

GERAÇÃO DE MODELO DIGITAL DE TERRENO A PARTIR DE MAPAS DIGITAIS 3D: ESTUDO DE CASO VISANDO GARANTIR O CONTEXTO GEOMORFOLÓGICO COM REDUÇÃO DOS DADOS AMOSTRAIS

Generating Digital Terrain Model (DTM) from 3D digital maps: a case study aiming at preserving geomorphological characteristics while reducing sample data

MARIA DE LOURDES DE AQUINO MACEDO GONÇALVES¹

Prof. CARLOS ALBERTO PICANÇO CARVALHO, Ph.D.²

Prof. ANTÔNIO JOSÉ BERUTTI VIEIRA, M.Sc.³

Curso de Pós Graduação em Ciências Geodésicas – UFPR

¹mlaquino@brturbo.com.br; ²carlosac@inf.ufpr.br; ³berutti@geoc.ufpr.br

RESUMO

Usualmente, o Modelos Digitais do Terreno (MDT) são gerados a partir de curvas de nível e pontos altimétricos. Existem dois inconvenientes quanto à utilização somente destes dois tipos de feições: o volume de dados amostrais, que pode ser enorme, tanto para a manipulação como para o armazenamento do MDT; e a possibilidade do MDT apresentar mesmo assim inconsistências geomorfológicas. Com este trabalho, pretende-se propor uma sistematização para geração do MDT a partir de mapas digitais 3D, com uma diminuição da quantidade de dados amostrais, principalmente com uma maior equidistância vertical entre as curvas de nível. Para garantir o contexto geomorfológico estão sendo introduzidas feições topográficas estruturais no conjunto de dados amostrais, por serem feições que caracterizam o contexto geomorfológico do terreno. Para se realizar as análises, inicialmente, foi gerado um MDT com todas as feições altimétricas disponíveis no mapa digital 3D. Sucessivamente, foram gerados modelos, reduzindo-se o volume de dados amostrais progressivamente. Das análises realizadas pode-se concluir que a redução do volume de dados amostrais foi significativa e o MDT não apresentou alteração no contexto geomorfológico do terreno.

ABSTRACT

Digital Terrain Models are usually generated from contours and elevation points. There may be two problems if only these kinds of data are used: the large volume of data that affects DTM generation, manipulation and storage, and the possibility of DTM inconsistancies. This project aims at proposing a systematic approach for the generation of DTM reducing the amount of sample data, mainly using a larger contour interval. In order to preserve geomorphological characteristics (topographic characteristic of the landscape), structural features were added to the sample data. At first a DTM was created from the original 3D digital map. Then, Digital Terrain Models were generated by progressively reducing the amount of sample data. These Digital Terrain Models were then analyzed by statistical report; visual analysis; numerical analysis; volume analysis; analysis of mean square error. The statistical report allowed for the analysis of the number of vertices, sides, triangles and file size of each different DTM. The visual analysis was accomplished by overlaying the contours of original digital map and those contours generated from DTM. The numerical analysis was based on the Brazilian Map Standard Error for topographic maps, according to the elevation error of control points. The volume analysis was the comparison of the volume of each DTM. Finally the mean square error was analyzed by comparing the value obtained for each DTM to the one established in the Brazilian Federal Government Regulation for quality control of topographic maps (Decreto 89.817). The results confirmed the initial assumption that the reduction in the sample data amount does not cause significant errors in terrain geomorphology, since structural features are used to generate DTM.

1 INTRODUÇÃO

O Modelo Digital de Terreno (MDT) é uma representação digital do terreno (WEIBEL e HELLER, 1991, p.01). O MDT tornou-se muito utilizado, principalmente em Ciências Geodésicas, por permitir a derivação de diversos produtos tais como mapa de declividade, curvas de nível, cálculo de corte/aterro, visualização 3D (BURROUGH, 1986, p. 01).

Para a geração do MDT, é necessário obter informações altimétricas do terreno que garantam o contexto geomorfológico do mesmo. Usualmente, são utilizadas curvas de nível e pontos altimétricos como fonte de informação altimétrica. Porém, o MDT, gerado a partir de curvas de nível e pontos altimétricos como as únicas fontes de informação altimétrica, têm dois inconvenientes:

- a) resultar num grande volume de dados, que interfere no processamento e manipulação dos dados, pois o tempo gasto na execução destas tarefas depende do volume de dados. A armazenagem também é prejudicada, porque o espaço computacional também depende do volume de dados;

- b) apresentar inconsistências (triângulos horizontais e aresta de triângulos interceptando feições topográficas estruturais), que alteram a representação do terreno.

