

ANÁLISE DA QUALIDADE DE INFORMAÇÕES ALTIMÉTRICAS GERADAS PELO SISTEMA ASTER

Carlos Alberto Zocolotti Filho¹
Jorge Antonio Silva Centeno²

¹Universidade Federal do Paraná - UFPR - Departamento de Geomática – zocolotti@pop.com.br

²Universidade Federal do Paraná - UFPR - Departamento de Geomática – centeno@ufpr.br

RESUMO

Recentemente surgiu uma nova alternativa para a obtenção de modelos digitais do terreno, trata-se do sistema de sensores remotos Aster. Desenvolvido pela NASA, o sistema ASTER cobre uma região espectral larga com 14 faixas, que vão do visível à corrente térmica infravermelho com alta resolução espacial, espectral e radiométrica. Uma faixa adicional (nomeada de 3B, “para trás”), registra imagens com um ângulo de aproximadamente 27,6 graus atrasado, ou seja, para trás, produzindo um par estereoscópico para cada imagem ASTER. O princípio básico atrás da extração do Modelo Digital do Terreno (MDT) utilizando o módulo AsterDEM do *software* Envi 3.5, é o efeito da paralaxe. Uma correlação de *pixels* entre as imagens do par estereoscópico determina este deslocamento que em troca é transformado em valores de elevação. Para avaliar o potencial deste produto, foi utilizada uma imagem Aster da região de Matinhos e Guaratuba, litoral paranaense. Foi gerado o modelo da elevação digital e uma imagem ortoretificada composta pela faixa do visível e infravermelho próximo de resolução espacial de 15m. Pontos cotados para verificação, comuns na imagem e numa base cartográfica, foram observados para determinar a diferença da altitude. Também foi gerado um outro MDT, a partir de curvas de nível com 5 metros de equidistância, que foi considerado como sendo a fonte correta de dados. Foi realizada uma subtração entre os dois modelos, resultando na imagem de erros cometidos. As amostras foram classificadas segundo a característica de sua localização, como regiões planas e montanhosas.

Palavras chave: Sensoriamento, Satélite, Altimetria.

ANALYSIS OF HEIGHT INFORMATIONS´S QUALITY GENERATED BY THE SYSTEM ASTER

ABSTRACT

Recently a new alternative has appeared to obtain an digital terrain model, it is the system of ASTER remote sensor system. Developed by NASA, the ASTER system collects a spectral area it releases with 14 strips, that empty space of the visible to the current thermal infrared with high resolution space, spectral and radiometry. An additional strip (nominated of 3B, “back”), registers images with an angle of approximately 27,6 degrees put back, in other words, back, producing a estereoscopy pair for each image ASTER. The basic principle behind the extraction of the Digital Terrain Model (MDT) using the module AsterDEM of the software Envi 3.5, it is the parallaxe effec. Pixels correlation among the images of the estereoscopy pair determines this displacement that is transformed in elevation values. To evaluate the potential of this product, an ASTER image of the area of Matinhos and Guaratuba, (paranaese coast) was used. It was generated the model of the digital elevation and an image composed by the strip of the visible and close infrared of space resolution of 15m. Spot levels for verification, common in the image and in a cartographyc base, were observed to determine the difference of the height. Another MDT was also generated, starting from contours lines with 5 meters of equidistance, that it was considered as being the correct source of data. A subtraction was accomplished among the two models, resulting in the image with the mistakes. The samples were classified according to the location characteristic, as plane and mountainous areas.

Palavras chaves: Sensoring, Satellite, Height.

1 INTRODUÇÃO

Informações a respeito do relevo são de grande importância para o planejamento e a execução de obras de engenharia. Mais recentemente, métodos de restituição digital foram implementados para a restituição de fotografias aéreas, muitos baseados em correlação digital, com o intuito de reduzir a participação humana no processo de identificação de pares de feixes homólogos nas imagens digitais. Este processo automático é baseado na análise da correlação entre regiões de ambas imagens.

Os novos desenvolvimentos em sensoriamento remoto, especialmente no campo de sensores e plataformas, disponibilizam a opção de captar imagens de diferentes pontos de vista, ou seja, permitem a obtenção de pares estereoscópicos a partir do espaço. Estes dados também podem ser usados para gerar modelos tridimensionais da superfície do terreno e assim estimar a elevação dos pontos da superfície. Dentre as novas opções, estão os sistemas: SPOT, IKONOS e ASTER.

Desenvolvido pela NASA, o sistema ASTER cobre uma região espectral larga com 14 faixas, que vão do visível à faixa térmica do infravermelho com alta resolução espacial, espectral e radiométrica, e produz um par estereoscópico para cada imagem ou região imageada. Estes dados encontram-se disponíveis para fins de pesquisa e podem também ser adquiridos para a execução de projetos de engenharia.

As imagens do sistema ASTER podem ser utilizadas para gerar modelos numéricos do terreno e também mapas planimétricos, altimétricos e ortoimagens, usando o próprio modelo numérico do terreno. A questão é avaliar a qualidade altimétrica dos produtos que podem ser derivados de imagens deste satélite e sua adequação para a produção de mapas compatíveis com as especificações vigentes.

2 CORRELAÇÃO DIGITAL

O princípio da correlação digital é identificar regiões parecidas ou similares em duas imagens digitais, através da análise da correlação entre as mesmas. Quando duas regiões em um par de imagens são altamente similares, a correlação entre elas cresce. Regiões diferentes são caracterizadas por baixos coeficientes de correlação. Este princípio pode ser aplicado na localização de pontos homólogos em um par de imagens da mesma área.

