

## Influência da Resolução do Modelo Digital de Elevação na ortorretificação de imagens de alta resolução Ikonos-II

Joel Gripp Junior <sup>1</sup>  
Vicente Paulo Soares <sup>1</sup>  
José Marinaldo Gleriani <sup>1</sup>  
Agostinho Lopes de Souza <sup>1</sup>  
Carlos Antônio Álvares Soares Ribeiro <sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Viçosa – UFV/DEF  
36570-000 – Viçosa – MG, Brasil  
{jgripp, vicente, gleriani, souza, cribeiro}@ufv.br

**Abstract.** In the last years, the use of high resolution images such as Ikonos II, has enabled a great variety of applications in different fields of science. Among them, is the application for cartographic updating in mountain regions, which requires that they be orthorectified. Due to their high costs, alternative procedures are being developed for orthorectification, including Digital Elevation Models (DEM) and Ground Control Points (GCP). The objective of this work was to evaluate the use of DEM with different resolutions ( 2m, 5m, 10m and 20m), and Ground Control Points, along with polynomial ratio models, for orthorectifying an image/GEO Ikonos II, obtained in rugged terrain conditions, located in Zona da Mata region, State of Minas Gerais - Brazil. For analysis purposes, the orthorectified images were evaluated based on cartographic accuracies, which were calculated through the differences between the Ground Control Points coordinates obtained from GPS and the homologous points coordinates extracted from the images. Results showed that the orthorectified images served the Class A Pattern for 1:5,000, according to the law # 89,817 of June 1984, which establishes the cartographic accuracy pattern scale, when using DEM of 2 and 10 meters.

**Palavras-chave:** remote sensing, Digital Elevation Model, ortorectification, cartography, sensoriamento remoto, Modelo Digital de Elevação, ortorretificação, cartografia.

### 1. Introdução

Um modelo digital de elevação (MDE) é uma representação tridimensional (3D) do relevo do terreno, armazenado através de uma estrutura matricial (ou raster), constituído de uma grade retangular de células ou pixels, onde a cada pixel é associado um valor numérico contendo a elevação do terreno, amarrado em uma matriz bidimensional. O MDE é uma fonte de informação básica para diversas aplicações em cartografia, estudo do meio ambiente, geomorfologia, hidrografia, etc (Li et al., 2005).. Um MDE é também fonte de informação básica para a produção de cartas topográficas, e elemento indispensável para operações de ortorretificação de imagens oriundas de sensores remotos. Estimativas recentes do IBGE indicam que aproximadamente 13,9% do território brasileiro estão cartografados na escala de 1:50.000, 75,4% na escala 1:100.000 e em torno de 80,7% na escala de 1:250.000 (Dalazoana, R e Freitas, 2002). A representação do relevo nas cartas de escala 1:50.000 é feito com curvas de nível com equidistância de 20 m, escala 1:100.000 com 50 m e escala 1:250.000 com 100 m. Este acervo está, em sua maioria desatualizado, e é originado do uso da fotogrametria analógica.

Novas tecnologias como imageadores com radares, laserscanner, e sensores óticos de alta resolução têm sido utilizados. Entre estes, estão disponíveis para uso civil as imagens do Ikonos II, lançado em setembro de 1999, e o Quickbird em 2001, o que tem permitido grandes avanços em trabalhos de atualização de mapeamentos cartográficos, além de possibilitar a geração de MDEs.

Tendo em vista que os produtos derivados das imagens de alta resolução com melhor qualidade geométrica, como ortoimagem, por exemplo, possuem custos elevados, uma alternativa plausível é realizar esta correção usando dados de campo. Vários modelos

matemáticos são utilizados para esse propósito e, dentre eles, encontram-se o método das razões de polinômios e o método rigoroso.

O objetivo deste trabalho foi avaliar o uso de Modelos Digitais de Elevações com diferentes resoluções, associado ao método das razões de polinômios, para ortorretificação de uma imagem de alta resolução do sensor Ikonos II..

## 2. Metodologia de trabalho

### 2.1 Área de Estudo

A área de estudo encontra-se situada na Zona da Mata do Estado de Minas Gerais, contemplando parte dos municípios de Canaã, Araponga e Ervália. Está compreendida entre os meridianos de 42° 31'19" W e 42° 37'20" W e entre os paralelos 20° 40'22" S e 20° 45' 41" S.