Neste estudo os dados amostrais foram extraídos de mapas digitais 3D, tais mapas possuem suas feições referidas por três coordenadas. Conseqüentemente, pode-se utilizar feições topográficas estruturais, tais como sistema viário e linhas características, na geração do MDT. Segundo Felgueiras (1999, p.17) as linhas características são os canais de drenagem (linhas de mínima altitude) e divisores d'água (linhas de máxima altitude). Estas feições auxiliam a garantir o contexto geomorfológico, tornando o modelo mais adequado a realidade. Em contrapartida, ao serem inseridas, aumentam o volume de dados amostrais. Assim, neste estudo aumentou-se a equidistância vertical entre as curvas de nível, com a eliminação de algumas curvas de nível, para reduzir o volume de dados amostrais.

Para a realização da pesquisa, utilizou-se o programa computacional *MicroStation* da Bentley e seu módulo *GeoTerrain*. O *MicroStation* é um sistema *CAD* que possibilita a criação, edição e manipulação de mapas digitais. O sistema *MicroStation* admite a organização de dados em até 63 níveis de informação. As feições introduzidas nos níveis podem ter atributos distintos (como cor, espessura do traço, tipo de linha). O *GeoTerrain* é um módulo do *MicroStation*, destinado à geração, manipulação, interpretação e visualização do MDT. No *GeoTerrain*, os dois modelos básicos são identificados como *TIN* (irregular) e *LATTICE* (regular, neste modelo os vértices são obtidos com interpolação dos dados amostrais).

Neste estudo foi utilizado o *TIN* porque a estrutura deste modelo é mais propícia para a inclusão das feições topográficas estruturais (FELGUEIRAS, 1999, p.17). Como neste modelo os vértices da triangulação são os pontos amostrais, não é necessária uma interpolação para gerar o modelo, o que pode interferir no resultado das análises.

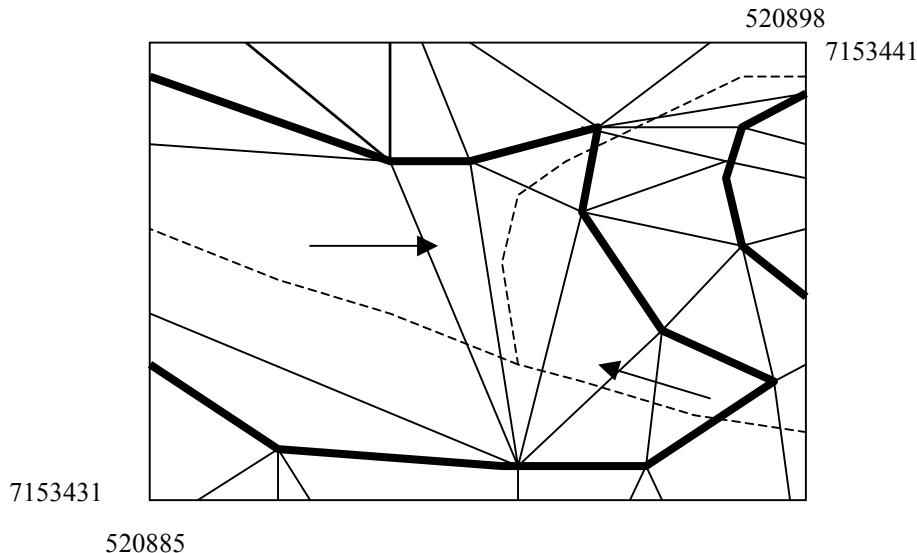
Kumler (1994, p.01) define *TIN* como uma malha de elementos triangulares que modela o relevo. A geração do modelo *TIN* é realizada diretamente sobre os dados amostrais (BURROUGH, 1986, p.42), ou seja, os vértices dos triângulos são os pontos amostrais coletados. McCullagh (citado em HUTCHINSON E GALLANT, 1999 p.110) afirma que a triangulação é um método atrativo, que é motivado por sua capacidade de adaptação aos vários tipos de terrenos.

Neste trabalho para a geração da malha triangular *TIN*, foi obedecido o critério de Delaunay. Este critério procura maximizar os ângulos dos triângulos. A malha deve conter triângulos com geometria mais próxima possível de equiláteros, evitando a criação de triângulos afinados (FELGUEIRAS, 1999, p.16).

