

ANÁLISE & VALIDAÇÃO MODELOS DIGITAIS DO TERRENO NUM SETOR DE RELEVO ESCARPADO DA MATA ATLÂNTICA - RS, ÁREA TESTE: CPCN PRÓ-MATA

EDUARDO DA SILVA PINHEIRO¹
HERMANN JOHANN HEINRICH KUX¹

¹INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Caixa Postal 515 - 12201-970 - São José dos Campos - SP, Brasil
{eduardo,kux}@ltid.inpe.br

Abstract. Due to the new orbital high-resolution sensor systems available presently, and to the need to obtain precise cartographic data for environmental research, it is necessary to validate and to evaluate the errors of Digital Terrain Models (DTM). The objective of this paper is to evaluate qualitatively and quantitatively the cartographic precision of DTMs in a section from the Plateau of Rio Grande do Sul with steep slopes, test site research center CPCN Pró-Mata. Totally 6 DTMs obtained from 2 data sets were evaluated and compared with data gathered with a DGPS. After executing statistical tests for the quality analysis, we verified that the first data set is in accordance with the Brazilian Standard for Cartographic Precision (PEC), class A, whereas the second data set is not in accordance with the Decree 89.817 (dated June 20th 1984), which determines the quality standards of the Brazilian Official Cartography.

Keywords: digital terrain model, cartographic accuracy, Mata Atlântica.

1. Introdução

Um Modelo Digital do Terreno MDT (*Digital Terrain Model –DTM*), caracteriza-se por ser uma representação matemática tridimensional da superfície terrestre, por meio de uma malha de elevação contínua com coordenadas tridimensionais. A qualidade de um MDT deve representar adequadamente as feições do modelado topográfico, as linhas de cumeada e os talwegues, caracterizando de forma mais fiel possível o terreno (Maune, 1996; Ackermann, 1996; Santos *et al.*, 2000).

Para a obtenção de um MDT podem ser utilizados pares estereoscópicos de fotografias aéreas ou imagens de satélites, cartas topográficas, levantamentos de campo, etc. Um MDT pode ser gerado a partir de uma malha regular ou irregular. A malha regular modela a superfície através de polígonos regulares como: quadrados, retângulos, triângulos e hexágonos. Enquanto a malha irregular emprega poliedros com faces e dimensões irregulares, os mais utilizados são poliedros triangulares (Santos *et al.*, 2000).

Na comunidade internacional a Rede Irregular de Triangulação (*Triangulated Irregular Network - TIN*) é um malha irregular bastante difundida, que utiliza triângulos na sua construção. No TIN é realizada uma triangulação a partir de pontos irregulares no espaço X,Y e Z, respectivamente coordenadas E, N e h. Este modelo normalmente representa com muita fidelidade as descontinuidades do terreno. Nas malhas irregulares também são empregados polinômios de graus diferentes, onde a precisão do MDT está associada à densidade de pontos na área e ao grau do polinômio usado (Ackermann, 1996; Santos *et al.*, 2000). Para Wolf (1983), na concepção de informações cartográficas, medições e análises devem ser considerados fatores como limitações humanas e imperfeições dos instrumentos empregados.

A obtenção de produtos cartográficos requer o conhecimento dos erros associados, bem como a precisão dos dados processados. No Brasil, as Normas Técnicas da Cartografia Nacional são estabelecidas pelo Decreto n.º 89.817 de 20/06/1984, descritas conforme a **Tabela 1.**

Tabela 1 – Controle de qualidade de Produtos Cartográficos Brasileiros

CLASSE	PLANIMETRIA		ALTIMETRIA	
	PEC (mm)	EP (mm)	PEC (Eq)	EP Eq
A	0,5	0,3	1/2	1/3
B	0,8	0,5	3/5	2/5
C	1,0	0,6	3/4	1/2

Onde PEC – Padrão de Exatidão Cartográfica; EP – Erro Padrão; Eq – equidistância das curvas de nível.

Fonte: Resolução nº 89.817 de 20/06/1984 (IBGE, 2001).

A necessidade de se obter dados topográficos com precisão, bem como o conhecimento dos erros associados estimulou a realização deste trabalho. A área de estudo consiste no Centro de Pesquisas e Conservação da Natureza Pró-Mata, RS localizada entre as coordenadas ϕ 29° 26' 17" a 29° 34' 42" S e λ 50° 08' 14" a 50° 14' 18" W (**Figura 1**).