A escolha desta área de estudo, teve como motivação, o fato da região ser uma amostra típica e representativa da Zona da Mata mineira, e se caracteriza por um relevo que varia de ondulado a montanhoso, com altitude mínima de 661 m e máxima de 1.309 m. A tabela 1 mostra a distribuição das fases do relevo, segundo classificação utilizada por Resende et al. (2002), e aplicado à região do estudo.

A vegetação natural da região pode ser classificada como Floresta Estacional Semidecidual, ou seja, parte das espécies arbóreas perde folhas no período correspondente ao inverno. Este tipo de vegetação é condicionado pelo comportamento estacional do clima, que apresenta verão quente com chuvas intensas, seguidas de inverno seco com queda acentuada de temperatura, Meira (2006).

Tabela 1 - Distribuição das fases do relevo na área de estudo

Fases	Declividade (%)	Área (ha)	%
Plano	0 – 3	200,5312	1,6
Suavemente ondulado	3 – 8	875,4164	7,0
Ondulado	8 – 20	3.070,1144	24,6
Fortemente ondulado	20 – 45	5.455,8232	43,8
Montanhoso	45 – 75	2.214,7240	17,9
Escarpado	>75	635,4544	5,1
Total		12.452,0636	100,0

### 2.2 Imagem Ikonos II utilizada

A imagem Ikonos II disponibilizada para o estudo é do tipo *GEO*, pancromática com 1,0 m de resolução espacial. Ela foi obtida no dia 31 de maio de 2005, abrangendo uma área de 11 por 11 km, possuindo as seguintes características:

- Tamanho do pixel: 1 metro pancromático.
- Ângulo de elevação do sol: 42,81415°
- Ângulo azimutal do sol: 26,7147°
- Ângulo de elevação nominal: 64,73846°
- Ângulo azimutal da imagem: 295,2658°
- Direção da varredura: 180,02°
- Sistema geodésico: WGS84

### 2.3 Método polinomial proporcional ou Modelo Funcional racional

O Modelo Funcional Racional utiliza coeficientes polinomiais racionais que são calculados a partir dos dados da câmara do sensor e da órbita do satélite. As agências de

distribuição de imagens podem disponibilizar estes coeficientes para imagens de alta resolução como as originárias do Ikonos II e do Quickbird, conforme Pinheiro (2003).

Na situação das imagens onde não se dispõem dos parâmetros de órbita, pode-se realizar também um ajustamento tal como se faz pelo procedimento polinomial (transformação afim).

Segundo o *PCI Geomatics* (2003), os cálculos com as funções racionais conduzem a uma maior precisão que o método polinomial.

As equações matemáticas do modelo funcional racional relacionam as coordenadas objeto dos pontos (X,Y,Z) para as coordenadas de pixel da imagem (r,c) ou vice-versa, assim como o modelo físico do sensor, e podem ser apresentadas da seguinte forma:

$$Linha(X_n, Y_n, Z_n) = r_n = \frac{p_1(X_n, Y_n, Z_n)}{p_2(X_n, Y_n, Z_n)} = \frac{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^p a_{ijk} X_n^i Y_n^j Z_n^k}{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^p b_{ijk} X_n^i Y_n^j Z_n^k}$$

$$Coluna(X_n, Y_n, Z_n) = c_n = \frac{p_3(X_n, Y_n, Z_n)}{p_4(X_n, Y_n, Z_n)} = \frac{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^p c_{ijk} X_n^i Y_n^j Z_n^k}{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^p d_{ijk} X_n^i Y_n^j Z_n^k}$$

Onde  $(r_n, c_n)$  são linhas e colunas normalizadas dos pixels no espaço imagem;  $(X_n, Y_n, Z_n)$  são as coordenadas normalizadas no espaço objeto ou terreno, e  $a_{ijk}$ ,  $b_{ijk}$ ,  $c_{ijk}$  e  $d_{ijk}$  são os coeficientes da transformação, chamados de RPCs ou Coeficientes Polinomiais Racionais. As potências das coordenadas do espaço objeto podem variar caso a caso, sendo que quando a potência máxima é igual a 3, ou seja,  $m+n+p = 3$ , tem-se o caso particular utilizado pelas empresas que produzem as imagens, tais como a *Space Imaging* e *Digital Globe*, onde os polinômios possuem 20 termos e são de terceira ordem, e que vem sendo empregado como um padrão da indústria, Xu (2004).