O *TIN* gerado a partir de curvas de nível e obedecendo somente ao critério de Delaunay apresenta dois tipos de inconsistências, que são descritas por SCHNEIDER (1998, p.05) como:

- a) Triângulos Horizontais – são triângulos gerados ao longo dos braços das curvas de nível. Também exemplificados por FELGUEIRAS (1999, p.17) como triângulos patamares, onde os vértices estão todos na mesma curva de nível. Podem ser encontrados em áreas fechadas por uma curva de nível e em regiões que têm canais de drenagem que não foram considerados. Então existe a necessidade de minimizar a incidência de triângulos horizontais para garantir o contexto geomorfológico do terreno (SCHNEIDER, 1998, p.5).
- b) Arestas de Triângulos Interceptando Estruturas Topográficas Lineares – a detecção e correção são simples se as estruturas topográficas lineares forem consideradas na modelagem. As feições interceptadas geralmente são canais de drenagem, divisores d'água e outras feições topográficas lineares, que agem como linhas de quebra. Esta inconsistência na triangulação provoca também o surgimento de triângulos horizontais (SCHNEIDER, 1998, p.5), citados na seção anterior. Na Figura 1, mostra-se um exemplo de triângulos horizontais gerados no interior de uma curva de nível. Verifica-se que as arestas dos triângulos horizontais interceptam estruturas topográficas lineares (canais de drenagem).

Figura 1 – Triângulos horizontais e arestas de triângulos interceptando canais de drenagem



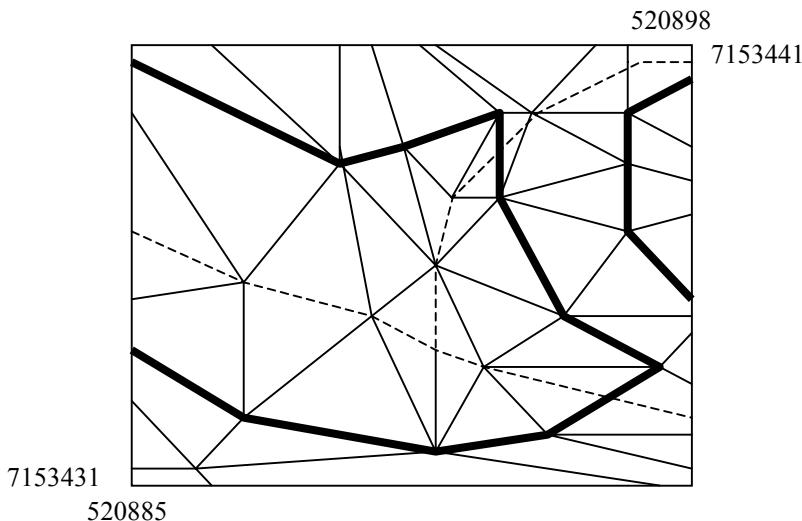
Legenda:



Curva de Nível
 Triangulação
 Canais de Drenagem

Na Figura 2, mostra-se o comportamento da triangulação, quando são inseridos canais de drenagem. Confrontando as Figuras 1 e 2, percebe-se que, na Figura 2, a triangulação foi modificada – não passando sobre o canal de drenagem, não gerando assim triângulos horizontais.

Figura 2 – *TIN* sem triângulos horizontais



Legenda:

- Curva de Nível
- Triangulação
- Canais de drenagem

FELGUEIRAS (1999, p.17) sugere a utilização do critério de Delaunay com restrições, definido como uma triangulação que deve considerar inicialmente as características topográficas da superfície em estudo e, posteriormente, o critério de Delaunay. Adotam-se restrições para que o resultado da modelagem mantenha o contexto geomorfológico da superfície (PRIES, citado em HUTCHINSON E GALLANT, 1999, p.110). Assim, o processo de geração da triangulação é interrompido quando alcançar pontos que definam uma estrutura topográfica linear como, por exemplo, canais de drenagem, e é reiniciado a partir destes pontos. Para

que estas restrições sejam obedecidas, é necessário incorporar linhas características (feições topográficas estruturais), que são identificadas como canais de drenagem; linhas divisoras d'água e linhas de crista (FELGUEIRAS, 1999, p.17).

Com este trabalho, propõe-se uma sistematização para geração do MDT a partir de dados de mapas digitais 3D. Utilizou-se curvas de nível, pontos altimétricos isolados, canais de drenagem, sistema viário e linhas características como dados amostrais para gerar o MDT e estabelecer a eqüidistância vertical mais adequada entre as curvas de nível. Os modelos foram avaliados por meio de seus produtos (curvas de nível, erro altimétrico dos pontos de controle) em termos de qualidade posicional. Com a redução do volume de dados amostrais, também houve redução do arquivo que armazena o MDT e no tempo de processamento computacional para geração do MDT. Com isto, houve contribuição:

- a) funcional - o usuário, ao manipular o MDT, obtém respostas com maior rapidez, o que proporciona um melhor aceite da técnica, contribuindo para melhorar a exploração do MDT;
- b) econômica - o custo para levantamento da informação altimétrica utilizada na geração do MDT será reduzido;
- c) intercâmbio empresa/usuário - o MDT poderá ser enviado ao usuário via *internet*, facilitando a comunicação entre as partes envolvidas no processo de geração e manipulação do MDT.

