



20 e 21 de outubro  
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE  
São José dos Campos - SP

## Determinação de Ranking para Conjuntos de Pontos Amostrais em Modelos Digitais de Terreno

Eduilson Lívio Neves da Costa Carneiro<sup>1,3</sup>, Laércio Namikawa<sup>2</sup>, Gilberto Câmara<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Programa de Doutorado em Computação Aplicada – CAP, INPE

<sup>2</sup> Divisão de Processamento de Imagens/INPE  
São José dos Campos - Brasil

<sup>3</sup> Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí – IFPI  
Teresina, PI - Brasil

eduilson, laercio, gilberto@dpi.inpe.br, eduilson@cefetpi.br

**Abstract.** *The Digital Terrain Model (DTM), represented by the TIN (Triangulated Irregular Network), is built from a set of irregularly sample points. The amount of points controls the complexity of the model and a higher complexity model needs more point than a less complex ones. The generation of this model in multiresolution can be executed by selecting a subset of items used in this generation. This subset must ensure that the produced model has the same characteristics of the full model, such as slope and orientation values. This paper presents a method to define a ranking on a set of sampling points to create a multiresolution TIN which retains the characteristics of the full model.*

**Resumo.** *Os Modelos Digitais de Terreno (MDT), representados por TIN (Triangulated Irregular Network), são gerados a partir de um conjunto de pontos amostrais irregularmente espaçados. A quantidade de pontos determina a complexidade do modelo, quanto maior a quantidade de pontos maior a complexidade do modelo e maior a sua resolução. A geração desse modelo em multirresolução pode ser obtida pela determinação de um subconjunto dos pontos utilizados na sua geração. Esse subconjunto deve garantir que o modelo gerado apresente as mesmas características do modelo completo, como declividade e orientação. Este trabalho apresenta uma metodologia para determinação de um ranking, em um conjunto de pontos amostrais, para criação de TIN multirresolução, garantindo que o modelo gerado apresente as mesmas características do modelo completo.*

**Palavras-chave:** TIN, Multirresolução, MDT.

## 1. Introdução

Os modelos digitais de terreno (MDT), como forma de representação de superfícies com seus relevos e características morfológicas, são um importante e útil componente das aplicações de sistemas de informações geográficas (SIG), realidade virtual (RV), simuladores de vôos, além de uso militar.

Os MDT são gerados a partir de dados de terrenos obtidos por técnicas de sensoriamento remoto, medições in loco nos terrenos ou através da digitalização de mapas de contorno. Existem duas formas principais de representação de MDT, por meio de grades regulares e grades irregulares. Dentre as grades irregulares a mais conhecida é a grade triangular irregular (TIN – *Triangulated Irregular Network*), definida por uma estrutura de dados digitais, em formato de vetor. Tal estrutura representa uma rede de triângulos irregulares não sobrepostos. Além de dados de relevo, outros fenômenos espaciais que podem ser representados por TIN são temperatura, informações geológicas, informações meteorológicas, dentre outras.

A vantagem de utilizar TIN ao invés de outras representações de modelos digitais de terreno, como malha regular, é porque TIN necessita de menor quantidade de dados para uma representação mais precisa do terreno. Além de uma melhor distribuição espacial dos dados de acordo com a complexidade do terreno, o que diminui consideravelmente a quantidade de dados para áreas com pouca variação de altitude, como no caso dos dados de relevo.

A disponibilização, cada vez mais crescente, de dados de relevo tem possibilitado a geração de modelos de terrenos mais complexos e de melhor qualidade. A qualidade de um MDT está diretamente relacionada à quantidade de dados utilizados no modelo. Modelos gerados a partir de grande quantidade de dados são mais complexos e com melhor resolução. No entanto, o manuseio dessa quantidade crescente de dados demanda um aumento na capacidade de armazenamento e no poder computacional.