Para a identificação dos pontos homólogos, deve-se ter uma matriz de amostra, obtida em uma das imagens, que será deslocada ao longo da outra imagem para localizar o ponto mais parecido com ela. Como, na prática, é possível restringir a área de busca a uma região menor na imagem, adota-se uma matriz de busca na segunda imagem, uma região menor onde se sabe que o ponto ocorre (figura 1). O processo então consiste em deslocar a matriz de amostra ao longo da matriz de busca procurando identificar o local onde ambas sejam mais parecidas, medindo sua similaridade através de parâmetros como a diferença ou a correlação entre as mesmas.

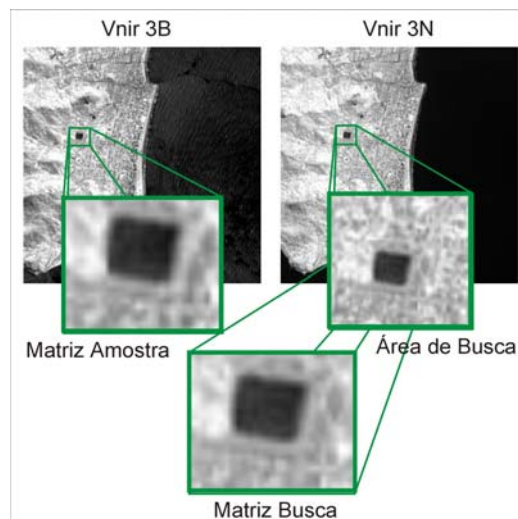


Figura 1 - exemplo de matriz de busca e amostra.

ANDRADE (1998) afirma que é possível estimar, a partir das imagens de referência, locais onde o ponto procurado provavelmente se localiza, por exemplo através da orientação relativa do par. Com isto, é possível restringir a matriz de busca. Ainda aconselha utilizar sempre uma área da imagem razoavelmente grande, devido à incerteza da localização do ponto na segunda imagem. Logo, a imagem de referência, ou matriz de amostra, é representada em geral por uma pequena matriz. A matriz de busca, ao contrário, deve ser uma matriz de maior dimensão. Outro cuidado que deve-se tomar, diz respeito a dimensão da matriz de amostra, que obrigatoriamente deve ser de ordem ímpar de tal modo que seja possível identificar a célula central.

Como a matriz de amostra é deslocada ao longo da matriz de busca, para cada posição da matriz de amostra será definida uma sub-região distinta dentro da matriz de busca, a qual é chamada de matriz candidata. A matriz candidata é aquela situada na matriz de busca, que no momento corresponde a posição da matriz de amostra. Os deslocamentos da matriz de amostra sobre a matriz de busca geram diversas matrizes candidatas.

O elemento central da matriz de amostra, representa o ponto de referência. O resultado da análise de correlação será atribuído ao correspondente ponto na matriz candidata. O processo consiste então em posicionar a matriz de amostra em todas as possíveis posições dentro da matriz de busca e calcular, a partir dos correspondentes tons de cinza de ambas as matrizes, os valores das correlações.

3.1 MÉTODOS PARA A ESTIMATIVA DA SIMILARIDADE ENTRE REGIÕES

A princípio, a similaridade entre duas regiões de mesmo tamanho pode ser medida usando diferentes valores, como a diferença simples, a diferença normalizada e a correlação. A diferença entre as matrizes pode ser calculada de uma maneira simples como:

$$DIF = \sum \sum |A(x,y) - B(x,y)| \quad (\text{eq. 1})$$

Onde A e B são a matriz de busca e a matriz de referência respectivamente e, (x,y) denota a posição do *pixel* dentro destas matrizes, em termos de coluna e linha. A diferença normalizada é dada por:

$$DIFN = \sum \sum (A(x,y) - B(x,y)) / (A(x,y) + B(x,y)) \quad (\text{eq. 2})$$

A aplicação do conceito de diferença é uma forma fácil de estimar a similaridade entre imagens, principalmente quando se trata de imagens binárias. No entanto, é sensível a variações espectrais entre as imagens e pode não ser eficiente em imagens de tons de cinza.

3.1.1 Algoritmo de Correlação Digital

No caso ideal, a componente de paralaxe, que é paralela a linha base (ao longo da linha de vôo), difere entre as duas imagens que formam o par. Então, após a orientação relativa do par, uma correlação unidimensional seria adequada e suficiente para computar a paralaxe. No caso real tem-se que esperar erros geométricos residuais na direção do rastreamento ou na direção perpendicular a ela, causada pela atitude da aeronave que muda entre as imagens do par estereoscópico (HAROLD e WELCH, 1999). Por causa disto, o algoritmo de correlação é, na prática, definido em termos bidimensionais, comparando uma matriz bidimensional extraída da primeira imagem com outra de igual dimensão extraída da segunda.