2 ÁREAS DE ESTUDO

Para a execução da pesquisa, foram utilizados mapas digitais 3D da área urbana de Rio Azul, município do Estado do Paraná, com escala de 1:2.000 e eqüidistância vertical entre as curvas de nível de um metro. Este município possui uma área de aproximadamente 613km².

Os mapas digitais foram produzidos pela empresa Esteio Aerolevantamentos S. A., sob contrato do Serviço Social Autônomo Paranacidade. O vôo, apoio de campo, aerotriangulação e restituição foram realizados em 1998. A projeção utilizada é a Universal Transversa de Mercator - UTM.

Para a realização dos estudos preliminares, adotou-se uma área-piloto, representada por uma pequena região com canais de drenagem e com características rurais, ou seja, sem a presença de quadras, lotes e edificações. Este procedimento facilitou o entendimento e a análise de como o MDT é gerado e possibilitou a detecção de incoerências altimétricas e a realização de testes para sua correção.

A área-piloto escolhida está situada no mapa digital 520-152, região compreendida entre as coordenadas (520.800m E; 7.153.200m N) e (521.400m E; 7.153.600m N), que abrange uma área de 0,24 km².

Um segundo estudo foi realizado no mapa digital 518-152, região compreendida entre as coordenadas (518.600m E; 7.152.600m N) e (520.200m E; 7.153.600m N), que abrange uma área de aproximadamente 1,6 km².

2.1 NOMENCLATURA DOS MDT GERADOS

Para a pesquisa foram gerados cinco modelos para cada área escolhida. Estes foram denominados *res* (porque os mapas digitais 3D foram gerados por restituição), seguidos de abreviaturas que permitissem a identificação imediata das principais feições extraídas para geração do conjunto de dados amostrais, sendo que:

- a) *t* – utilizaram-se todas as feições que possuem informação altimétrica, ou seja, curvas de nível com eqüidistância vertical de um metro, pontos altimétricos isolados, canais de drenagem, sistema viário, edificações, divisores d'água, limite da área trabalhada e linhas características;
- b) *l* – utilizaram-se apenas as curvas de nível com eqüidistância vertical de um metro, os pontos altimétricos e o limite da área trabalhada;
- c) *5* – utilizaram-se as mesmas feições do MDT “*rest*”, porém as curvas de nível foram extraídas com um eqüidistância vertical de cinco metros;
- d) *10* – utilizaram-se as mesmas feições do MDT “*rest*”, porém as curvas de nível foram extraídas com eqüidistância vertical de dez metros;
- e) *div* – utilizaram-se os pontos altimétricos isolados, canais de drenagem, sistema viário, edificações, divisores d'água, limite da área trabalhada e linhas características, ou seja, as curvas de nível não foram extraídas do mapa digital.

3 PROCESSO DA PESQUISA

3.1 EXTRAÇÃO DOS DADOS AMOSTRAIS

O processo de extração dos dados amostrais é a primeira etapa para a geração do MDT. Neste processo é gerado um arquivo de dados, com as coordenadas X, Y e Z dos vértices das feições selecionadas.

Classificam-se as feições extraídas, segundo os tipos de dados admitidos pelo *GeoTerrain*. Os tipos de dados são identificados com os números de 1 a 8, e são os seguintes:

- *Spot* – elemento pontual. Constituído por um único ponto altimétrico, identificado pelo número 1;
- *Break line* – elemento linear. Representa as feições topográficas estruturais lineares, tais como: canais de drenagem; sistema viário e linhas características. A feição identificada como *break line* não permite que a triangulação se sobreponha a ela. A triangulação é interrompida e reiniciada após esta feição. A *break line* tem o primeiro vértice identificado pelo número 2 e a seqüência de vértices identificados pelo número 3;
- *Boundary* – elemento linear fechado. Representa o limite da área trabalhada, sendo que seus vértices possuem informação altimétrica. Quando o MDT

contém o limite da área trabalhada, a triangulação não excede este limite. Este elemento é identificado pelo número 4.

- *Contour* – elemento linear. Constituído por curvas de nível do mapa digital. O primeiro vértice é identificado pelo número 5 e a seqüência de vértices identificados pelo número 6;
- *Void* – elemento de área fechada. Possui informação altimétrica em seu contorno. Tal elemento não permite que se gere triangulação em seu interior. O elemento *void* é usado para caracterizar regiões de alagados, lagos, rios de margem dupla e edificações, pois tais feições possuem o mesmo valor altimétrico em seu interior. O primeiro vértice do *void* é identificado pelo número 7 e a seqüência de vértices identificados pelo número 8.

Como estratégia de trabalho, optou-se por identificar as feições por meio dos níveis que elas ocupam. Esta estratégia foi adotada pelo fato de feições distintas já estarem distribuídas em níveis diferentes.