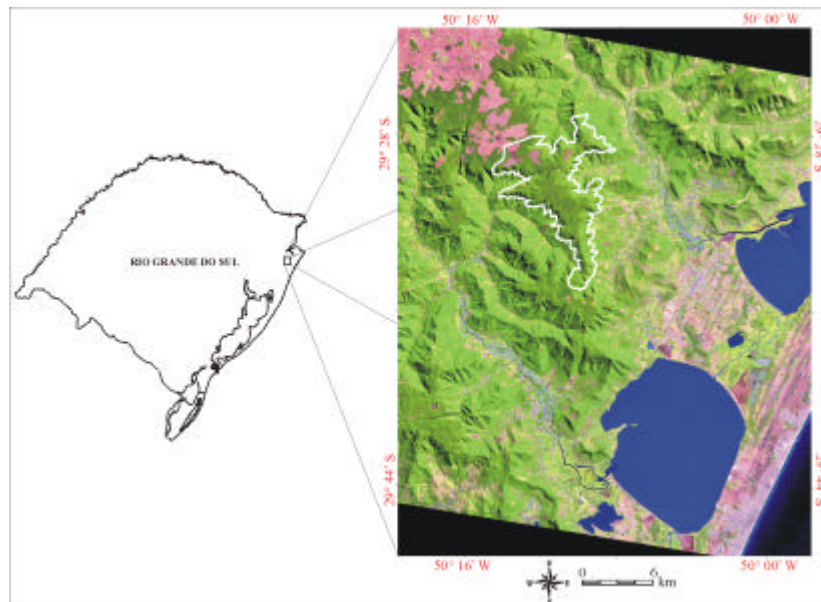


Figura 1 – Localização do Centro de Pesquisas e Conservação da Natureza Pró-Mata.

O CPCN Pró-Mata foi criado no ano de 1994, buscando o desenvolvimento de projetos e ações para a proteção e a recuperação dos ecossistemas da Mata Atlântica. Neste sentido, foi estabelecida uma cooperação entre a Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS) e as Universidades alemãs de *Tübingen* e *FH. Rottenburg* (Bertoletti, 1995). Atualmente, o INPE agregou-se ao programa firmando convênios com a PUCRS.

A geomorfologia da área é constituída pelo Planalto das Araucárias, apresentando um relevo suave ondulado, onde se localizam as maiores altitudes do RS. Ao Sul e a Leste, este Planalto é bruscamente interrompido por escarpas íngremes esculpidas por ação dos rios e grandes escorregamentos (Villwock, 1998). As cotas altimétricas na área variam em torno de 60 a 980 m, com alto grau de declividade.

A partir dos dados gerados pelo MDT pode-se produzir um vasto conjunto de informações de interesse para o CPCN Pró-Mata, imprescindíveis aos estudos ambientais na área. O objetivo deste trabalho é avaliar de forma qualitativa e quantitativa a precisão cartográfica dos MDTs visando a sua utilização posterior por este Centro de pesquisas. Após a geração e avaliação dos MDTs poderão ser criados mapas de declividade, orientação das vertentes, mapas hipsométricos e de sombras. Estes mapas também serão usados para auxiliar a confecção do mapeamento geomorfológico do CPCN Pró-Mata. Além disso, o MDT

identificado como tendo a melhor precisão será empregado no processo de orto-retificação de imagens de um satélite de alta resolução que constitui parte de uma Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto em andamento no INPE.

2. Materiais e Métodos

Neste trabalho foram criados e avaliados seis MDTs, obtidos a partir de dois conjuntos de curvas de nível, disponibilizadas em meio digital, geradas pela 1^a. Divisão de Levantamento do Exército Brasileiro (1^aDL), conforme descrito a seguir:

- Curvas de nível com equidistância de 10 m nas áreas mais íngremes (Escarpa) e 5 m nas áreas mais planas (Planalto). Obtidas por meio de pares estereoscópicos do voo 01/1999 (empresa AEROSUL/PR), fotografias em escala 1/10.000, filme infravermelho falsa-cor (Kodak 2443). O serviço de restituição fotogramétrica foi realizado pela 1^aDL. Projeção UTM; Datum vertical: Imbituba SC; Datum horizontal: SAD 69 MG; PEC: Classe A.