Denotando de A(i) os elementos da matriz de busca e B(i) os elementos da matriz candidata, a correlação R(A,B) entre as mesmas pode ser medida por:

$$R(A,B) = \text{Covariância}(A,B) / \sqrt{\text{var iância}(A) \cdot \text{var iância}(B)} \quad (\text{eq. 3})$$

3 DETERMINAÇÃO DO DESNÍVEL

O desnível entre os pontos homólogos é calculado a partir do valor de paralaxe, da altura média de vôo e da base das imagens, ou seja, distância entre o centro das duas imagens. Após o algoritmo de correlação determinar qual é a janela com maior correlação, a localização dos pontos homólogos, em termos de linha e coluna, em cada imagem é registrada. A diferença entre as coordenadas no eixo da linha de vôo é a paralaxe aproximada.

$$\Delta h = \frac{H \cdot \Delta p}{B} \quad (\text{eq. 4})$$

onde Δh é o desnível, H a altura média de vôo de aproximadamente 705 km sobre o equador, Δp a paralaxe e B a base fotográfica. A relação H/B é um valor constante igual a 0,6, para o sistema ASTER. Existem outros métodos descritos por HAROLD (1999), que podem ser aplicados na determinação da altitude.

4 NORMAS TÉCNICAS DE CLASSIFICAÇÃO DE ACURÁCIA

Deseja-se avaliar a qualidade das informações altimétricas de imagens Aster segundo uma referência confiável de avaliação. Segundo ANTUNES e LINGNAU (1997), um mapeamento só deve ser utilizado como fonte fiel de informações quando associados a processos de avaliação da acurácia dos dados que os compõe. Como norma nacional para a elaboração de mapas, o decreto 89.817 estabelece percentuais de erros cometidos e erros padrões para diferentes classes dentro de diferentes escalas que se deseja mapear.

Tabela 1 - Padrão De Exatidão Cartográfica

ESCALA	CLASSE	PEC			
		Planimétrico		Altimétrico	
		Carta (mm)	Terreno (mm)	Carta (Eqd)	Terreno (mm)
1:10.000	A	0,5	5,0	1*(1/2)	2,5
	B	0,8	8,0	1*(3/5)	3,0
	C	1,0	10,0	1*(3/4)	3,8
1:25.000	A	0,5	12,5	1*(1/2)	5,0
	B	0,8	20,0	1*(3/5)	6,0
	C	1,0	25,0	1*(3/4)	7,5
1:50.000	A	0,5	25,0	1*(1/2)	10,0
	B	0,8	40,0	1*(3/5)	12,0
	C	1,0	50,0	1*(3/4)	15,0
1:100.000	A	0,5	50,0	1*(1/2)	25,0
	B	0,8	80,0	1*(3/5)	30,0
	C	1,0	100,0	1*(3/4)	37,5
1:250.000	A	0,5	125,0	1*(1/2)	50,0
	B	0,8	200,0	1*(3/5)	60,0
	C	1,0	250,0	1*(3/4)	75,0

Fonte: ANTUNES e LINGNAU (1997)

Tabela 2 - Erro Padrão

ESCALA	CLASSE	ERRO PADRÃO			
		Planimétrico		Altimétrico	
		Carta (mm)	Terreno (mm)	Carta (Eqd)	Terreno (mm)
1:10.000	A	0,3	3,0	1*(1/3)	1,7
	B	0,5	5,0	1*(2/5)	2,0
	C	0,6	6,0	1*(1/2)	2,5
1:25.000	A	0,3	7,5	1*(1/3)	3,3
	B	0,5	12,5	1*(2/5)	4,0
	C	0,6	15,0	1*(1/2)	5,0
1:50.000	A	0,3	15,0	1*(1/3)	6,6
	B	0,5	25,0	1*(2/5)	8,0
	C	0,6	30,0	1*(1/2)	10,0
1:100.000	A	0,3	30,0	1*(1/3)	16,7
	B	0,5	50,0	1*(2/5)	20,0
	C	0,6	60,0	1*(1/2)	25,0
1:250.000	A	0,3	75,0	1*(1/3)	33,3
	B	0,5	125,0	1*(2/5)	40,0
	C	0,6	150,0	1*(1/2)	50,0

Fonte: ANTUNES e LINGNAU (1997)

5 MATERIAIS

Os materiais listados abaixo foram utilizados para o estudo deste trabalho.

- Imagem ASTER da região de Matinhos adquirida em 23/03/01 no Nível 1B.
- *Software* Envi 3.5 e módulo AsterDem.
- *Software* Arcview 3.2 e aplicativo 3D Analyst
- Restituição do Município de Matinhos na escala 1:2.000.

A seguir, serão apresentadas as principais características do ASTER.

6.1 IMAGENS

Desenvolvido pela NASA, o sistema ASTER cobre uma região espectral larga com 14 faixas, que vão do visível à corrente térmica infravermelho com alta resolução espacial, espectral e radiométrica. A resolução espacial varia com o comprimento de onda, conforme tabela 3. Uma faixa adicional (nomeada de 3B, "para trás") trabalha na mesma resolução espacial da faixa 3 ordinária (nomeada de 3N, "nadir") do sensor VNIR, mas a um ângulo de aproximadamente 27,6 graus atrasado, ou seja, para trás, produzindo um par estereoscópico para cada imagem ASTER. A tabela a seguir mostra o número de detectores utilizados para registrar cada banda espectral:

Tabela 3 - Número de detectores por submódulo

SUBMÓDULOS	DETECTORES
VNIR bandas 1, 2, 3N	4100
VNIR banda 3B	5000
SWIR bandas 4 à 10	2048
TIR bandas 11 à 14	10

Fonte: Hiroji Tsu. *Earth Remote Sensing Data Analysis Center* (ERSDAC)