A *Space Imaging* fornece para alguns de seus produtos os coeficientes de transformação que inseridos nas funções racionais polinomiais vem a constituir uma expressão matemática precisa do relacionamento entre o terreno e a imagem, e vice versa. Com isto, o usuário reconstitui a geometria de coleta da imagem sem necessidade de conhecimento explícito dos parâmetros de posicionamento e orientação do sensor (efemérides e atitude do satélite). Neste caso, a precisão final da ortorretificação é limitada somente pela precisão do MDE da área de interesse, e dos pontos de controle.

Se a imagem não dispõe dos coeficientes polinomiais racionais (ou coeficientes de transformação), pode-se realizar um ajustamento de observações pelo método dos mínimos quadrados, tal como o realizado para o método polinomial simples, só que neste caso o número de pontos de controle é bem superior, Toutin (2000).

## 2.4 Pontos de controle terrestres usados na ortorretificação e na checagem.

As coordenadas dos pontos necessários para a ortorretificação e verificação de resultados, foram obtidas utilizando o posicionamento GPS. Conforme o recomendado nas normas do INCRA para posicionamento de imóveis rurais, adotou-se como critério para a definição da metodologia de posicionamento com GPS, que os pontos tivessem precisão superior a 0,5 m.

Para atender esta precisão, o método empregado foi o estático com um tempo mínimo de rastreamento de uma hora. Um ponto base foi lançado aproximadamente no centro da área com 8 horas de rastreamento em um equipamento de dupla frequência.

Para a escolha dos locais do ponto base e dos pontos medidos, adotou-se como critério:

- Boas condições para a recepção de sinais emitidos pelos satélites;
- Pontos bem definidos na imagem, e com uma distribuição homogênea por toda a área de estudo.

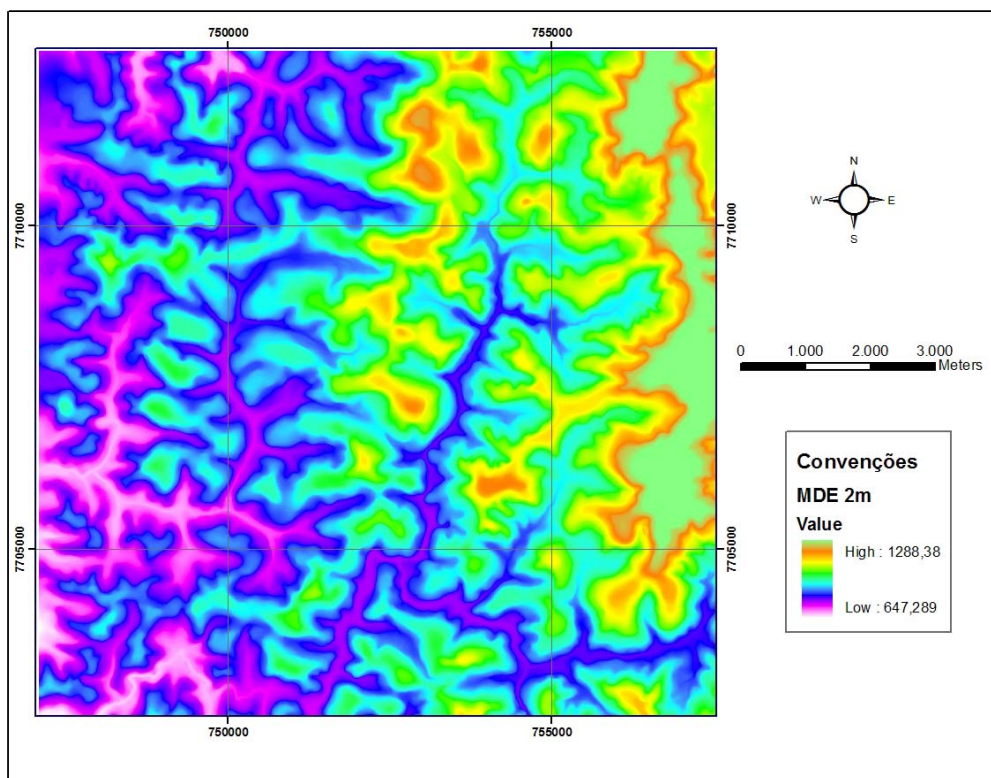
- Preferencialmente pontos situados em posições altimétricas extremas, ou seja, pontos situados em posições mais altas e mais baixas do terreno.