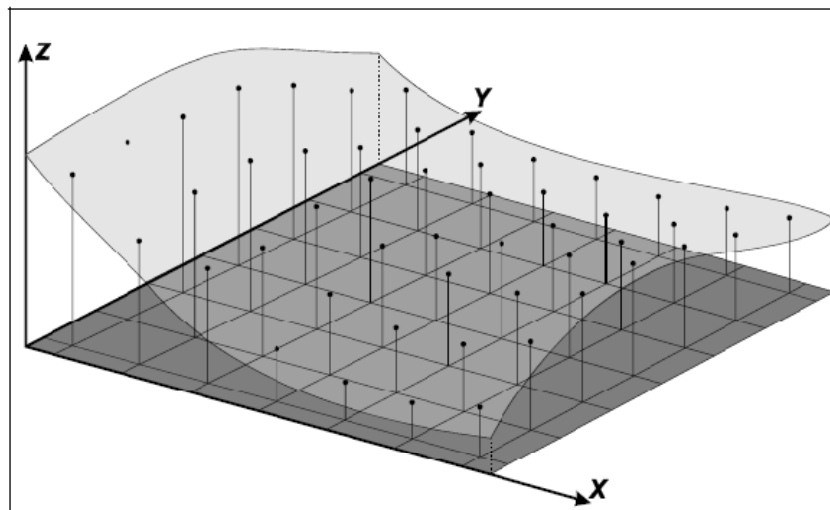
A utilização de MDT complexos está diretamente relacionada à aplicação, ou seja, existem tarefas dentro de uma mesma aplicação que necessitam de modelos em resoluções variadas. A utilização de técnicas para gerar modelos multirresolução vem suprir a necessidade dessas aplicações que utilizam modelos com resoluções diferentes. O modelo em multirresolução pode ser obtido pela determinação de subconjuntos dos dados utilizados no modelo mais completo.

Este trabalho apresenta uma metodologia para determinação de um ranking dos dados para criação de TIN multirresolução. Na seção 2 encontra-se uma revisão de trabalhos relacionados ao tema. Adiante, na seção 3, detalhamos o método desenvolvido, seguido, na seção 4, dos resultados obtidos. Nossas conclusões serão expostas na seção 5.

## 2. Trabalhos Relacionados

A grade regular é um modelo digital que representa superfícies utilizando um poliedro de faces retangulares (Figura 1). Esse poliedro, denominado grade regular, pode ter como vértices os próprios pontos amostrados, caso estes sejam regularmente espaçados. Caso contrário, a resolução da grade, ou seja, o espaçamento nos eixos x ou y deve ser idealmente menor ou igual à menor distância entre duas amostras com cotas diferentes. Uma vez definida a resolução e conseqüentemente as coordenadas de cada ponto da

grade, pode-se aplicar um método de interpolação para calcular o valor aproximado da elevação dos demais vértices da grade. Diversos métodos de modelagem multirresolução, em grades regulares, têm sido desenvolvidos [Cheng; Basu, 2007; Franklin *et al.*, 2007; Larsen; Christensen, 2003; Linsen *et al.*, 2007].



**Figura 1. Exemplo de grade regular [Namikawa *et al.*, 2003]**

Outra forma de representação para MDT é a grade triangular irregular (TIN) (Figura 2). Segundo Mark [Mark, 1997] e Berg *et al.* [2000], a grade triangular irregular é a forma padrão para representação de topografia em sistemas de informações geográficas (SIG) e em outros softwares. Neste modelo, considerando as arestas dos triângulos, é permitido que as informações morfológicas importantes, como as discontinuidades representadas por feições lineares de relevo (cristas) e drenagem (vales), sejam preservadas durante sua geração, criando modelos de terreno que preservam as feições morfológicas da superfície.