- Curvas de nível equidistantes 20 m obtidas a partir de cartas topográficas em escala 1/50.000, geradas a partir do voo fotogramétrico de 1975 na escala 1/110.000. Projeção UTM; Datum vertical: Imbituba SC; Datum horizontal: SAD 69 MG. As folhas das cartas topográficas possuíam o Datum vertical: Máregrafo de Torres e Datum horizontal: Córrego Alegre, no entanto a 1^aDL realizou as transformações destes Data.

Para avaliar a qualidade dos MDTs foram usados 52 pontos de controle adquiridos, por meio de *Differential Global Positioning System* (DGPS), e disponibilizados em coordenadas UTM, altitude elipsoidal SAD 69. O levantamento destes pontos foi realizado por especialistas da Universidade de *FH. Rottenburg* (Alemanha), no ano de 2000, servindo como apoio no processo de aerotriangulação e restituição do voo realizado em 1999, supracitado. Um receptor *Trimble 4600 LS GPS* serviu como estação base, estabelecida no terreno da 1^a DL, Porto Alegre/RS. As coordenadas WGS 84 deste TP são: ϕ 30°4'6,67083" S; λ 51°13'18,47303" W; altitude s.n.mar: 87,492 m. O ponto de referência próximo à estação do CPCN Pró-Mata foi medido com um receptor *Trimble Pathfinder PRO XR*.

Os aplicativos utilizados para gerar e analisar os MDTs foram o *Modular GIS Environment* (MGE), e o *ERDAS 8.5*. Um procedimento adotado antes da criação dos MDTs foi à verificação dos dados. Inicialmente, em cada conjunto de curvas de nível foi utilizada uma ferramenta para a verificação dos arquivos vetoriais, buscando por linhas duplicadas, segmentos perdidos, linhas que se cruzam, etc. Além disso, foram usadas expressões lógicas para identificar cotas com valores equivocados. No primeiro conjunto de dados, isto é, nas curvas de nível de 10 e 5 m foi possível identificar alguns erros nas suas respectivas cotas. Numa região como o Planalto das Araucárias, onde as altitudes não ultrapassam valores acima de 1000 m, foram encontradas cotas, p.ex. de 27.747,8593 m. Nas curvas de nível de 20 m identificou-se um ponto com cota de -321.00 m. Para corrigir os dados foi definido retirar-se os pontos com cotas equivocadas.

Para gerar os MDTs foram testados dois métodos de interpolação, o Linear e o Não-Linear. O método de interpolação Linear utiliza o TIN e uma equação polinomial de 1° grau para gerar a superfície contínua, ou seja, o MDT. O método de interpolação Não-Linear utiliza, além do TIN, um polinômio de 5° grau, resultando assim numa superfície mais suavizada (ERDAS, 2000). Os dados utilizados, bem como os métodos de interpolação para os MDTs estão apresentados na **Tabela 2**.

Tabela 2. Modelos Digitais do Terreno.

Tipos de MDT	Eqüidistância das curvas de nível	Método de Geração		Tamanho do <i>pixel</i>
		Linear	Não Linear	
MDT 10 Linear	10 e 5 m	X		10x10 m
MDT 10 Não-Linear	10 e 5 m		X	10x10 m
MDT 10 Linear	10 e 5 m	X		5x5 m
MDT 20 Linear	20 m	X		10x10 m
MDT 20 Não-Linear	20 m		X	10x10 m
MDT 20 Linear	20 m	X		5x5 m

3. Resultados e discussão

A análise da qualidade dos MDTs, seguiu a metodologia proposta por Barbosa (1990), isto é, restringiu-se aos valores altimétricos. Neste sentido, foram comparados pontos de controle adquiridos através de um DGPS e pontos observados nos MDTs. Os MDTs gerados com curvas eqüidistantes de 10 e 5 m foram validados com 29 pontos, enquanto os aqueles criados com curvas eqüidistantes 20 m puderem ser analisados com 52 pontos, pois possuíam área de abrangência maior. As **Figuras 3 e 4** apresentam, um exemplo da distribuição dos pontos de controle nos MDTs.

