instalados no corpo principal da espaçonave e na extremidade de um mastro telescópico de 60 metros de extensão. Neste trabalho estão sendo utilizados os dados de interferometria da banda C com resolução de 3 segundos de arco reamostrados para uma grade regular de 30 metros. A posição e orientação das antenas, necessários para interferometria, foi garantida por diversos instrumentos de forma a atingir os requisitos de 10 metros para precisão relativa vertical e 15 metros para precisão relativa horizontal nos MDE resultantes. Os produtos de mapeamento topográficos digitais obtidos pelo projeto SRTM estão de acordo com as especificações para dados de alturas interferométricas do terreno: na amostragem espacial de 30 x 30 m, a exatidão da altura vertical absoluta é de 16 metros e a exatidão horizontal absoluta (erro circular de 90%) é de 20 metros (Sun et al, 2003).

Os dados da estrutura de pontos de controle foram extraídos de documentos cartográficos certificados. Perfazem um total de 158 pontos para avaliação do MDE ASTER e 165 pontos para avaliação do MDE SRTM. São pontos cotados obtidos em áreas adequadas, coincidentes com locais de cotas comprovadas, referências de níveis e vértices de triangulação, os quais constituem a estrutura fundamental de controle cartográfico de onde foram extraídas todas as medidas para avaliação dos modelos de elevação. A Figura 2 mostra o MDE ASTER, a esquerda, com a localização dos pontos de controle em destaque na cor vermelha e o MDE SRTM, a direita, com a localização dos pontos de controle na cor amarela.

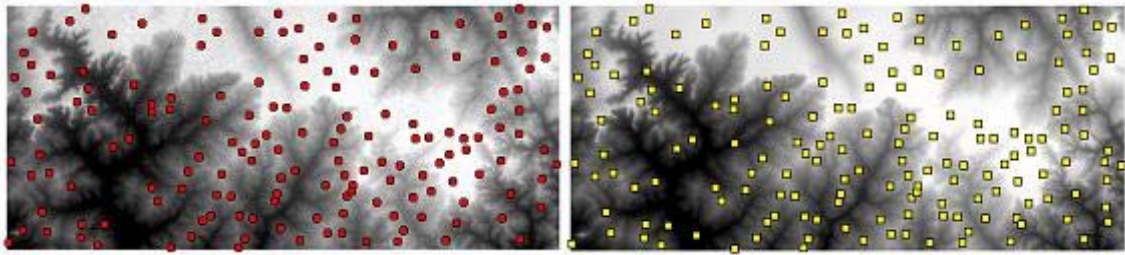


Figura 2 – MDE ASTER, a esquerda, e MDE SRTM, a direita, com os pontos de controle.

### 3.2. Avaliação global dos modelos de elevação

Erros globais são aqueles que afetam a exatidão absoluta e geral do MDE em toda a sua extensão geográfica e que irão resultar na incerteza geral da posição de um ponto qualquer, em relação a sua posição real na superfície da Terra. Esses erros são caracterizados na forma de erro linear no nível de confiança de 90% ou 95%, fornecidos pela estatística da raiz do erro médio quadrático (RMSE) ou do erro médio absoluto (MAE). Estatísticas de RMSE são essencialmente um desvio padrão e, assim, são baseadas na suposição que os erros no MDE são aleatórios e normalmente distribuídos (Weydahl et al., 2007). O RMSE mede a dispersão da distribuição de frequência dos desvios entre os dados de altitudes de pontos de controle e dados do MDE, sua expressão matemática é dada pela Equação 1

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^N (h_T - h_S)^2} \quad (1)$$

A expressão matemática do MAE é dada pela Equação 2

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N |h_T - h_S| \quad (2)$$

onde  $N$  é o total de pontos de controle utilizados,  $h_T$  é posição altimétrica real do ponto de controle medida por métodos confiáveis e  $h_S$  é a posição altimétrica proveniente da medida do sensor, extraída do modelo digital de elevação (Timbó Elmiro et al., 2006). Assume-se que os erros globais são validos para o modelo inteiro. A Tabela 1 apresenta o resumo dos dados estatísticos (mínimo, máximo, média, assimetria, curtose, MAE e RMSE) de qualidade global resultantes da comparação dos MDE ASTER e SRTM com os pontos da estrutura de controle.