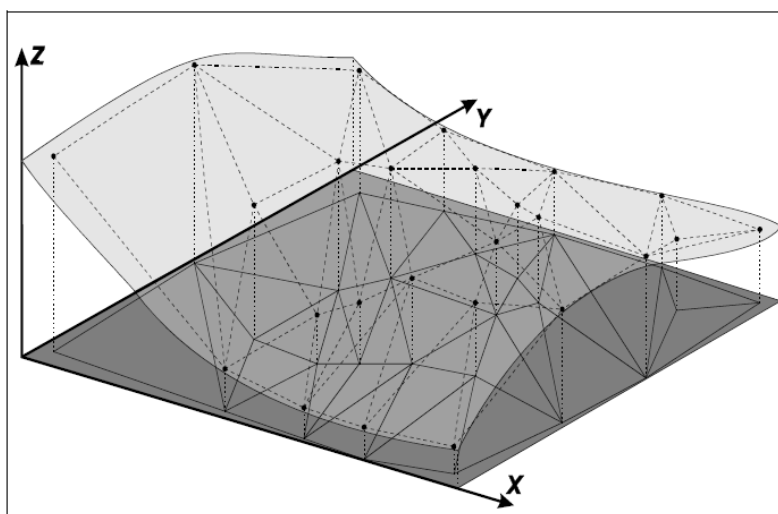
A precisão dos modelos representados por TIN está diretamente relacionada à qualidade dos pontos amostrados, ou seja, o custo do modelo tem uma relação direta com a confiabilidade das amostras [Maune, 2001]. Por exemplo, para representar áreas com grande variação na topografia através de um modelo TIN é necessária a existência de uma maior quantidade de pontos amostrais que em áreas com menor variação de topografia.

O gerenciamento dessa grande quantidade de dados demanda uma alta capacidade de processamento e memória. A simplificação de modelos TIN são amplamente usadas para melhorar o desempenho em visualizações de grandes massas de dados de terrenos [Xu *et al.*, 2006].

Segundo Fisher [2007], a pesquisa sobre modelos de elevação de terreno deve migrar dos estudos de técnicas de interpolação para o tratamento da grande quantidade de dados obtidos por dispositivos de sensoriamento remoto, tais como LIDAR - *Light Detection and Ranging*. A tecnologia LIDAR está sendo amplamente utilizada para aquisição de dados de elevação de alta resolução [Briese *et al.*, 2007; Zeng *et al.*, 2007]. Os modelos multirresolução são uma alternativa para manuseio desses dados [Danovaro *et al.*, 2005; Ribelles *et al.*, 2002; Yang *et al.*, 2005a; Yang *et al.*, 2005b; Zhou *et al.*, 2004], processando apenas os dados do modelo que atendam à necessidade do usuário num determinado momento.

Novos métodos para simplificação de grades triangulares têm surgido com objetivos diversos. Yang[2008] apresenta um método de simplificação e compressão de dados para melhorar performance na transmissão de dados espaciais pela internet. Mas, a maioria dos métodos desenvolvidos é voltada para melhorar o desempenho no processo de visualização da grade triangular [De Floriani *et al.*, 2000; Gray *et al.*, 2003; Kidner *et al.*, 2000; Yang *et al.*, 2005b].

Esses métodos têm como característica a utilização da medida de erro vertical associado aos vértices como critério de seleção dos vértices a serem eliminados, mas sem a preocupação de garantir a representatividade das informações morfológicas importantes do terreno.



**Figura 2. Exemplo de grade triangular irregular [Namikawa *et al.*, 2003]**

As regiões características de um terreno como picos, fundo de vales, passagem, bordas de buracos, dentre outros, são representadas pelas arestas dos triângulos. Os pontos amostrais que compõem essas arestas são compartilhados por triângulos que não possuem graus de declividade e orientação semelhantes. Com isso, esses pontos têm grande importância para o modelo, pois eles são vitais para a caracterização do terreno.

No entanto, em regiões do terreno em que os triângulos adjacentes, a um mesmo ponto, compartilham de um mesmo plano, ou seja, possuem declividade e orientação semelhantes, a eliminação de um ponto em comum para esses triângulos possibilita um modelo com menos pontos e mantém as características importantes do terreno.

Com base nisso, foi elaborado um método que percorre todo o modelo TIN, classificando cada vértice de acordo com sua importância para o modelo. A seguir apresentaremos o método para simplificação de grade triangular irregular voltado para geração de modelos multirresolução de terreno baseado numa classificação dos pontos amostrais que visam manter as características de declividade e aspecto aos modelos simplificados.