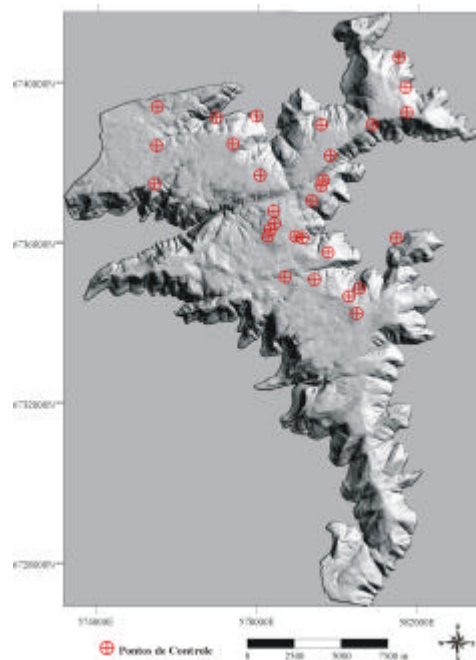


Figura 3 - Relevo sombreado gerado a partir do MDT 10 Linear, pontos de controle adquiridos com DGPS.

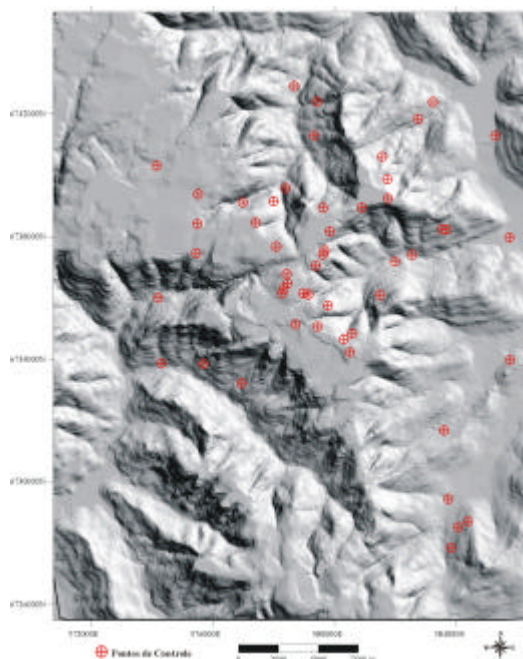
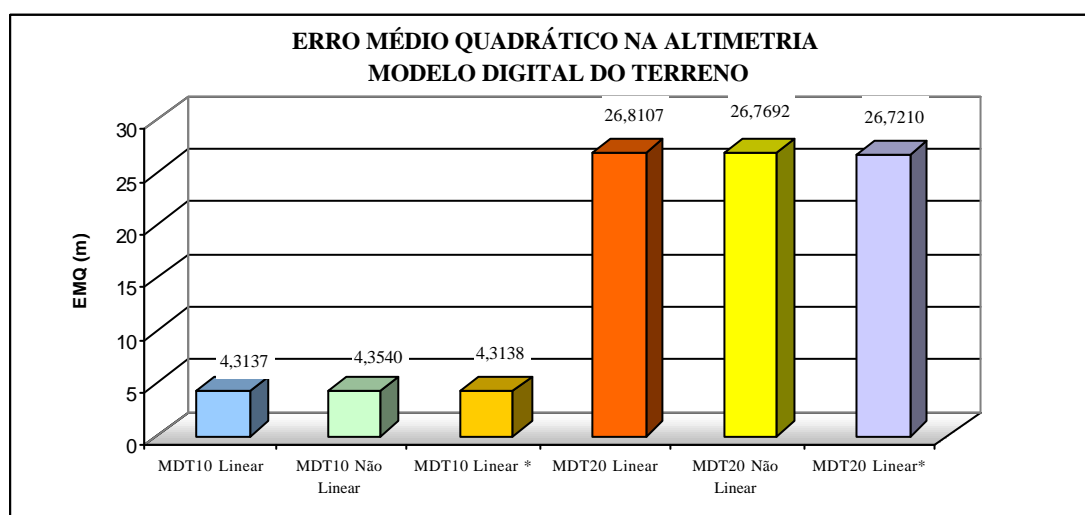


Figura 4 – Relevo sombreado gerado a partir do MDT 20 Linear, pontos de controle adquiridos com DGPS.