Tabela 4 - Resolução radiométrica e espacial

SUBSISTEMA	BANDA	JANELA ESPECTRAL (μm)	RESOLUÇÃO ESPACIAL (m)
VNIR	1	0,52 - 0,60	15
	2	0,63 - 0,69	
	3	0,76 - 0,86	
SWIR	4	1,600 - 1,700	30
	5	2,145 - 2,185	
	6	2,185 - 2,225	
	7	2,235 - 2,385	
	8	2,295 - 2,365	
	9	2,360 - 2,430	
TIR	10	8,125 - 8,475	90
	11	8,475 - 8,825	
	12	8,925 - 9,275	
	13	10,25 - 10,95	
	14	10,95 - 11,65	

Fonte: Hiroji Tsu. *Earth Remote Sensing Data Analysis Center* (ERSDAC)

Segundo a NASA, o satélite que carrega os sensores ASTER tem uma variação em sua atitude, ou seja, há rotações nos três eixos do referencial da nave situado em seu centro de massa, chamados de *pitch* (rotação no eixo x), *roll* (rotação no eixo y) e *yaw* (rotação no eixo z). A tabela a seguir mostra a influência destes movimentos na imagem.

Tabela 5 - Influência da atitude durante o tempo necessário para registrar uma imagem completa

SUBSISTEMA	INFLUÊNCIA DA ATITUDE		ESTABILIDADE (R3)
	Na linha de Vôo	Transversal à Linha de Vôo	
VNIR	3 <i>pixels</i>	6 <i>pixels</i>	$\leq \pm 0,2$ <i>pixels</i>
SWIR	4,20 <i>pixels</i>	0,05 <i>pixels</i>	$\leq \pm 0,2$ <i>pixels</i>
TIR	0,05 <i>pixels</i>	0,05 <i>pixels</i>	-

Fonte: Hiroji Tsu. *Earth Remote Sensing Data Analysis Center* (ERSDAC)

O processo de aquisição das imagens é mostrado na figura 2. O satélite tem uma órbita síncrona solar adjacente descrita na tabela 6.

Tabela 6 – Características da órbita descrita pelo sistema Aster	
ÓRBITA	SÍNCRONA SOLAR ADJACENTE
Semi-eixo maior	7078 km
Excentricidade	0,0012
Inclinação	98,2° com variação de 0,15°
Ciclo	16 dias (233 revoluções)
Distância entre órbitas adjacentes	172 km
Período da Órbita	98,9 minutos
Precisão da Órbita conhecida	150m nos 3 eixos

Fonte: Hiroji Tsu. *Earth Remote Sensing Data Analysis Center (ERSDAC)*

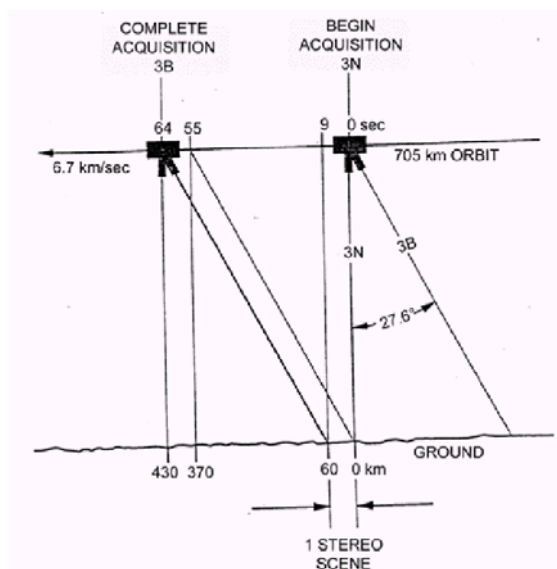


Figura 2 - esquema do processo de aquisição de imagens aster

A altitude da plataforma sobre a linha do equador é de 705 km e voa a 6.7 km/s. Nove segundos são exigidos para adquirir uma cena de 60 x 60 km e 64 segundos são exigidos para adquirir um par de estéreo.

As imagens podem ser fornecidas em dois níveis diferentes Nível 1A e 1B. Na primeira opção a imagem não tem correção radiométrica nem geométrica, ou seja, é uma imagem bruta sem processamento. As imagens que estão no nível 1B passaram por um processo de correção radiométrica e geométrica. Na aquisição destas imagens é possível escolher qual o nível desejado. Para a obtenção de MDT's a imagem deve estar no Nível 1B. Os parâmetros necessários para estas correções estão contidos no arquivo metadata em forma de linguagem de programação, que acompanha a imagem. Existem aplicativos que interpretam este arquivo e transformam imagens no Nível 1A em 1B.

7 METODOLOGIA

7.1 GERAÇÃO DO MDT POR CORRELAÇÃO DIGITAL

O modelo numérico do terreno foi gerado utilizando o módulo AsterDEM do *software* Envi 3.5. Este programa realiza correções radiométricas e geométricas em imagens ASTER, transformando arquivos no Nível 1A em Nível 1B ou simplesmente lê arquivos no Nível 1B. O programa possibilita que o usuário escolha os arquivos de entrada tanto como Nível 1A quanto 1B, o local específico da imagem que lhe interessa através de cortes visuais na imagem ou determinados por coordenadas na projeção da imagem. Possibilita também a escolha da resolução espacial do MDT a ser gerado, para as imagens no nível 1B, com três opções de resolução: 15, 30 ou 60m. Determina limites de máximo e mínimos nos valores de desnível a serem calculados e ainda a região de interesse do MDT pode ser definida por vetores. Após realizar os devidos cálculos, uma imagem monocromática com valores de desnível associados aos *pixels* é gerada em companhia de uma outra, com a representação dos valores de correlação entre as duas imagem do par estereoscópico. Ocorre uma pausa então para que o usuário decida se quer finalizar a operação ou se deseja ortorectificar as bandas Swir (1, 2 e 3) através do MDT.