Os pontos de controle terrestres são os que participam do ajustamento no modelo matemático da ortorretificação, tendo sido usado neste estudo 49 pontos, enquanto que os pontos de checagem (43 pontos) não participam do ajustamento e servem para verificação da qualidade do produto resultante. Todos os pontos usados apresentaram-se bem distribuídos ao longo da imagem, preferencialmente localizados em posições mais altas e baixas do terreno.

## 2.5 Geração do modelo digital de elevação – MDE

A opção disponível para a geração do MDE da região em estudo, foi à utilização do mapeamento digital do IBGE, originário da escala 1/50.000 e com equidistância de 20 m. Como a região de estudo não estava em apenas uma carta, houve a necessidade de realizar um recorte das cartas e um correspondente ajuste, de forma a ser possível a geração do MDE necessário para a ortorretificação. Em seguida, passou-se para a etapa de geração do MDE utilizando a ferramenta TOPOGRID do ARCGIS. Procedendo desta forma, e tendo como objetivo o estudo da influência do tamanho pixel do MDE na ortorretificação da imagem do IKONOS 2 com resolução de 1 m, foram gerados MDEs com resoluções de 2 m, 5 m, 10 m e 20 m. Na figura 1 encontra-se ilustrado o MDE da região em estudo com resolução de 2 m.

Como a imagem original utilizada estava no sistema de projeção UTM e sistema geodésico WGS84, optou-se por trabalhar com o MDE também nestes sistemas, e utilizar as altitudes ortométricas.



**Figura 1 – Modelo Digital de Elevação da região em estudo.**

## 2.6 Ortorretificação da imagem

Para proceder a ortorretificação, além de ser necessário o MDE e pontos de controle terrestres, é necessário também a utilização de algum aplicativo ou programa de computador que efetue a operação. Para a realização desta operação, foi utilizado o programa *OrthoEngine* do *PCI Geomatics* que dispõe desta ferramenta. O manual do fabricante informa que se pode

trabalhar com um mínimo de 3 coeficientes e um máximo de 20, e informa também que a partir de 10 coeficientes não se obtém ganhos significativos. Testando o ajustamento com diferentes números de coeficientes, verificou-se que 6 coeficientes permitiram chegar em melhores resultados, o que fez com que se optasse por trabalhar com este número de coeficientes.

## 2.7 Avaliação da qualidade cartográfica

Segundo Andrade (1991), a precisão é o grau de dispersão de um grupo de valores em relação à média de espalhamento, e a exatidão indica se os valores estão próximos ao valor real, exato. Na avaliação de produtos cartográficos a média das deformações ou erros dos pontos de checagem representa a exatidão e o desvio padrão representa a precisão. No Brasil, a norma existente para avaliar produtos cartográficos é o decreto 89.817 de 20 de junho de 1984, que estabelece um Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC), que é um indicador estatístico de dispersão, relativo a 90% de probabilidade. Pelo decreto, consideram-se equivalentes as expressões Erro padrão, desvio padrão e erro médio quadrático RMS (*Root Mean Square Error*). As cartas devem obedecer ao PEC quanto à exatidão, sendo 90% dos pontos bem definidos no produto cartográfico, e quando testados no terreno, não deverão apresentar erros superiores ao PEC planimétrico estabelecido. A probabilidade de 90% corresponde a 1,6449 vezes o RMS ( $PEC=1,6449 \times RMS$ ). Pelo decreto, as cartas, segundo a sua exatidão, são classificadas nas Classes A, B e C, que considerando algumas escalas de uso comum, exigem que as cartas tenham os valores máximos para a PEC e o Erro Padrão que constam na tabela 2. Trabalhando em meio digital, deve-se considerar como se estivesse no terreno.