A identificação dos valores das cotas nos MDTs foi realizada da forma mais precisa possível localizando-se os pontos através de coordenadas UTM E, N e verificando-se o valor de h. Após a identificação dos referidos pontos calculou-se o Erro Médio Quadrático (EMQ), os resultados constam na **Figura 5**. Para o cálculo do EMQ foi usando a seguinte fórmula:

$$EMQ = \sqrt{\frac{\sum (\Delta h)^2}{n}} \quad (1)$$

Onde: Δh : Cota adquirida com DGPS – Cota estimada pelo MDT; n: n° de pontos testados.



*MDTs gerados com *pixels* de 5x5 m.

Figura 5 – Erro Médio Quadrático encontrado nos MDTs.

Os EMQs calculados para os MDT 10 Linear e Não Linear ficaram em torno de $\pm 4,3$ m (**Figura 5**). Para atender os padrões de Classe A o EP Altimétrico deveria ser de 3,33 m. Observa-se que os valores dos EMQs calculados e o exigido pela Legislação Cartográfica

estão bastantes próximo, podendo considerá-los satisfatórios, com diferença de praticamente 1 m. Considerando o PEC dos MDTs 10, estes poderiam ser aceitos com padrão Classe A, pois a exigência desta classe é de 5 m.

Para os MDTs 20 Linear e Não-Linear, os EMQs ficaram em torno dos 26,7 m, ultrapassando os valores aceitos pelos EP Altimétricos. Por exemplo, para a Classe A o EP Altimétrico aceito seria 6.67 m. No entanto, como se observa na **Figura 5** os valores dos EMQs extrapolaram mesmo as exigência de Classe C do EP Altimétrico. Cumpre informar que as curvas de nível com equidistância de 20 m foram vetorizadas a partir de folhas das cartas topográficas 1/50.000, geradas a parti de dados fotogramétricos de 1975, quando técnicas mais antigas que as atuais eram empregadas na confecção de mapas. Realizando, uma análise qualitativa verifica-se que os dados possuem coerência representando adequadamente o terreno.

Uma questão que pode ser adicionada aos erros identificados é o tamanho do *pixel* utilizado para gerar o MDT, aqui definido como de 10x10 m. No processo de identificação de um ponto com coordenadas E, N, h, mesmo procurando ser o mais preciso possível, podem ocorrer erros de localização deste ponto. Por exemplo, numa área com alto grau de declividade, podem ocorrer erros em localizar um *pixel* com um valor de cota, identificando-se o *pixel* vizinho. Para minimizar este tipo de erro gerou-se MDTs com *pixels* de 5x5 m e calculou-se o EMQ, verificando-se que para este conjunto de dados, os resultados não mudaram significativamente (**Figura 5**).

No gráfico da **Figura 6** encontram-se as diferenças entre os pontos adquiridos com DGPS e aqueles estimados pelos MDTs.

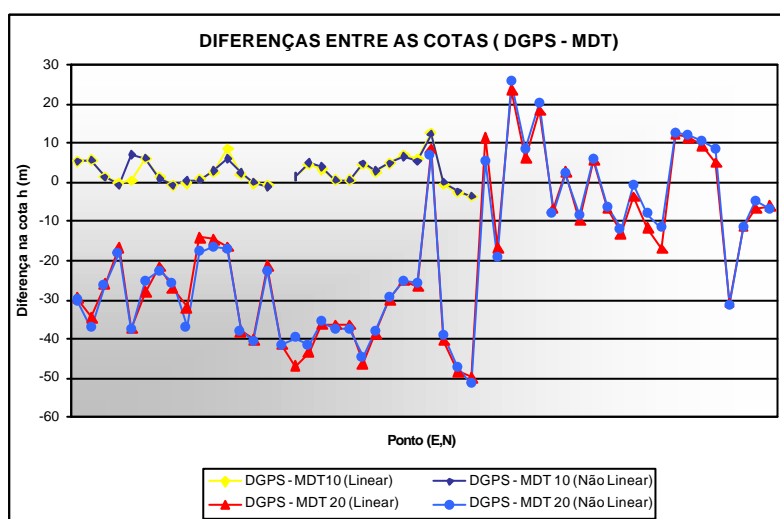


Figura 6 – Gráfico das diferenças entre cotas DGPS e MDT.