A imagem, que representa uma grade regular de desníveis, necessitou ser elevada à altitude da região. Através da identificação de um ponto conhecido no MDT e outro homólogo na base cartográfica na escala 1:2.000, observou-se a diferença entre os valores de cota. Esta diferença foi somada a todos

os *pixels* da imagem, elevando-a para a altitude da região. Cada pixel tem um valor de tom de cinza, correspondente a altitude, então utilizou-se a matemática de bandas do *software* Envi para somar a diferença de cota aos *pixels*, para que posteriormente pudesse ser comparado com pontos de altitude conhecida. A base cartográfica foi sobreposta à imagem orotoretificada. As coordenadas planimétricas foram comparadas e notou-se um deslocamento uniforme da imagem. Ao invés de aplicar uma correção geométrica utilizando polinômios ou triangulações, a imagem foi simplesmente deslocada, satisfazendo a geometria da projeção.

7.2 GERAÇÃO DO MDT POR CURVAS DE NÍVEL

O *software* Envi 3.5 tem uma ferramenta especial que interpola MDT's através de curvas de nível representadas no formato DXF. Permite que o usuário defina qual será o espaçamento da grade regular ou resolução espacial do MDT. Neste caso foram utilizadas curvas de nível com equidistância de 5m e interpoladas, a partir de curvas equidistantes de 1m, para gerar uma grade regular com espaçamento de 15m. O método da triangulação foi aplicado para interpolar os valores do modelo digital do terreno.

Em um modelo de grade irregular triangular, os pontos amostras são conectados por linhas para formar triângulos. Assim os valores de cota dos vértices dos elementos triangulares da malha triangular não precisam ser estimados por interpolações.

A malha de Delaunay, mais conhecida como triangulação de Delaunay, adota critérios específicos para construção da rede triangular, podendo-se chegar a malhas únicas sobre o mesmo conjunto de amostras. O critério utilizado na triangulação de Delaunay é o de maximização dos ângulos mínimos de cada triângulo. Isto é equivalente a dizer que, a malha final, deve conter triângulos o mais próximo de equiláteros possível evitando-se a criação de triângulos afinados, ou seja, triângulos com ângulos internos muito agudos. Uma forma equivalente de se implementar a triangulação de Delaunay, utiliza o critério do circuncírculo. Esse critério, esquematizado na figura abaixo, diz que uma triangulação é de Delaunay se: O círculo que passa pelos três vértices de cada triângulo da malha triangular não contém, no seu interior, nenhum ponto do conjunto das amostras além dos vértices do triângulo em questão.

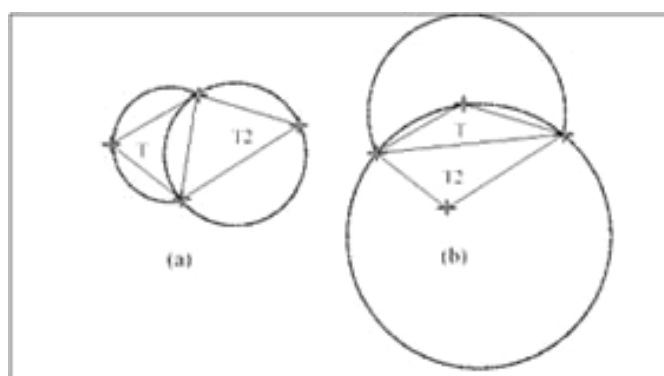


Figura 3 - (a) T1 e T2 são triângulos de Delaunay e (b) T1 e T2 não são triângulos de Delaunay

Existem vários métodos de implementação da triangulação de Delaunay. Esses métodos podem ser classificados em dois tipos básicos: algoritmo de passo único e algoritmo de dois passos. Os algoritmos de passo único criam a triangulação de Delaunay num único etapa, aplicando o critério de Delaunay durante a construção da triangulação. Os métodos de dois passos geram uma triangulação inicial qualquer e numa segunda etapa transformam-na numa triangulação de Delaunay.

Considerando-se um comportamento linear dentro de cada triângulo pode-se estimar, com facilidade, o valor de qualquer ponto da superfície definida pela malha triangular. O esforço computacional, neste caso, é mínimo. Os três pontos dos vértices de cada triângulo definem um plano no espaço tridimensional.

$$Z(x,y) = Ax + By + Cz + D \quad (\text{eq. 5})$$

A equação do plano pode ser determinada pelas coordenadas e atributos dos vértices de um triângulo de interesse. Dessa forma, para qualquer ponto a ser estimado deve-se buscar o triângulo que o contém e, através de uma álgebra simples de solução de sistemas lineares, obtém-se facilmente o valor de cota desse ponto. Este ajuste é conhecido como ajuste linear sobre a malha triangular. O ajuste linear não garante suavidade na transição entre as superfícies e não é contínuo. A modelagem então resulta numa superfície irregular e pontiaguda.