4 ANÁLISE DOS PRODUTOS DERIVADOS DOS MDT

A análise consiste em verificar se o contexto geomorfológico do terreno foi mantido após a redução do volume de dados amostrais e também se a redução de volume de dados é significativa. Nesta pesquisa analisaram-se produtos derivados do MDT, tais como as curvas de nível interpoladas a partir do modelo *TIN* e o erro altimétrico apresentado nos pontos de controle.

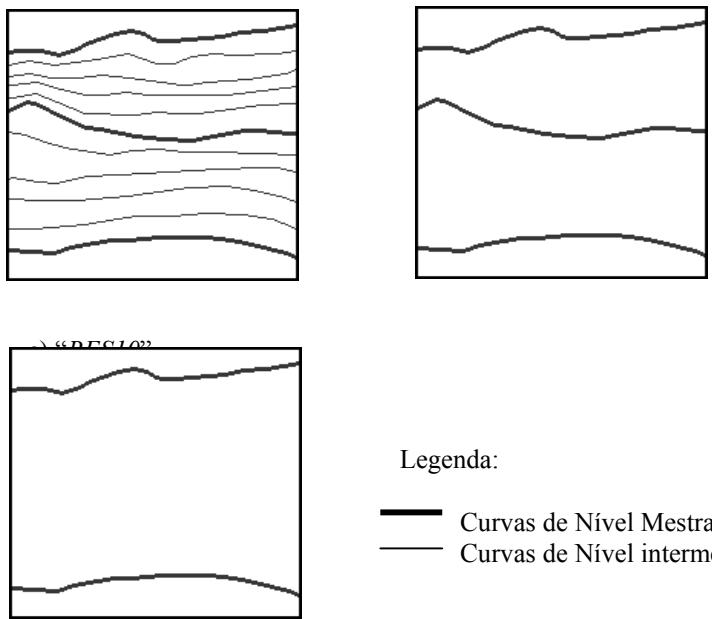
4.1 RELATÓRIO ESTATÍSTICO DO *TIN*

Quando acionada, esta rotina, disponível no *GeoTerrain*, cria um relatório sobre o *TIN* selecionado, informando o número de vértices; o número de linhas; o número de triângulos; o número de *voids*; o modo de interpolação; e o valor máximo e mínimo das coordenadas X, Y e Z. Adotou-se o MDT “*rest*” como parâmetro para os demais, por ser o MDT que utiliza todas as feições altimétricas utilizadas na realização do projeto.

O MDT “*rest*” apresentou uma redução no volume de dados de, basicamente, 20% para as duas áreas de estudo. Mesmo com esta redução, este MDT ainda apresenta um grande volume de dados. Também é importante ressaltar que, apesar de possuir um grande volume de dados, este MDT apresenta inconsistências (triângulos horizontais e aresta de triângulo interceptando feições topográficas estruturais), que interferem na qualidade da informação altimétrica do mesmo.

O MDT “*res5*” apresentou uma redução média no volume de dados de 61% (para as duas áreas de estudo). O tamanho do arquivo “*dxf*” do “*res5*” é de 1,5 MB, enquanto que o do “*rest*” é de 3,8 MB, ambos para a área de estudo denominada folha (área de 1 km²). Esta diminuição de volume de dados foi obtida com a eliminação das curvas de nível intermediárias.

Para o MDT “*res10*”, a redução média de volume é de 69% e para o MDT “*resdiv*”, a redução média é de 78%. Comparando-se as reduções dos três últimos MDT (“*res5*”, “*res10*”, “*resdiv*”), pode-se afirmar que a redução obtida no “*res5*” é mais significativa que a obtida nos MDT “*res10*” e “*resdiv*”. Isto porque as curvas de nível, dentre as feições utilizadas neste estudo, são as que ocupam maior espaço computacional. Para cada intervalo altimétrico de dez metros, existem oito curvas de nível intermediárias e apenas três curvas de nível mestras. Como no “*res5*” utilizaram-se apenas curvas de nível mestras, eliminando-se todas as curvas de nível intermediárias, este obteve a redução mais significativa. Na sequência, são apresentadas três figuras que ilustram a eliminação das curvas de nível utilizadas para geração dos modelos. Na Figura 3 (a), apresentam-se as curvas de nível mestras e intermediárias utilizadas na geração do MDT “*rest*”. Na Figura 3 (b), mostram-se as curvas de nível mestras utilizadas na geração do MDT “*res5*”, neste modelo não foram utilizadas curvas de nível intermediárias, pode-se comprovar, observando as Figuras 3 (a) e (b), que foram eliminadas 8 curvas de nível intermediárias na Figura 3 (b). Na Figura 3 (c), apresentam-se as curvas de nível mestras, com equidistância vertical de 10 metros, utilizadas na geração do MDT “*res10*”. Comparando a Figura 3 (b) e (c), percebe que apenas uma curva de nível mestra da Figura 3 (b) foi eliminada na Figura 3 (c) .