Nesta **Figura 6** os valores mais próximos de 0 apresentam uma diferença menor entre o ponto no terreno e o MDT, isto é, são os mais precisos. Nos MDTs gerados com curvas de nível de 10 e 5 m as diferenças praticamente não ultrapassam 10 m. Observa-se uma tendência das cotas do MDT possuírem valores menores que as cotas obtidas pelo DGPS. Nos MDTs criados com curvas de 20 m identifica-se uma diferença máxima de até 50 m, além de uma tendência das cotas apresentarem valores maiores que as adquiridas pelo DGPS. Observou-se que nas áreas com cotas mais baixas, ou seja, nos vales as diferenças (DGPS – MDT) foram menores, enquanto nas maiores altitudes, os valores obtiveram maior discrepância. Os MDTs 20 Linear e Não-Linear mesmo não possuindo uma boa precisão (quantitativa) na altimetria representam adequadamente o relevo na área. Veja a **Figura 7** onde se observa uma visão 3D do relevo estudado, verifica-se que o planalto, as escarpas e os

vales estão bem mapeados, ou seja, as feições topográficas possuem coerência, com uma representação cartográfica satisfatória.

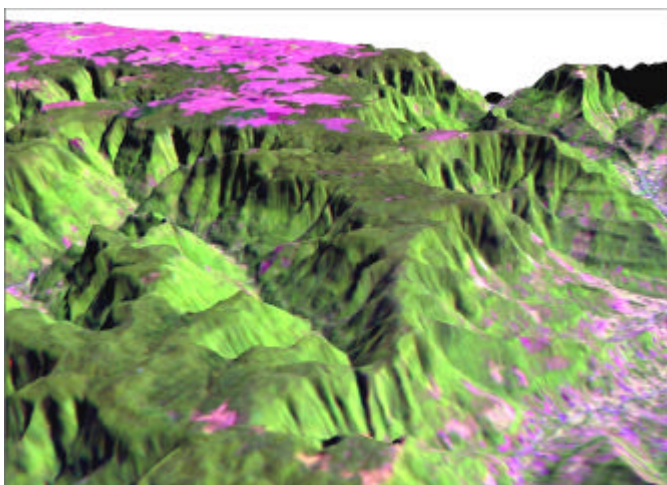


Figura 7 - Visão 3D da área de estudo, gerada a partir do MDT 20 Linear, sobreposição de uma imagem TM/Landsat-5 bandas R5G4B3.

Além da análise do EMQ e da observação das diferenças entre os pontos, utilizou-se um teste mais robusto para a validação dos dados. Foi aplicado o Teste de Qualidade do Ajuste, conforme Zwillinger e Kokoska (1999). Neste teste é usada a Distribuição Qui-Quadrado para comparar o ajuste de um par de dados, os resultados estão na **Tabela 3**. Assim, de acordo com a legislação Cartográfica Brasileira que determina um intervalo de confiança de 90% para testes de validação de dados, tem-se:

$H_0: \Delta h = 0$ hipótese de aceitação; $H_1: \Delta h \neq 0$ hipótese de rejeição

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(\Delta h)^2}{h_{MDT}} = \sum_{i=1}^k \frac{(h_{DGPS} - h_{MDT})^2}{h_{MDT}} \quad (2)$$

Sendo que $c^2 \leq c^2_{\alpha, k-1}$

Onde: $\alpha = 0,10$: nível de significância; $k - 1$: graus de liberdade.

Tabela 3 – Teste de Qualidade do Ajuste do MDTs.

	MDT 10 Linear	MDT 10 Não-Linear	MDT 10 Linear *	MDT 20 Linear	MDT 20 Não-Linear	MDT 20 Linear *
Nº pontos testados	29	29	29	52	52	52
α	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
$k - 1$	28	28	28	51	51	51
χ^2	0.6143	0.6235	0.6109	61.0792	61.3294	60.9425
$\chi^2_{\alpha, k-1}$	37.9160	37.9160	37.9160	64.2950	64.2950	64.2950

* MDTs gerados com *pixels* de 5x5 m.