### **3. Método de Ordenação de Pontos Amostrais**

O método apresentado para geração de modelos multirresolução de terreno é baseado na ordenação dos vértices. A partir de uma triangulação inicial completa, cada vértice é classificado de acordo com sua importância para o modelo. Então, é possível gerar modelos simplificados que tenham a quantidade de vértices determinada. Os vértices

escolhidos serão aqueles com maior importância para o modelo, ou seja, o modelo simplificado é gerado a partir dos  $n$  vértices mais importantes para o modelo, sendo  $n$  o número de vértices informados.

O critério para classificação dos vértices utiliza as características de declividade e orientação dos triângulos adjacentes. O algoritmo para o cálculo do grau de importância dos vértices é executado para cada um dos vértices da triangulação seguindo os passos abaixo:

1. Buscar todos os triângulos adjacentes ao vértice
2. Calcular o ângulo de declividade ( $AD$ ), ângulo de orientação ( $AO$ ) e área ( $AT$ ) de todos os triângulos adjacentes
3. Calcular o fator de declividade ( $FD$ ) para todos os triângulos adjacentes

$$FD = AD \times AT$$

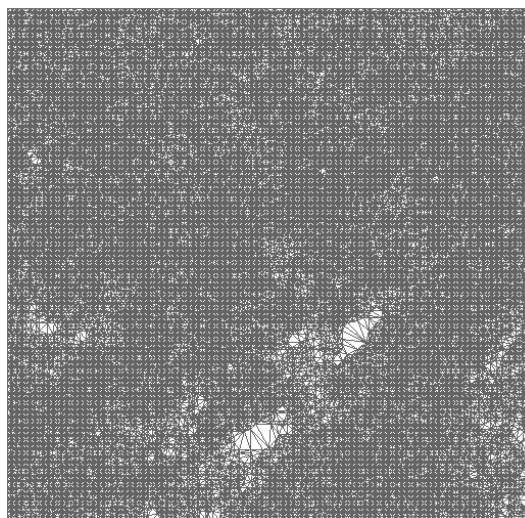
4. Calcular o grau de importância ( $GI$ )

$$GI = (\max(FD) - \min(FD)) + (\max(AO) - \min(AO))$$

Com isso, todos os vértices da grade triangular irregular recebem valor que representa o grau de importância do vértice para o modelo.