Tabela 1 – Indicativos da qualidade global dos MDE ASTER e SRTM.

MDE	Mínimo	Máximo	Média	Assimetria	Curtose	MAE	RMSE
ASTER	-7.000	34.000	12.293	0.199	-0.675	7.715	9.410
SRTM	-22.000	18.000	-2.604	0.213	-0.567	7.179	8.867

Os valores de assimetria e curtose indicam uma distribuição aproximadamente normal dos erros, as médias apontam o MDE ASTER deslocado para baixo e o MDE SRTM



deslocado para cima, porém mais próximo do patamar geográfico. Os estimadores de dispersão, MAE e RMSE, indicam os dois MDE com a mesma precisão global aproximada.

### 3.3. Avaliação local dos modelos de elevação

Erros locais são caracterizados por afetarem a exatidão do MDE somente em partes específicas da sua extensão geográfica e dificultam a complexidade do problema de avaliação. Uma forma comum de lidar com essa complexidade é restringir o espaço de abrangência da função de estimação, de forma que o campo de atuação da avaliação seja calculado apenas em uma pequena região em torno da vizinhança da fonte de erro. Para avaliar um MDE com diferenças geométricas locais, de forma acurada, são necessários dois requisitos principais. Primeiro, deve haver um grande número de pontos ou feições correspondentes que representem fielmente as diferenças geométricas locais entre o MDE e a realidade geográfica. Segundo, a função de avaliação deve descrever ou interpolar a correspondência dos pontos de controle e do MDE sem introduzir deformações não realísticas nas áreas onde não há pontos de correspondência. A Figura 3 mostra os erros locais, resultantes da comparação dos MDE com os pontos de controle. Acima o MDE ASTER e abaixo o SRTM. Os símbolos de representação são proporcionais à magnitude dos erros.

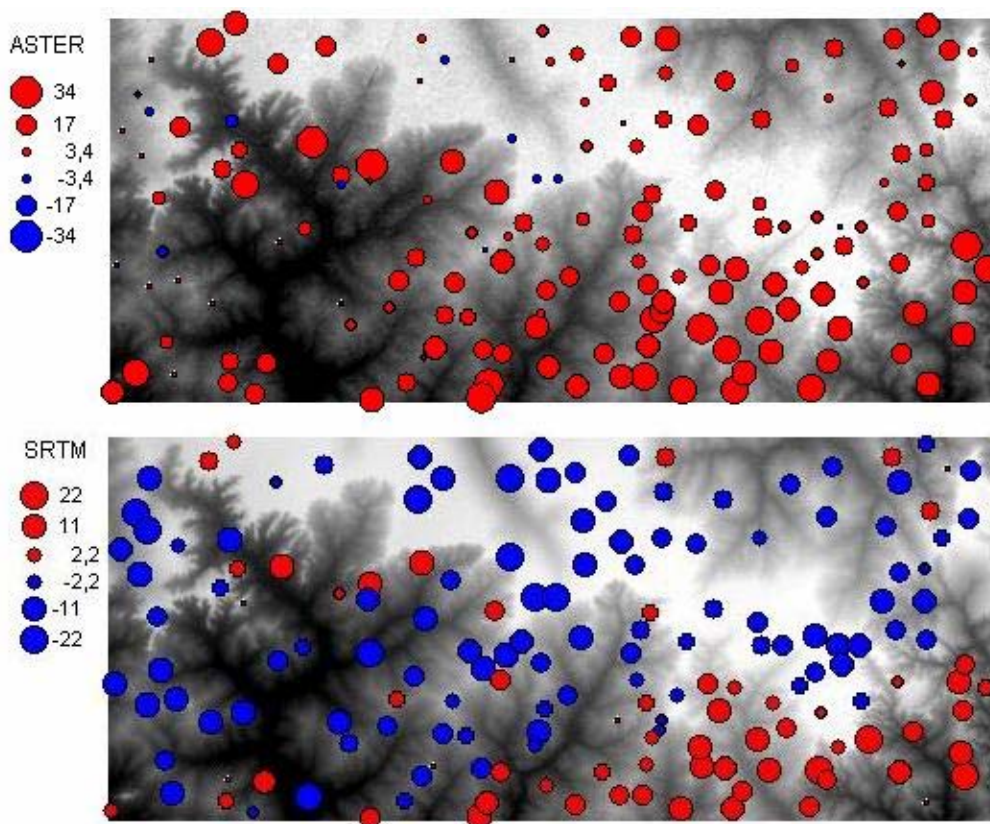


Figura 3 – Erros locais no MDE ASTER, parte superior, e no MDE SRTM, parte inferior.