A redução de volume obtida para os MDT é importante em termos de espaço computacional para armazenagem do MDT, tempo de processamento e custo para obtenção (levantamento de campo, restituição e outros) das feições utilizadas no processo de extração. Desta forma, com a eliminação das curvas de nível intermediárias, alcançou-se o objetivo de reduzir o volume de dados.

4.2 ANÁLISE GRÁFICA

A análise gráfica consiste em comparar as curvas de nível do mapa digital e as curvas de nível interpoladas a partir dos MDT. Optou-se por realizar esta análise porque ela permite visualizar o comportamento global das curvas de nível interpoladas a partir dos modelos, permitindo uma análise qualitativa do contexto geomorfológico da representação. O *GeoTerrain* traça as curvas de nível a partir do *TIN* por meio de interpolação linear.

Não houve deslocamento das curvas de nível geradas a partir do MDT “*rest*”, com relação ao mapa digital. O resultado encontrado na análise visual foi o esperado, já que todas as curvas de nível existentes no mapa digital foram utilizadas no processo de extração. Ou seja, o *TIN* possui como vértices, entre outros, os vértices de todas as curvas de nível do mapa digital.

O MDT “*res1*” também não apresentou deslocamento das curvas de nível interpoladas em relação às curvas de nível do mapa digital. Este resultado também estava previsto pelo mesmo motivo já explicado para o MDT “*rest*”, porém este MDT apresentou triângulos horizontais e arestas de triângulos interceptando feições topográficas estruturais (inconsistências).

No MDT “*res5*” houve um pequeno deslocamento em algumas curvas de nível e um deslocamento maior em regiões onde o comportamento entre as curvas de nível, mestres e intermediárias, do mapa digital não é semelhante. Pode-se afirmar que na análise gráfica as curvas de nível geradas a partir do MDT “*res5*” mantiveram o contexto geomorfológico do terreno. Os modelos “*res10*” e “*resdi*” apresentaram um deslocamento que alterou a representação do relevo, assim descartou-se a possibilidade de utilização destes modelos.

4.3 ANÁLISE NUMÉRICA

Para realizar a análise numérica, utilizou-se pontos de controle, que são pontos com a altitude conhecida e que não foram utilizados na geração dos modelos para não influenciar a análise. Foi realizada uma comparação do valor altimétrico dos pontos de controle no mapa digital e seu valor altimétrico ajustado à superfície do *TIN*. Como a legislação atual não possui nenhum instrumento que normatize a classificação de MDT ou produtos derivados, no presente estudo utilizou-se o Decreto nº 89.817, de 20 de junho de 1984, o qual estabelece normas para classificar cartas.

“90% (noventa por cento) dos pontos isolados de altitude, obtidos por interpolação de curvas de nível, quando testados no terreno, não deverão apresentar erro superior ao Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) – Altimétrico: estabelecido”.

As cartas são classificadas nas Classes A, B e C, segundo os critérios:

- Classe A - PEC altimétrico é de 1/2 (metade) da eqüidistância entre as curvas de nível;
- Classe B - PEC altimétrico é de 3/5 (três quintos) da eqüidistância entre as curvas de nível;
- Classe C - PEC altimétrico é de 3/4 (três quartos) da eqüidistância entre as curvas de nível.

Na Tabela 1 mostra-se o intervalo de deslocamento altimétrico para as três classes, estabelecidos no Decreto, e a porcentagem de pontos de controle dos MDT “*res5*”, “*res10*” e “*resdiv*” que pertencem a tais intervalos. Na Tabela 8, mostra-se o intervalo de deslocamento altimétrico para as três classes, estabelecidos no Decreto nº 89.817, e a porcentagem de pontos de controle dos MDT “*res5*”, “*res10*” e “*resdiv*” que pertencem a tais intervalos.

Tabela 1 – Análise Numérica da Área-piloto

CLASSE	INTERVALO	RES5	RES10	RESDIV
A	0 à $\pm 0,5$ m	77%	62%	60%
B	0 à $\pm 0,6$ m	84%	68%	64%
C	0 à $\pm 0,8$ m	91 %	79 %	75 %

Tabela 2 – Análise Numérica da Folha

CLASSE	INTERVALO	RES5	RES10	RESDIV
A	0 à $\pm 0,5$ m	74%	64%	57%
B	0 à $\pm 0,6$ m	80%	70%	62%
C	0 à $\pm 0,8$ m	88 %	78 %	73 %