#### 4. Resultados

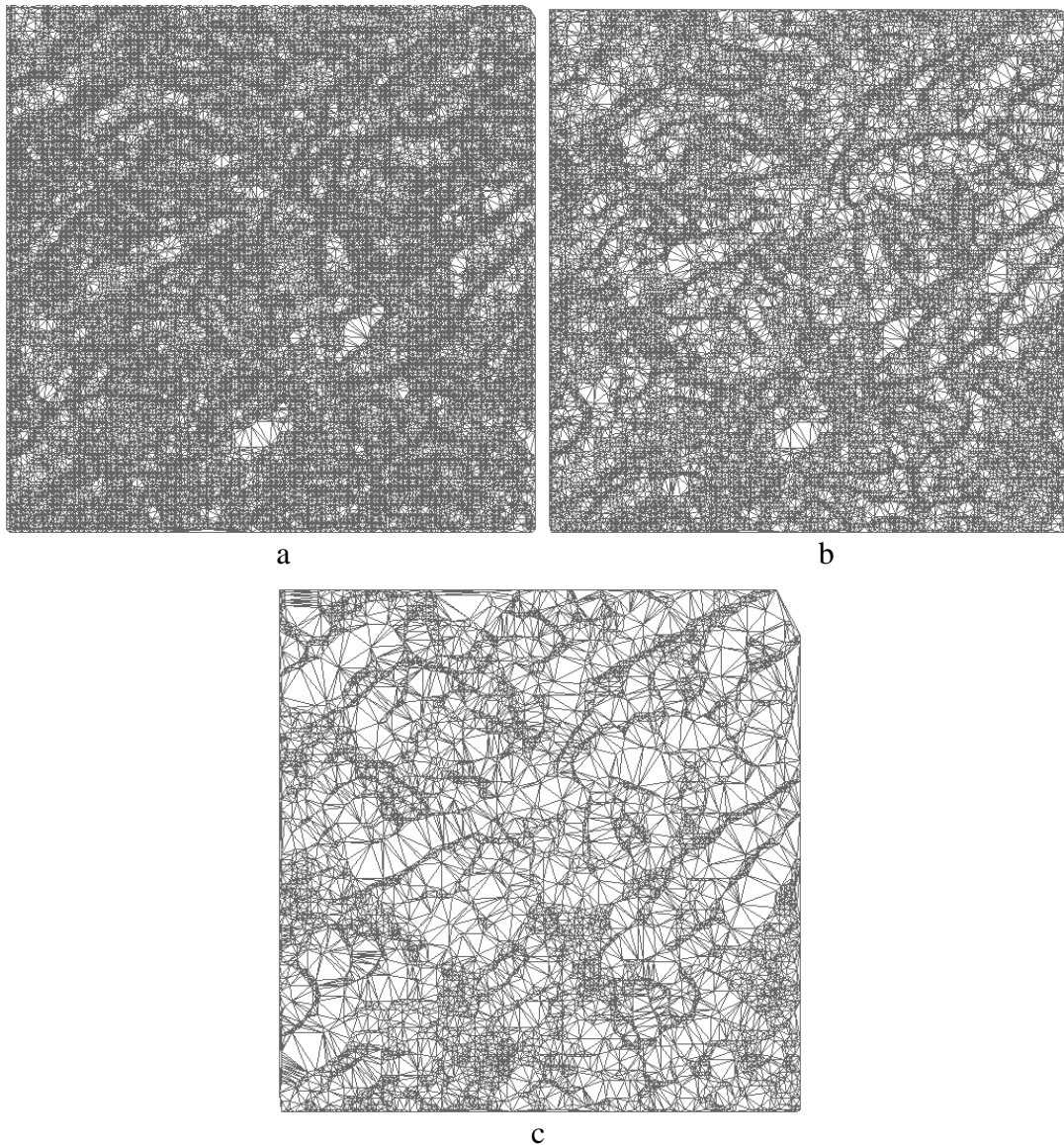
O método desenvolvido foi testado com um conjunto de dados composto por 35166 pontos amostrais que representa a região do monte Marcy. Na Figura 3 temos a malha completa gerada com os dados do monte Marcy.



**Figura 3. Malha completa Monte Marcy**

A partir da malha completa executamos o procedimento para cálculo do grau de importância dos vértices da malha. Então, podemos gerar modelos simplificados dessas malhas com uma quantidade de vértices determinada. Os vértices selecionados serão os  $n$  vértices com maior grau de importância, sendo  $n$  o número desejado de vértices na malha.

Na Figura 4 temos os resultados para malhas com 80%, 50% e 20% dos pontos utilizados na malha completa.



**Figura 4 – Malhas simplificadas (a) 80% - 27355 vértices (b) 50% - 19814 vértices (c) 20% - 7424 vértices**

Com o objetivo de avaliar a qualidade do método apresentado, comparamos as malhas simplificadas com malhas criadas pela biblioteca *Multi-Tessellation*, que implementa o modelo *Multi-Triangulation* (MT). MT é um modelo multirresolução para manuseio de malhas triangulares de superfície em níveis de detalhes variados. De Floriani[1997] e Puppo [1998] fazem uma apresentação formal e detalhada do modelo MT, e seus conceitos são concretizados na biblioteca *Multi-Tessellation*. A biblioteca *Multi-Tessellation* [Magillo, 2005] foi desenvolvida pelo DISI<sup>1</sup>. Trata-se de uma biblioteca open-source, desenvolvida em linguagem ANSI C++ e distribuída sob o *GNU-General Public License*. *Multi-Tessellation* é um pacote para representação e manipulação de objetos espaciais em n dimensões e múltiplas resoluções em que a manipulação dos dados ocorre em memória principal.

Basicamente a biblioteca *Multi-Tessellation* executa duas ações.

---

<sup>1</sup> *Dipartimento di Informatica e Scienze Dell'informazione - University of Genoa, Italy*

(1) Utiliza o processo de criação de uma malha triangular, que descreve um determinado fenômeno espacial, para construir uma representação multirresolução dessa malha. A representação é definida por um grafo acíclico direcionado (*Directed Acyclic Graph* – DAG).