Tabela 2 – PEC e Erro Padrão planimétrico para diferentes escalas.

Escala	Classe	PEC		Erro Padrão	
		Carta (mm)	Terreno (m)	Carta (mm)	Terreno (m)
1:2000	A	0,5	1,0	0,3	0,6
	B	0,8	1,6	0,5	1,0
	C	1,0	2,0	0,6	1,2
1:5000	A	0,5	2,5	0,3	1,5
	B	0,8	4,0	0,5	2,5
	C	1,0	5,0	0,6	3,0
1:10000	A	0,5	5,0	0,3	3,0
	B	0,8	8,0	0,5	5,0
	C	1,0	10,0	0,6	6,0

Fonte: Adaptado de (LEAL , 2006)

## 3. Resultados e Discussão

Como a qualidade altimétrica do MDE é diferente da qualidade altimétrica dos pontos de controle terrestres e checagem, foram utilizados para análise os resultados de mensurações realizadas nas imagens resultantes da ortorretificação. Assim, foram tomadas para os 49 pontos de checagem as coordenadas medidas nas ortoimagens, cujos resultados foram comparados com os resultados da medição de campo utilizando o rastreamento GPS, obtendo para isto a deformação em abscissa, ordenada e resultante, para cada ponto. A partir das deformações dos pontos, foram calculadas a deformação média, o desvio padrão (ou RMS) e a deformação máxima. O resultado dos 43 pontos de checagem, foram calculados para cada ortoimagem gerada com os quatro diferentes MDEs, assim como um resultado geral para um conjunto de observações, a deformação média e o correspondente desvio padrão ou erro médio quadrático (RMS), além da deformação máxima.

Uma síntese dos resultados obtidos utilizando-se 49 pontos de controle terrestres e MDEs com resoluções espaciais de 2, 5, 10 e 20 metros encontra-se na Figura 2. Os resultados das deformações nas abscissas, ordenadas e resultantes obtidos nos pontos de checagem da

ortoimagem com resolução espacial de 2 metros podem ser visualizados na Figura 3. Na Tabela 3 encontra-se de forma resumida o resultado da análise estatística realizada objetivando a verificação do padrão de exatidão e precisão das ortoimagens para resoluções de 2, 5 10 e 20m