Para a área-piloto o MDT “*res5*” pertence a classe C, porque 91% dos pontos de controle apresentaram um deslocamento altimétrico entre 0 e $\pm 0,8$ m. Os modelos “*res10*” e “*resdiv*” não obtiveram classificação. Da análise da tabela 2, pode-se afirmar que nenhum dos modelos obteve classificação, porém no MDT “*res5*” 88% dos pontos de controle apresentaram deslocamento altimétrico entre 0 e $\pm 0,8$ m. Mas é importante ressaltar que a região de estudo denominada folha é uma região com uma rede de drenagem escassa, o que prejudicou a geração do MDT, pois estas são feições topográficas estruturais. Também existem regiões planas nesta mesma área, porém com poucos pontos altimétricos isolados, ou seja, a informação altimétrica destas regiões não é adequada para a geração do MDT. Assim, com a análise numérica, afirma-se a viabilização de uso do MDT “*res5*”.

4.4 ANÁLISE VOLUMÉTRICA

Foi calculado o volume de corte dos modelos em relação a um plano horizontal com altitude 850 m. A altitude do plano horizontal é inferior à altitude da curva de nível de menor valor altimétrico, porque, desta maneira, o volume calculado apresenta somente corte, facilitando a análise.

Calculou-se a diferença volumétrica, em porcentagem, entre o MDT “rest” e os demais modelos, os resultados encontrados foram:

- “res1” - +0,01% para a área piloto e +0,02% para a “folha”;
- “res5” - -0,4% para a área piloto e -0,4% para a “folha”;
- “res10” - -1,1% para a área piloto e -0,7% para a “folha”;
- “resdiv” - -1,4% para a área piloto e -2,2% para a “folha”.

Segundo Church (1981, p.4-5) a precisão no cálculo do volume depende da fórmula utilizada, sendo que as mais utilizadas possuem uma precisão que varia de 0,5 a 3%. Analisando os resultados, percebe-se que o cálculo do volume dos MDT não apresentou uma mudança significativa com a redução do volume de dados amostrais, ou seja, a redução de volume de dados não prejudicou o cálculo volumétrico dos MDT,

4.5 ANÁLISE DO ERRO MÉDIO QUADRÁTICO

Também nesta análise foi utilizado o Decreto nº 89.817, de 20 de junho de 1984, Artigo 8º, parágrafo 4, que estabelece que as expressões Erro-Padrão, Desvio-Padrão e Erro Médio Quadrático são equivalentes. Assim, utilizou-se o erro médio quadrático para classificar os MDT, obedecendo ao estabelecido no Decreto para cartas com escala 1:2000.

- a) Classe A – o erro médio quadrático corresponde a 1/3 da eqüidistância altimétrica da carta;
- b) Classe B – o erro médio quadrático corresponde a 2/5 da eqüidistância altimétrica da carta;
- c) Classe C – o erro médio quadrático corresponde a ½ da eqüidistância altimétrica da carta.

Na Tabela 3, apresenta-se o valor máximo do erro médio quadrático para as classes A, B e C. Estes valores foram calculados para cartas com eqüidistância vertical de um metro, por ser a eqüidistância vertical do mapa digital trabalhado.

Tabela 3 - Máximo Erro Médio Quadrático das Classes

CLASSE	E. M. Q.
A	0,33
B	0,4
C	0,5

Na Tabela 4, mostra-se o valor do erro médio quadrático correspondente às três classes A, B ,e C e o valor do erro médio quadrático obtido para os MDT.

Tabela 4– Erro Médio Quadrático

Classe	Erro Médio Q.	MDT					
		ÁREA-PILOTO			FOLHA		
		RES5	RES10	RESDIV	RES5	RES10	RESDIV
A	0,33						
B	0,4						
C	0,5	0,41					
nenhuma	> 0,5		0,71	0,83	0,57	0,83	1,6

Na Tabela 4 observa-se que o MDT “res5” da área-piloto obteve classificação C, sendo que os demais MDT não obtiveram classificação. Porém, o valor do erro médio quadrático do MDT “res5” da folha é 0,57 m, não atingindo classificação, o que não inviabiliza sua utilização.

É importante ressaltar novamente que o valor do erro médio quadrático obtido no “res5” da folha é superior ao valor obtido pelo mesmo MDT na área-piloto, porque a área-piloto possui um grande volume de canais de drenagem, o que não ocorre na região denominada folha.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Realizamos a presente pesquisa com o objetivo de gerar MDT, utilizando um mínimo de informação altimétrica extraída de mapas digitais 3D e garantir o contexto geomorfológico do terreno. Na análise gráfica, o MDT “res5” garantiu o contexto geomorfológico do terreno, não apresentando um deslocamento acentuado das curvas de nível interpoladas para as duas áreas estudadas. O MDT “res1”, apesar de não apresentar deslocamento das curvas de nível interpoladas a partir do MDT em relação às curvas de nível do mapa digital, apresenta alteração no contexto geomorfológico do terreno, motivada por triângulos horizontais e arestas de triângulos interceptando feições topográficas estruturais. Por este motivo e por apresentar um volume muito grande de dados amostrais, este MDT não foi objeto de estudo das demais análises. Os demais MDT, “res10” e “resdiv”, apresentaram alterações no contexto geomorfológico.