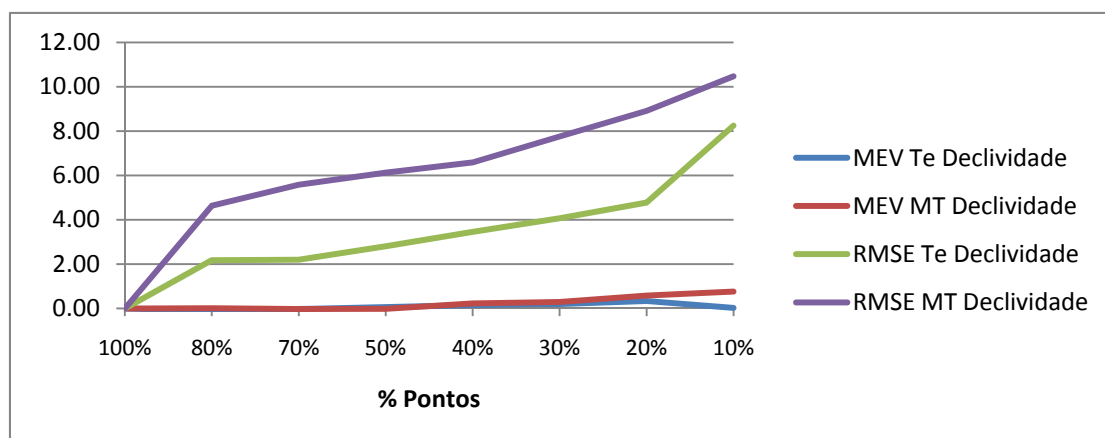
(2) Executa a recuperação, a partir do MT, de malhas em diferentes níveis de detalhes.

Juntamente com a biblioteca *Multi-Tesselation* foi disponibilizado o aplicativo *MT-Delaunay*<sup>2</sup>. O aplicativo *MT-Delaunay* permite a construção de MT para dados de terreno baseado na triangulação de *Delaunay*. A construção da triangulação de *Delaunay* é feita pela inserção interativa de vértices na triangulação, e produz um MT. Utilizamos o *MT-Delaunay* para gerar um MT e, a partir desse, recuperar malhas com níveis de detalhes diferentes a fim de fazermos uma comparação com as malhas geradas pelo método apresentado.

Foram geradas 8 malhas com resoluções diferentes. A primeira malha, denominada malha completa, foi gerada a partir de todos os pontos do conjunto de dados. As 7 malhas seguintes, denominadas malhas intermediárias, foram geradas com a mesma quantidade de pontos das malhas geradas pelo método apresentado. Ou seja, com 80%, 70%, 50%, 40%, 30%, 20% e 10% do total de vértices da malha completa.

Para efeito de avaliação quantitativa das características de declividade e orientação dos modelos, foram gerados, por meio aleatório, 3000 pontos, espacialmente distribuídos, denominados pontos de controle. Para cada ponto de controle foram calculados o grau de declividade e o grau de orientação. Esse cálculo foi executado sobre cada uma das 7 malhas. Em seguida, calculamos a média do erro verdadeiro (MEV), que é a média das diferenças encontradas entre os valores calculados a partir das malhas intermediárias e os valores encontrados a partir da malha completa. Juntamente com o MEV, calculamos o RMSE (*Root Mean Square Error*) desses valores.

Na Figura 5, apresentamos um gráfico comparativo com os resultados encontrados para o grau de declividade das malhas. No gráfico temos as variações do MEV e o RMSE para os níveis intermediários entre as malhas geradas tanto pelo método apresentado, denominados MEV Te e RMSE Te, como pelo MT, denominados MEV MT e RMSE MT respectivamente.