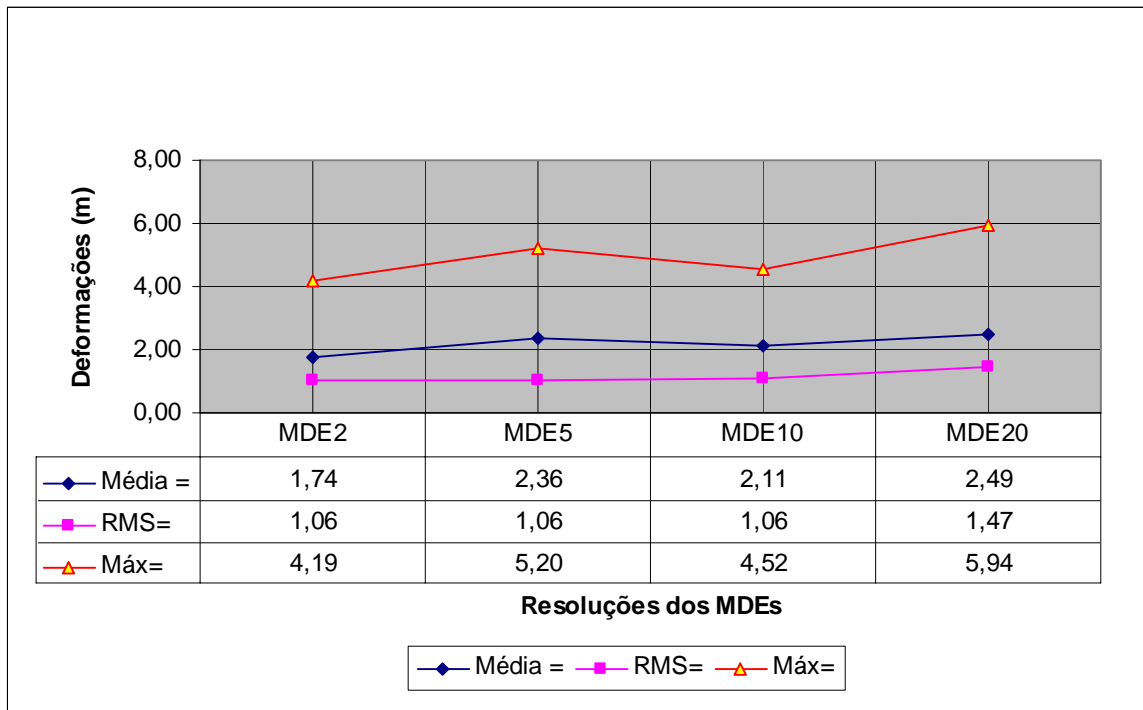


Figura 2 - Deformações médias, RMS e máximas para os 4 MDE testados.

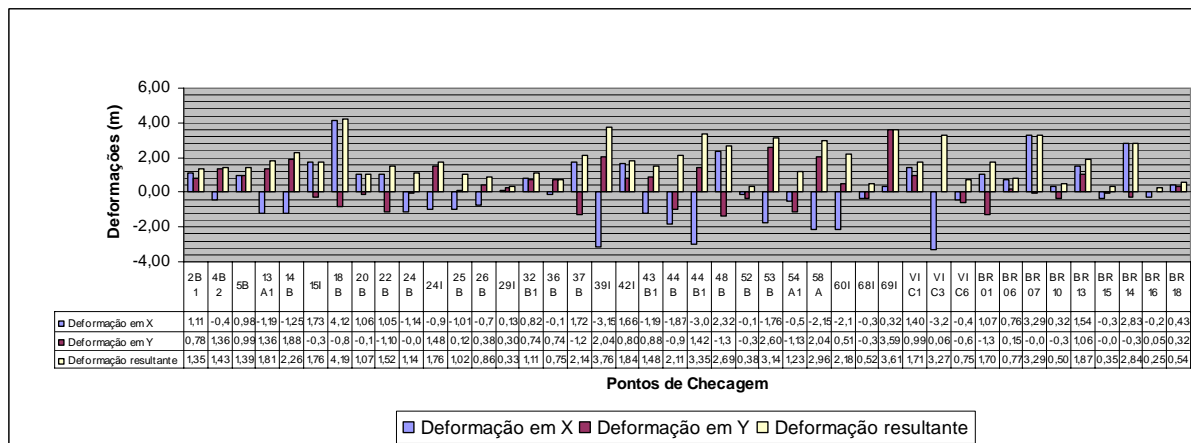


Figura 3 - Deformações nas abscissas, nas ordenadas, e resultantes dos pontos de checagem com ortorretificação realizada com 49 pontos de controles

Analisando a figura 3 verifica-se que as deformações nos pontos de checagem são em sua maioria menores que 2 pixels da imagem, e apresentam uma distribuição aleatória em X e Y.

Tabela 3 – Análise estatística do padrão de exatidão e precisão das ortoimagens para resoluções de 2, 5 10 e 20m.