8 RESULTADOS

A imagem ou matriz de correlação mostra, em níveis de cinza, o valor da correlação para toda a área de sobreposição entre as bandas 3N e 3B. As áreas com maior correlação têm tonalidade mais clara enquanto as que têm menor correlação aparecem mais escuras. Através desta imagem é possível localizar as áreas onde o MDT apresenta informações mais confiáveis, ou seja, onde a correlação calculada obteve um valor mais próximo do máximo. Consequentemente a paralaxe calculada para estas áreas estará mais próxima do valor real.



Figura 4 - Matriz de correlação entre as bandas 3N e 3B

Os MDT's gerados pelos métodos diferentes descritos foram sobrepostos utilizando-se matemática entre bandas, ou seja, realizou-se uma subtração entre os valores de tons de cinza do MDT gerado pelo par estereoscópico ASTER e o gerado por curvas de nível, os dois georeferenciados. Formou-se então uma imagem que representa a diferença de altitude entre os MDT's. Este produto foi importado no *software* Arcview, gerando uma malha. As células desta, representam as diferenças entre os dois modelos do terreno. As diferenças foram divididas em cinco classes: 0 à 6, 7 à 12, 13 à 18, 19 à 25 e 26 à 41 metros, como mostra a legenda situada na figura 5.

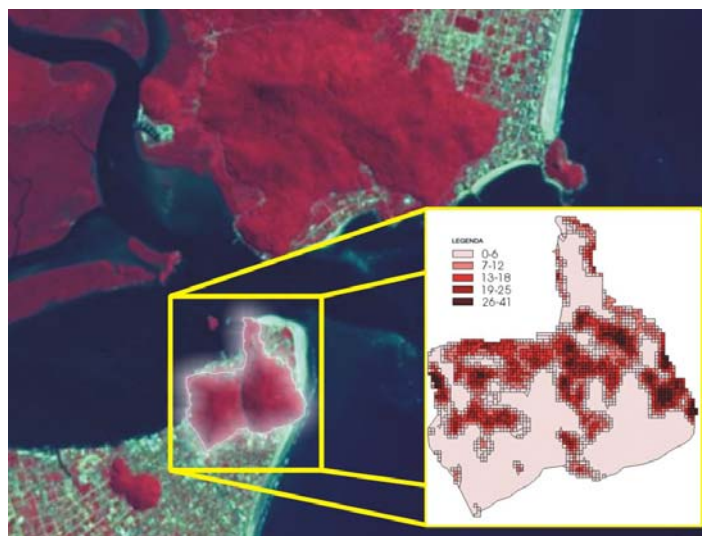


Figura 5 - Diferenças entre os mdt's dividida em cinco classes

As duas figuras a seguir mostram respectivamente a visualização tridimensional do Morro de Guaratuba utilizando os modelos digitais do terreno gerados pelas imagens ASTER e pelas curvas de nível. Nota-se visualmente a diferença entre os dois modelos. Deve-se considerar somente os dois morros localizados à direita nas imagens, pois a área plana não foi modelada pela curvas de nível, por este motivo ela aparece totalmente plana na figura 7.

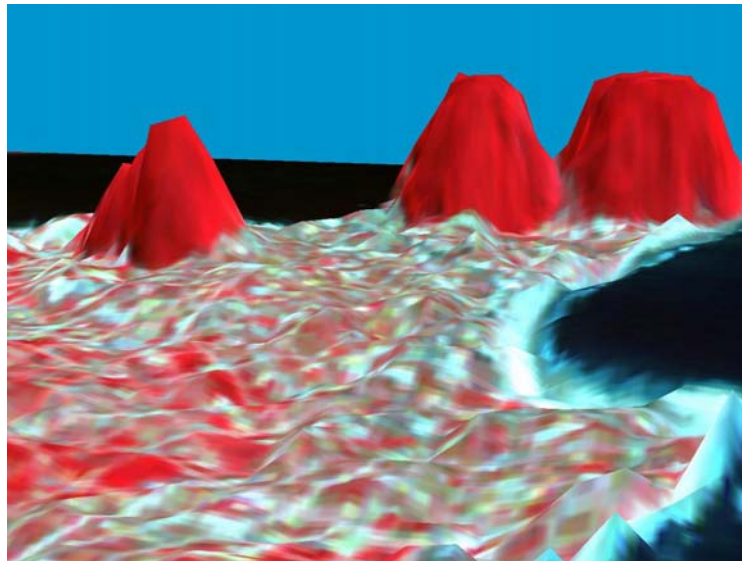


Figura 6 - MDT do morro de Guaratuba gerado pelo par estereoscópico Aster

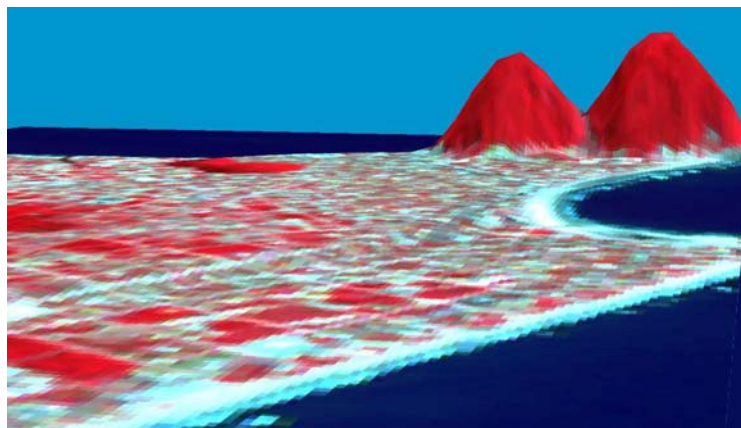


Figura 7 - MDT do morro de guaratuba gerado por curvas de nível

A modelagem topográfica de toda a área de estudo pode ser vista a seguir com a textura composta pelas bandas 3, 2 e 1 da imagem de Matinhos no sistema RGB.