A caracterização completa dos erros locais de um MDE pode ser representada por uma superfície contínua, na base de pixel a pixel, contendo o valor da incerteza local em cada célula do MDE (ver Figura 4). Essa superfície pode ser gerada a partir da interpolação dos erros pontuais em vários locais de teste espalhados no MDE (Timbó Elmiro et al., 2007).

#### **4. Análise de resultados**

A avaliação dos resultados foi feita com base nas estatísticas numéricas realizadas com os dados de teste mostradas na Tabela 1 (mínimos, máximos, média, MAE e RMSE) e nos resultados mostrados nas Figuras 3 e 4. A análise geral permite inferir que não houve variações exageradas nas medidas estatísticas da Tabela 1, confirmando bons resultados numéricos globais para ambos os MDE, compatíveis com estudos em escalas da ordem de 1:50.000 e menores. Os erros globais estão relacionados à exatidão vertical geral dos MDE e representam a incerteza na altitude de um ponto causada por erros aleatórios e sistemáticos não corrigidos. A medida global utilizada foi a Raiz do Erro Médio Quadrático (EMQ), também chamada *Root Mean Squared Error* (RMSE), obtida através da comparação dos pontos de controle com seus correspondentes localizados nos modelos digitais de elevação, calculando-se as diferenças. O RMSE (desvio padrão) foi considerado como fator de maior peso para avaliação global, mas utilizou-se também o MAE, os máximos e os mínimos como fatores de pesos secundários. Assim, pela análise dos parâmetros numéricos da Tabela 1, concluiu-se que os modelos apresentaram resultados globais muito similares com ligeira superioridade do SRTM em relação ao ASTER.

Os erros locais estão relacionados com a exatidão vertical relativa do MDE e, neste trabalho, foram calculados pela estimação dos resíduos dos pontos de controle em relação aos seus correspondentes no MDE. A partir dos resíduos foi criado um mapa de erros para cada modelo de elevação, ou seja, uma superfície contínua caracterizando a precisão de cada MDE ponto a ponto através do valor de erro associado a cada célula do modelo. Os mapas de precisão para cada modelo foram criados através da interpolação dos resíduos nos pontos de controle, gerando-se uma grade de erros na mesma resolução dos MDE. O método de interpolação utilizado para criar a superfície representativa do mapa de precisão foi a triangulação de Delaunay com interpolação linear. Maiores detalhes desse método podem ser encontrados em Timbó Elmiro et al. (2007). A Figura 4 mostra os mapas de precisão obtidos para o MDE ASTER, a esquerda, e SRTM, a direita, com sobreposição de curvas de níveis para permitir melhor visualização.

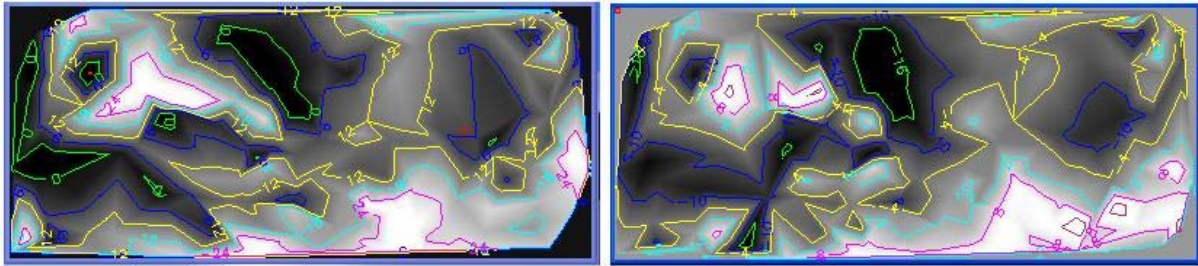


Figura 4 – Superfícies de erros locais: MDE ASTER, a esquerda, e MDE SRTM, a direita.