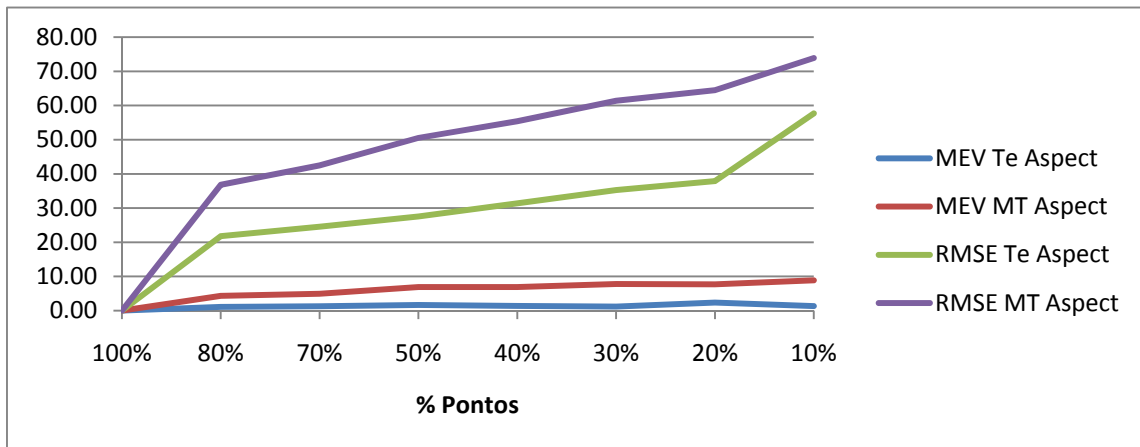


**Figura 5. Variação do MEV e RMSE para o grau de declividade**

<sup>2</sup> <http://www.disi.unige.it/person/MagilloP/MT/mtdelaunay.html>

No Figura 5, notamos que os valores do MEV Te apresentam comportamento quase linear e sem grandes alterações, ao passo que o MEV MT tem uma tendência a aumentar á medida que diminui a quantidade de vértices do modelo. No método apresentado o RMSE é menor que o encontrado no modelo MT para todas as malhas intermediárias.

Na Figura 6, apresentamos um gráfico comparativo com os resultados encontrados para o grau de orientação das malhas. Este gráfico segue as mesmas nomenclaturas adotadas na Figura 5.



**Figura 6. Variação do MEV e RMSE para o grau de orientação**

A avaliação do grau de declividade dos pontos de controle segue a mesma análise feita para o grau de declividade. O método apresentado tem MEV menores que os encontrados no modelo MT e mantém menores RMSE para as malhas intermediárias.

Isso mostra que o modelo apresentado consegue uma melhor aproximação da característica de orientação nas malhas intermediárias que o modelo MT.

## 5. Conclusão

A avaliação dos valores de MEV e RMSE para os pontos de controle, nos modelos gerados, mostrou que o método apresentado alcançou seu objetivo. Com ele é possível classificar os vértices de uma malha pela importância que cada vértice tem na determinação das características de declividade e orientação da malha. Assim, podemos gerar malhas simplificadas que apresentem um menor erro de aproximação em relação à malha completa.

Para uma verificação mais precisa do método, propomos algumas simulações com pesos diferentes para os graus de declividade e de orientação no algoritmo do cálculo de importância dos vértices. Assim como, efetuar outras avaliações quantitativas dos modelos.

## Referências

- Berg, M. d.; Kreveld, M. v.; Overmars, M.; Schwarzkopf, O. **Computational Geometry: Algorithms and Applications**. 2nd. New York: Springer-Verlag, 2000. 367 p.
- Briese, C.; Mandlbürger, G.; Pfeifer, N. Airborne laser scanning - high quality digital terrain modelling. In: III International Scientific Congress, 2007 p. 79-92.