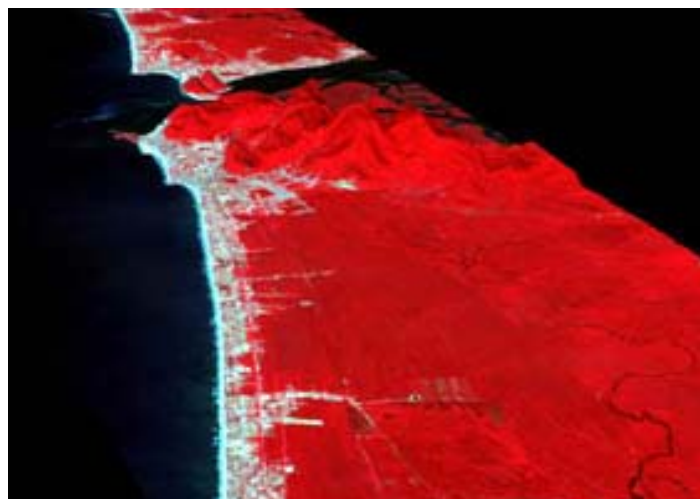


Figura 8 - Visualização tridimensional

Observa-se que a modelagem do terreno mostra-se coerente. A serra e a planície que compõe a vista são facilmente identificáveis.

8.1 VERIFICAÇÃO

A coleta de amostras para a verificação da qualidade do MDT gerado pelas imagens Aster foi realizada de maneiras diferentes para diferentes características do relevo. Após analisar a feições existentes na imagem, decidiu-se realizar uma interpolação das curvas de nível para gerar um MDT da região do Morro de Guaratuba, por ser uma região com muita variação altimétrica e porque haviam curvas de nível nesta região na restituição utilizada. Este procedimento foi adotado para se evitar um grande volume de amostras aleatórias na determinação da acurácia e precisão da região. Utilizou-se curvas de nível com 5 metros de equidistância, assim as amostras da região escolhida para representar esta característica tiveram maior densidade. Os MDT's foram subtraídos, gerando desta forma, a diferença entre as cotas.

As regiões que se caracterizam pela baixa variação no relevo, como planícies, foram representadas por amostras distribuídas aleatoriamente sobre elas. Pontos cotados identificados na restituição foram localizados sobre a imagem e observou-se as suas respectivas cotas para se analisar as diferenças.

8.2 CLASSIFICAÇÃO DO PRODUTO

Segundo o Decreto n.º 89.817 em seu 8º artigo, para verificar as diferenças observadas ou erro cometido, neste caso, pelo produto do sistema Aster, deve-se considerar apenas 90% das amostras.

O MDT gerado por curvas de nível foi considerado como referência, então a diferença observada entre este e o MDT gerado pelas imagens Aster, representa a qualidade do mesmo. A tabela 7 mostra a diferença de altitude observada entre estes MDT's, a área correspondente a cada o intervalo de altitude calculado e a porcentagem que o intervalo cobre dentro da área do Morro de Guaratuba.

Tabela 7 - Diferenças de altitude calculadas na região do Morro de Guaratuba

DIFERENÇA EM ALTITUDE ENTRE OS MDT'S (m)	ÁREA (m ²)	PORCENTAGEM	ACÚMULO (%)
0-5	518527	60,19	60,19
6-11	139725	16,22	76,41
12-17	110025	12,77	89,18
18-23	65475	7,60	96,78
24-29	23400	2,72	99,51
30-35	3375	0,39	99,89
36-41	900	0,10	100
TOTAL	861427	100	-

Nota-se que 60% das amostras obtiveram erros entre 0 e 5 metros no valor da altitude. Se forem consideradas 90% das amostras, o erro máximo cometido estará entre 0 e 17 metros. Segundo as tabelas 1 e 2 as informações altimétricas fornecidas pelo Sistema Aster poderiam ser representadas na escala 1:100.000 e estariam dentro da classe A desta escala.

Nas regiões planas foram coletados 60 pontos bem definidos e identificáveis na restituição e distribuídos aleatoriamente pela imagem. Lembrar que nas regiões acidentadas, as diferenças foram determinadas através da análise de áreas, diferentemente das regiões planas. A diferença entre os valores observados na restituição e os valores extraídos do MDT, representa a qualidade das informações altimétricas geradas pelo sistema Aster, para este tipo de região, pois a restituição foi considerada como referência. A tabela 8 mostra a diferença de altitude dividida em intervalos, o número de amostras que se encaixam nestes intervalos e a porcentagem que representa o intervalo dentro do total de amostras colhidas em regiões planas.