Segundo o teste realizado e apresentado na **Tabela 3**, observa-se que todos MDTs são aceitos, pois a hipótese H_0 é satisfeita, ou seja, o valor calculado é menor que o valor tabelado da estatística Qui-Quadrado, contemplando a condição $c^2 \leq c^2_{\alpha, k-1}$. No Teste de Qualidade do Ajuste, assim como no cálculo do EMQ, os melhores resultados foram dos MDTs gerados com curvas de nível de 10 e 5 m.

4. Conclusão

Os resultados obtidos com os testes indicam que, a partir de uma análise exclusivamente quantitativa ficariam descartados os MDTs 20 m, por outro lado estes dados representam adequadamente as feições do terreno.

A melhor representação cartográfica quantitativa e qualitativa para área foi dos MDTs 10 m, pelo fato das curvas de nível apresentarem menor equidistância entre si, modelando com maior rigor o relevo. O vôo aerofotogramétrico de 1999 foi pré-sinalizado, e a aquisição dos pontos de controle para a restituição feita com um *DGPS*. Um sistema que atualmente vem proporcionando resultados satisfatórios para aquisição de dados cartográficos. A aquisição dos dados que deram origem as curvas de nível com equidistância 10 e 5 m foi realizada numa escala mais detalhada que aquela do levantamento de 1975.

Concluindo, destaca-se que o conhecimento do grau de precisão dos MDTs gerados é extremamente importante, pois auxilia na tomada de decisão sobre qual o melhor MDT a ser usado no processo de orto-retificação de imagens de satélite de alta resolução espacial, além de indicar a precisão do produto cartográfico final.

5. Referências bibliográficas

Ackermann, F. Techniques and Strategies for DEM Generation. In: Digital Photogrammetry An Addendum to the Manual of Photogrammetry. ASPRS - American Society for Photogrammetry and Remote Sensing Ed. Cliff Greve, Chapter 6 pp 135 – 149, 1996.

Barbosa, O. C. *Correção Geométrica de Imagens SPOT com uso de um Modelo Digital de Elevação*. São José dos Campos. 167 p. (INPE – 5014 – TDL/401). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1990.

Bertoletti, A.C.R. *Centro de Pesquisas e Conservação da Natureza Pró-Mata*. Divulgação do Museu de Ciência e Tecnologia – UBEA/PUCRS, Porto Alegre, n. 2. 47 p. 1995.

ERDAS. *Erdas Image Tour Guides*. Atlanta Georgia 2001, 662 p.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. Normas Cartográficas [On line] <<http://concar.ibge.gov.br/CCA32.HTML>>. Out. 2001.

Maune, D. F. Introduction to Digital Elevation Models (DEM). Digital Photogrammetry An Addendum to the Manual of Photogrammetry. ASPRS - American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. Ed. Cliff Greve, Chapter 6 pp 131 – 141, 1996.

Santos, C. J. B. dos; Silva, J. F. C. da; Mello, M. P. de. Avaliação da qualidade de Modelos Digitais do Terreno construídos a partir de diferentes fontes de aquisição de dados. In: Congresso de Cartografia. *Anais*. Porto Alegre. Seção Pôster, Fotogrametria. [CD ROM]. 2001.

Villwock, J. A. São Francisco de Paula e o Planalto das Araucárias: Um ponto de vista geológico. In: Richter, M. (org.) *Conservação da Biodiversidade e Desenvolvimento Sustentável de São Francisco de Paula – Um Plano de Ação Preliminar*. EDIPUCRS, Porto Alegre, pp. 53 – 64, 1998.

Wolf, P.R. *Elements of Photogrammetry, with Air Photo Interpretation and Remote Sensing*. Second Edition. New York, McGraw-Hill Book Company, 1983, 628 p.

Zwillinger, D.; Kokoska, S. *Standard Probability and Statistics Tables and Formulae*. London. Chapman & Hall/CRC, 1999. 554 p.

Agradecimentos:

Ao Dr. Jorge A. Villwock da PUCRS que tem apoiado com entusiasmo o nosso trabalho, a 1ª. Divisão de Levantamento do Exército - DSG e ao Prof. Dr. Rainer Wagelaar da Universidade de FH. Rottenburg por disponibilizarem os dados utilizados neste estudo. Aos Engenheiros Cartógrafos Cleber Gonzales de Oliveira e Paulo César Gurgel de Albuquerque do INPE pelo auxílio neste trabalho.