As Figuras 3 e 4 mostraram que apesar dos valores globais similares, os erros locais possuem distribuição espacial diferente para os dois MDE. Essa distribuição pode fornecer indicativos importantes para ponderação de atributos geomorfológicos derivados do MDE.

## 5. Conclusões e considerações

Modelos digitais de elevação, assim como as demais técnicas de representação de dados geográficos, são modelos que se afastam da realidade. As variadas aplicações de análises de terreno para estudos de geomorfologia têm demonstrado que os MDE são muito promissores e eficazes na produção de resultados, enfatizando a importância de mensurar e compreender os impactos da qualidade dos dados digitais de elevação na modelagem de processos e recursos geomorfológicos. A aplicação da metodologia do trabalho obedeceu a passos consistentes que produziram resultados de qualidades globais e locais determinados numericamente através de análises teóricas e modelos matemáticos. Os resultados revelaram que os dados de altimetria dos MDE da área de estudo produzidos pelo sensor ASTER e pela missão SRTM necessitam de avaliações, quanto aos erros geométricos, antes de serem utilizados em quaisquer outras aplicações. Essa conclusão foi confirmada para o caso particular da área de estudo, mas, possivelmente, se aplica aos casos gerais. A aplicação do método forneceu estimativas numéricas confiáveis de exatidão global e local dos MDE, que podem ser usadas pelos analistas de dados espaciais e de processos geomorfológicos para estimar quantitativamente, com apoio de bases matemáticas consistentes, os efeitos da propagação de erros nos produtos derivados de análises de MDE.

As estimativas de erros globais e locais encontradas mostram que os MDE ASTER e SRTM testados possuem, em geral, boa qualidade geométrica compatível com estudos de escala 1:50.000 e menores, no entanto, há presença de erros locais espacialmente distribuídos que precisam ser caracterizados. A resolução espacial, a precisão, a exatidão e a distribuição dos erros no MDE devem ser testadas e especificadas anteriormente a qualquer



tipo de análise de terreno para extração de informações. Os métodos aplicados forneceram meios eficazes para caracterizar explicitamente erros dos MDE que não foram documentados previamente e as aplicações subseqüentes para estudos de geomorfologia tais como a extração de declividades, concavidades, convexidades, hidrografia, linhas e pontos de máximos e mínimos do terreno, etc. podem contar com esta certificação de qualidade.

## **Referências**

- Albani, M.; Klinkenberg, B. (2003) A Spatial Filter for the Removal of Striping Artifacts in Digital Elevation Models. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 69, n. 7, p. 755–765.
- González, C. O. (2005) **Avaliação de modelos digitais de elevação gerados a partir de sensores remotos orbitais óptico (ASTER) e radar (RADARSAT-1, SRTM): um estudo para a região da Serra dos Carajás (PA)**, São José dos Campos - SP. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - INPE.
- Heuvelink, G.B.M. (1998), **Error Propagation in Environmental Modelling with GIS**, Taylor & Francis, London.
- Senus, W.J. (2000) Global Mapping Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), In: 4th Global Spatial Data Infrastructure Conference. **Proceedings**, Cape Town, South Africa.
- Sun, G. Ranson, K.J. Kharuk, V.I. Kovacs, K. (2003) Validation of surface height from shuttle radar topography mission using shuttle laser altimeter, **Remote Sensing of Environment**, v.88, p. 401–411.
- Timbó Elmiro, M. A. Dutra, L.V. Mura, J.C. Freitas, C.C. Santos, J.R. (2006) Avaliação de dados de altimetria da floresta amazônica baseados nas tecnologias INSAR, LIDAR e GPS. **Revista Brasileira de Cartografia**, 58-03, p. 233-246.
- Timbó Elmiro, M. A. Dutra, L. V. Mura, J. C. (2007) Calibration of Interferometric Synthetic Aperture Radar Digital Elevation Models (DEM) Using Error Surface Interpolation Methods, In: Eleventh URSI Commission F Triennial Open Symposium on Radio Wave Propagation and Remote Sensing, Rio de Janeiro, Brazil, 30 October to 02 November 2007, **Proceedings**. PUC-Rio, p. 163-169.
- Weydahl, D. J.; Sagstuen, J; Dick, O. B.; Ronning, H. (2007) SRTM DEM accuracy assessment over vegetated areas in Norway. **International Journal of Remote Sensing**, v.28, n.16, pp. 3513–3527.