Tabela 8 - Amostras colhidas em regiões planas

DIFERENÇA EM ALTITUDE (m)	N.º DE AMOSTRAS	PORCENTAGEM	ACÚMULO (%)
0 - 1	14	23,33	23,33
2 - 3	25	41,66	64,99
4 - 5	14	23,33	88,32
6 - 7	3	5	93,32
8 - 9	2	3,33	96,66
11 - 29	2	3,33	100
TOTAL	60	100	-

Observa-se que os resultados variam de acordo com a região. Diferentemente da região do Morro de Guaratuba, onde as regiões planas obtiveram um erro máximo de 6 metros e em mais de 40% das amostras o erro esteve entre 2 e 3 metros. Segundo as tabelas 1 e 2, as informações altimétricas fornecidas pelo sistema ASTER poderiam ser representadas na escala 1:25.000 e estariam dentro da classe B desta escala.

8.3 LIMITAÇÕES

A explicação para os diferentes resultados em diferentes regiões está na dificuldade em correlacionar os *pixels* das imagens adjacentes. Diferenças de brilho causadas pelo ponto de vista diferente em que cada imagem é registrada, sombras e regiões muito homogêneas como o mar, rios, alagados, plantações e nuvem. A figura 4, da matriz de correlação, mostra este problema. Nota-se principalmente nas regiões cobertas pelo mar e por rios, que a correlação entre os *pixels* é baixa. Nestas regiões o algoritmo de correlação não consegue determinar valores distintos por causa da homogeneidade.

A resolução espacial das imagens é um fator preponderante na extração de informações, deve-se estar ciente em todas as aplicações. Se a imagem utilizada fosse uma IKONOS, que tem 1 metro de resolução espacial e 11 bits de resolução radiométrica, o algoritmo de correlação determinaria um valor de paralaxe muito mais preciso, influenciando no valor da altitude. Mas mesmo com estas vantagens, algumas limitações ou erros, continuariam existindo, como por exemplo, as sombras e a diferença nos tons de cinza de pontos homólogos. A figura mostra visualmente a diferença entre a resolução espacial das imagens.



Figura 9 - Ikonos (1m) sobreposta a imagem aster ortoretificada (15m)

9 CONCLUSÕES

A geração de MDT's utilizando pares estereoscópicos de imagens ASTER é rápida e fácil, quando é utilizado o aplicativo AsterDem do Envi 3.5, contudo deve-se estar ciente das suas limitações. Provou-se que a qualidade do MDT não é homogênea em toda a imagem, devido a incertezas na correlação digital das imagens, causadas pelas diferentes feições existentes no terreno. Mas é possível uma estimativa da forma da superfície e até mesmo a monorestituição planialtimétrica em escalas coerentes. A resolução espacial mostra que mapas planimétricos extraídos das imagens ortoretificadas podem ser representados em escalas de até 1:25.000 e, ao mesmo tempo, impede que isto ocorra porque a visibilidade de detalhes não permite. Mas este fato não muda a qualidade das informações e sim a quantidade de informações que podem ser extraídas.

A classificação de mapas planialtimétricos gerados a partir de imagens ortoretificadas e MDT's depende muito das feições que serão representadas. No estudo realizado neste trabalho, observou-se que há regiões em que a altitude poderia ser representada na escala 1:25.000, mas se o mapa abrangesse toda a imagem, teria que ser representada na escala 1:100.000, pois a qualidade do MDT em regiões com muita variação do relevo não permite escalas maiores. Portanto a escala para representação de mapas gerados através de informações extraídas do sistema ASTER depende da região a ser mapeada.

A principal recomendação para a correta aplicação de MDT's gerados por imagens ASTER, é a análise da matriz de correlação. Nela são mostrados onde houve maior e menor correlação entre os *pixels* das imagens adjacentes, determinado um valor da altitude mais ou menos preciso.

10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, D. F. P. N. Avaliação da exatidão de documentos cartográficos. **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, n.44, 1991.

ASTER Higher-Level Product User Guide. Version 2.0. May 2001. Jet Propulsion Laboratory. California Institute of Technology. Disponível em:
<<http://asterweb.jpl.nasa.gov/documents/ASTERHigherLevel!UserGuideVer2May01.pdf>>. Acesso em 13 mar. 2003.

FELGUEIRAS C. A. **Modelagem numérica de terreno**. Disponível em:
<www.dpi.inp.br/gilberto/livro/introd/cap7-mnt.pdf>. Acesso em: 25 mar. 2003.

HAROLD R. LANG; ROY WELCH. **Algorithm theoretical basis document for aster digital elevation models (Standard Product Ast14)**. Georgia: University of Georgia, 1999. Ver. 3.0.

LEAL Evilázio M. **Análise da qualidade posicional em bases cartográficas eradas em Cad**. Curitiba, 1998. Dissertação (Mestrado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas) - UFPR.

R. de Beauclair Seixas; L. H. de Figueiredo; C. A. da Silva; P. C. P. Carvalho. Uma metodologia para geração de modelos de elevação a partir de curvas de nível. In: **Anais do GeoInfo**, 2000. p.82-87.

SEIXAS Roberto B.; FIGUEIREDO Luiz H.; SILVA Claudio A.; CARVALHO Paulo C. P. **Uma metodologia para geração de modelos de elevação a partir de curvas de nível**. Rio de Janeiro: IMPA - Instituto de Matemática Pura e Aplicada.

TSU, Hiroji. **Algorithm theoretical basis document for ASTER level - 1 data processing**. Japan: Earth Remote Sensing, Data Analysis Center (ERSDAC), 1996. Ver. 3.0.