Concluímos a viabilidade de utilização do MDT “res5”, que obteve uma redução média do volume de dados amostrais, de 57% para a área-piloto e 62% para a folha, manteve o contexto geomorfológico do terreno e, segundo a classificação utilizada para cartas (PEC), o modelo da área-piloto pertence a classe C. É importante ressaltar que a redução (61%) obtida neste MDT é muito significativa para armazenamento, manipulação do MDT e, principalmente, em redução de custo para obtenção da informação altimétrica.

Com a finalização das análises dos MDT gerados no presente trabalho, concluímos que o MDT “res5” atingiu os objetivos propostos, reduzindo o volume de dados e mantendo o contexto geomorfológico do terreno. Como já foi descrito anteriormente neste trabalho os divisores d’água foram inseridos manualmente no mapa digital, porém como são feições topográficas estruturais, que auxiliam a garantir a representação do terreno, recomendamos a que estas feições sejam restituídas nos mapas digitais 3D, quando estes forem utilizados como fonte de informação altimétrica para geração de MDT, e principalmente em regiões em que o comportamento das curvas de nível não é homogêneo. Assim, o MDT gerado com estas feições manterá o contexto geomorfológico do terreno. Também recomendamos a inserção de um número maior de pontos altimétricos em regiões planas, para não comprometer a geração do MDT por escassez de informação altimétrica na região.

Ressaltamos a possibilidade de utilização do MDT como uma rotina de verificação dos mapas digitais 3D, porque, atualmente, o usuário não possui uma rotina para isto. Utilizando o MDT, é possível detectar visualmente os erros altimétricos, por meio das curvas de nível interpoladas a partir do MDT, que apresentam áreas fechadas, formando círculos contornando os vértices com altitude incorreta.

6 AGRADECIMENTOS

Ao ParanaCidade, na pessoa do Engenheiro Helder de Oliveira Guimarães, por ter auxiliado na obtenção de autorização para utilização dos mapas digitais 3D.

À Empresa Esteio de Aerolevantamentos, em especial ao Eng. Hiram Skolimowski da Silva e Eng. Amauri Alfredo Bandalize, por ter cedido os mapas digitais 3D e realizado algumas verificações sobre os mesmos.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BURROUGH, P. A., Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment, Oxford: Clarendon Press, 1986, p.39-56.
- BRASIL. Decreto-lei n.89.817, de 20 de junho de 1984. Estabelece as Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, n.120, p.8884 – 8886, 22 de junho de 1984.
- CHURCH, H. K., Excavation Handbook, United States of America: MacGraw-Hill, 1981.
- FELGUEIRAS, C. A., Introdução ao Geoprocessamento, Modelagem Numérica do Terreno, C.6, 1999. Disponível em <http://www.dip.inpe.br/~gilberto/livro/cap6-mnt.pdf>. Acessado em: 25 julho 2000.
- GMAEL, C. G., Introdução ao Ajustamento de Observações, Curitiba: Editora da Universidade Federal do Paraná, 1994. 319 p.

- GEOTERRAIN, User's Guide, United States of America, 1995. CD-ROM.
- HUTCHINSON, M.F. e GALLANT, J.C., Representation of Terrain, In: LONGLEY, P.A., GOODCHILD, M.F., MAGUIRE, D.J. e RHIND, D.W., Geographical Information Systems, England: Longman, 1999, p.105-124.
- KEATES, J. S., Cartographic design and production, London: Longman, 1973.
- KUMLER, M. P., An Intensive Comparison of Triangulated Irregular Networks (TINs) and Digital Elevation Models (DEMs), Monograph 45, Cartographica, V.31, N.2, 1994, Colorado, United States.
- MICROSTATION, User's Guide, United States of America, 1995. CD-ROM.
- SCHNEIDER, B., Geomorphologically Sound Reconstruction of Digital Terrain Surfaces from Contours, 1998. Disponível em <http://www.geo.unizc.ch/~benni>. Acessado em: 25 julho 2000.
- Vieira, A. J. B., Textos Didáticos. Mensagem recebida por: ml.aquino@uol.com.br em: 23 abr. 2001.
- WEIBEL, R. e HELLER, M., Digital Terrain Modelling. In: MAGUIRE, D. J., GOODCHILD, M. F. e RHIND, D., Geographical Information Systems, England: Longman, 1991. 649p. p. 269-294.

(Recebido em 16/10/02. Aceito para publicação em 15/05/03.)