		MDE→	2 m	5 m	10 m	20 m	
Dados	Média amostral $\bar{X}$		1,74	2,36	2,11	2,49	
	Desvio padrão amostral (s)		1,06	1,06	1,06	1,47	
	Número de amostras (n)		43	43	43	43	
	Grau de liberdade (n-1)		42	42	42	42	
	Intervalo de confiança (IC)		90%	90%	90%	90%	
Padrão de Exatidão Escala 1/5.000	PEC máximo (Classe A) $\mu_o$		2,50	2,50	2,50	2,50	
	$t_{(\alpha,n-1)}$ (Tabela <i>t de Student</i> ) ( $\alpha=1-IC$ )		1,303	1,303	1,303	1,303	
	$t_{calculado}$ $t_{calc} = \frac{(\bar{X} - \mu_o) \sqrt{n}}{s}$		-4,701	-0,866	-2,412	-0,045	
	CONDICÃO: $t_{calculado} < t_{(\alpha,n-1)}$	$\mu \leq \bar{X} + (t_{\alpha}) \left( \frac{s}{\sqrt{n}} \right) \leq$		1,95	2,57	2,32	2,78
	Satisfaz a condição?		Sim	Sim	Sim	Sim	
Avaliação da Precisão: Escala 1/5.000	Erro padrão máximo (Classe A) $\sigma_o$		1,50	1,50	1,50	1,50	
	$\chi^2_{\alpha}$ ( $\nu=42, p=0,10$ ) (Tabela $\chi^2$ )		54,077	54,077	54,077	54,077	
	$\chi^2_{1-\alpha}$ ( $\nu=42, p=0,90$ ) (Tabela $\chi^2$ )		30,779	30,779	30,779	30,779	
	Desvio padrão populacional		1,238	1,238	1,238	1,717	
	CONDICÃO: $\chi_x^2 \leq \chi_{\alpha}^2$	$(\sigma) \sigma \leq \sqrt{\frac{(n-1) \cdot s^2}{\chi^2_{(1-\alpha)}}$					
	$\chi_x^2$ amostral $\chi_x^2 = (n-1) \frac{s^2}{\sigma_o^2}$		20,974	20,974	20,974	40,336	
	Satisfaz a condição?		Sim	Sim	Sim	Sim	

#### 4. Conclusões

Pelas análises estatísticas realizadas, todas as ortoimagens geradas se apresentaram classificadas com Padrão de Exatidão Cartográfica e Erro Padrão Classe A para a escala 1:5000 com os MDEs com resoluções de 2, 5, 10 e 20 metros.

Embora os dados que geraram os MDEs sejam originados da tecnologia analógica de cartas na escala 1:50.000 com curvas de nível com equidistância de 20 metros, as condições da tomada da imagem sejam extremas, e a região apresentar um relevo montanhoso, os resultados apresentados foram bons para as três resoluções de MDE utilizadas, mostrando, contudo, que os melhores resultados foram obtidos para a menor resolução (2 m).

#### 5. Agradecimentos

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo suporte financeiro, e ao Instituto de Geociências Aplicadas de Minas Gerais (IGA-MG) pelo apoio técnico e permissão de uso dos programas de computadores.

#### 6. Referencias bibliográficas

Andrade, D. F. P. N. – *Avaliação da Exatidão de Documentos Cartográficos* – Revista Brasileira de Cartografia, Rio de Janeiro, Edição número 44, outubro de 1991, p.8 – 11.

Brasil. Decreto número 89.817, de 20 de junho de 1984. Estabelece as Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional. **Diário Oficial da Republica Federativa do Brasil**, Brasília, n. 120, p8884-8886, 22 jun. 1984.

Dalazoana, R e Freitas, S. R. C. **Efeitos na Cartografia devido a evolução do sistema geodésico brasileiro e adoção de um referencial geocêntrico**. Revista Brasileira de Cartografia número 54, 2002, 11p.

Leal, E. M. – **Análise da Qualidade Posicional em Bases Cartográficas Geradas em CAD** – Dissertação (Mestrado), UFPR, Curitiba, 1998, .

Meira, A. D. et al. **Relatório e Plano de Controle Ambiental – Central Geradora Hidrelétrica (CGH) Limoeiro**. 82p, 2006.

Li, Zhiling; Zhu, Ging; Gold, Christopher. **Digital Terrain Modeling: principles e methodology**. CRC, 2005, 306p.

PCI Geomatics Inc. **OrthoEngine User Guide: version 9.1**, Canada, 2003.

Pinheiro, E. S. **Avaliação de Imagens QuickBird na Análise Geográfica de um Setor da Mata Atlântica do Rio Grande do Sul**. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto), INPE, 2003, 137p.

Resende, M., Lani, J. L. & Resende, S. B. **Pedossistemas da mata atlântica: considerações pertinentes sobre a sustentabilidade**. Revista árvore, Viçosa, v. 26, p161-269, 2002.

Toutin, T. & Cheng, P. **Demystification of IKONOS**. Earth Observation Magazine EOM, 2000, 9p.

Xu, Z. **The Rational Function Model in Photogrammetric Mapping: Methods and Accuracies**. Master Thesis. North York, Ontario, Canada. Department of Earth Science, York University, 64 p. 2004.