- Cheng, I.; Basu, A. Perceptually optimized 3-D transmission over wireless networks. **IEEE Transactions on Multimedia**, v. 9, n. 2, p. 286–396, 2007.
- Danovaro, E.; Floriani, L. D.; Puppo, E.; Samet, H. Multi-resolution out-of-core modeling of terrain and geological data. In: Proceedings of the 13th annual ACM international workshop on geographic information systems, 2005, Bremen, Germany. ACM Press, 2005. p. 143-152.
- De Floriani, L.; Magillo, P.; Puppo, E. VARIANT: A System for Terrain Modeling at Variable Resolution. **GeoInformatica**, v. 4, n. 3, p. 287-315, 2000.
- De Floriani, L.; Puppo, E.; Magillo, P. A Formal Approach to Multiresolution Hypersurface Modeling. In: StraBer, W.; Klein, R.; Rau, R. (Ed.). **Geometric Modeling: Theory and Practice**. Springer-Verlag, 1997.
- Fisher, P. F. Valediction. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 21, n. 10, p. 1165-1170, 2007.
- Franklin, W. R.; Metin, I.; Zhongyi, X.; Daniel, M. T.; Barbara, C.; Marcus, V. A. A., 2007, **Smugglers and border guards: the GeoStar project at RPI**, Proceedings of the 15th annual ACM international symposium on Advances in geographic information systems, Seattle, Washington, ACM.
- Gray, J. T.; Linsen, L.; Hamann, B.; Joy, K. I. Adaptive multi-valued volume data visualization using data-dependent error metrics. In: IEEE Conference on Visualization, 2003
- Kidner, D. B.; Ware, J. M.; Sparkes, A. J.; Jones, C. B. Multiscale Terrain and Topographic Modelling with the Implicit TIN. **Transactions in GIS**, v. 4, n. 4, p. 379-408, 2000.
- Larsen, B. D.; Christensen, N. J. Real-time Terrain Rendering using Smooth Hardware Optimized Level of Detail. **Journal of WSCG**, v. 11, n. 1, p. 8, 2003.
- Linsen, L.; Hamann, B.; Joy, K. I. Wavelets for Adaptively Refined 3root 2-Subdivision Meshes. **International Journal of Computers & Applications**, v. 29, n. 3, p. 223-231, 2007.
- Magillo, P. **The MT (Multi-Tessellation) Library**. Genova, Italia, 2005. Disponível em: [www.disi.unige.it/person/MagilloP/MT/](http://www.disi.unige.it/person/MagilloP/MT/). Acesso em: junho, 2009.
- Mark, D. M. The history of geographic information systems: invention and re-invention of triangulated irregular networks (TINs). In: GIS/LIS'97, 1997, Cincinnati, Ohio. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, October 28-30, 1997. p. 284-289.
- Maune, D. F. (Ed.). **Digital Elevation Model Technologies and Applications : The DEM Users Manual**. Bethesda, Md.: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2001. 539 p.
- Namikawa, L. M.; Felgueiras, C. A.; Mura, J. C.; Rosim, S.; Lopes, E. S. S. **Modelagem numérica de terreno e aplicações**. São José dos Campos, SP, Brazil: INPE, 2003. 158 p.
- Puppo, E. Variable Resolution Triangulations. **Computational Geometry: Theory and Applications**, v. 11, n. 3-4, p. 219-238, 1998.

- Ribelles, J.; López, A.; Belmonte, O.; Remolar, I.; Chover, M. Multiresolution modeling of arbitrary polygonal surfaces: a characterization. **Computers & Graphics**, v. 26, n. 3, p. 449-462, 2002.
- Xu, k.; Zhou, X.; Lin, X.; Shen, H. T.; Deng, K. A multiresolution terrain model for efficient visualization query processing. **IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering**, v. 18, n. 10, p. 1382-1396, 2006.
- Yang, B.; Purves, R. S.; Weibel, R. Variable-resolution Compression of Vector Data. **GeoInformatica**, v. 12, p. 357-376, 2008.
- Yang, B.; Shi, W.; Li, Q. An integrated TIN and Grid method for constructing multi-resolution digital terrain models. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 19, n. 10, p. 1019-1038, 2005.
- Yang, B. S.; Li, Q. Q.; Shi, W. Z. Constructing multi-resolution triangulated irregular network model for visualization. **Computers and Geosciences**, v. 31, n. 1, p. 77-86, 2005.
- Zeng, Q.; Mao, J.; Li, X.; Liu, X. LIDAR data filtering and classification with TIN and assistant plane. In: 15th international conference on Geoinformatics, 2007, Nanjing - China. 6752: p. 1-8.
- Zhou, X.; Prasher, S.; Sun, S.; Xu, K. Multiresolution spatial databases: making web-based spatial applications faster. In: Proceedings of 6th Asia Pacific Web Conference, 2004, Hangzhou, China. 2004. p. 36-47.