

## Algoritmo de Simplificação de TIN para Aplicações de Hidrologia

Eduilson Lívio N. da C. Carneiro<sup>1,2</sup>, Laércio M. Namikawa<sup>1</sup>, Gilberto Câmara<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Divisão de Processamento de Dados – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

São José dos Campos – SP – Brasil

<sup>2</sup>Departamento de Informação, Ambiente, Saúde e Produção Alimentícia - DIASPA – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí - IFPI  
Teresina – PI - Brasil

{[eduilson@ifpi.edu.br](mailto:eduilson@ifpi.edu.br), [laercio@dpi.inpe.br](mailto:laercio@dpi.inpe.br), [gilberto.camara@inpe.br](mailto:gilberto.camara@inpe.br)}

**Abstract.** *This paper describes an algorithm for TIN simplification based on the values of slope and aspect of the triangles. Most simplification algorithms use the vertical distance as their simplification criteria. But the vertical distance does not guarantee the preservation of features such as slope and aspect. Most applications using TIN, such as hydrology applications, apply these data in their computation. We considered that maintaining slope and aspect in TIN simplification, preserve of the terrain morphology, improving results in applications.*

**Resumo.** *Este artigo descreve um algoritmo para simplificação de TIN baseado nos valores de declividade e orientação de vertente dos triângulos. Muitos dos algoritmos de simplificação utilizam a distância vertical como critério para simplificação. Porém a distância vertical não garante a preservação de características como declividade e orientação de vertente. Algumas aplicações, que utilizam TIN, fazem uso desses dados em suas fórmulas, as aplicações de hidrologia são exemplos disso. Consideramos que a manutenção das características de declividade e orientação de vertente em simplificação de TIN mantém a morfologia do terreno, melhorando os resultados nas aplicações.*

### 1. Introdução

O crescimento na disponibilidade de dados de terreno tem permitido a geração de modelos de terreno mais complexos e com maior qualidade. Desta forma, os pontos utilizados no modelo afetam diretamente a qualidade do modelo. Modelos criados com um número maior de pontos tornam-se mais complexos e com melhor resolução. Porém, o aumento na quantidade de dados demanda maior custo de processamento e armazenamento.

Para reduzir a quantidade de dados, mantendo a qualidade dos modelos e melhorando a eficiência da aplicação, os algoritmos de simplificação têm sido objeto de estudo nas últimas décadas. Esses algoritmos consistem da seleção de um subconjunto

dos pontos utilizados para gerar modelos mais simples, contudo, que mantenham as características desejadas pela aplicação.

De acordo com a literatura, existe uma extensa pesquisa sobre geração e gerenciamento de modelos de terreno simplificados. Podemos encontrar um estudo com a revisão e comparação dos algoritmos de simplificação em [Garland, 1999; Lindstrom; Pascucci, 2002]. Os modelos de simplificação podem ser divididos em dois grupos: modelos de simplificação para malhas regulares e modelos de simplificação de TIN. Neste trabalho temos interesse somente em simplificação de TIN.

Diferentes abordagens para simplificação de TIN têm surgido nos últimos anos. As principais dividem-se em eliminação de vértices [Schroeder *et al.*, 1992] e eliminação de arestas [Yang *et al.*, 2005]. Em geral, esses métodos utilizam a distância vertical como critério para seleção dos pontos, gerando um modelo com distribuição de pontos espacialmente regular. Porém, importantes feições do terreno não podem ser mantidas com as operações de simplificação do modelo.

Muitas aplicações que fazem uso de modelos de terreno utilizam as características de declividade e orientação de vertente em seus resultados [Rennó, 2005; Sanyal; Lu, 2006]. Este trabalho apresenta um algoritmo para simplificação de TIN utilizando como critério de seleção dos pontos os valores de declividade e orientação de vertente dos triângulos adjacentes ao ponto.

## 2. Modelos de Simplificação

### 2.1. Eliminação de vértices

A eliminação de vértice é executada, basicamente, em três passos:

- a) Seleção do vértice para remoção.
- b) Deleção de todos os triângulos adjacentes ao vértice eliminado.
- c) Construção da triangulação cobrindo o espaço deixado pelo passo “b”.

O ponto chave desse algoritmo é o critério de seleção do vértice para remoção. Existem diferentes critérios de seleção e o critério baseado na distância vertical do vértice ao plano em que ele incide é um dos mais utilizados [Schroeder *et al.*, 1992] [De Florian *et al.*, 1998]. Nesse critério, se o vértice estiver dentro de uma distância específica para o plano médio (Figura 1), o algoritmo remove-o, caso contrário, ele permanece.

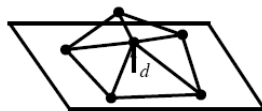


Figura 1 – Distância vertical do vértice ao plano médio  
Fonte: adaptado de Schroeder [1992]

### 2.2. Eliminação de arestas

O processo de eliminação de aresta segue dois passos:

- a) Seleção da aresta candidata

b) Validação da eliminação da aresta

Nos algoritmos de eliminação de arestas [Xu *et al.*, 2006; Yang *et al.*, 2005], a entre são os critérios de seleção da aresta e o cálculo de validação da eliminação das arestas. Por exemplo, Garland e Heckbert [1997] utilizam a medida do erro quadrático, Yang et al. [2005] utiliza a distância da aresta para o plano médio, onde a aresta dentro de uma distância mínima para o plano médio será eliminada primeiro. O cálculo do plano médio segue o proposto por Schroeder et al. [1992].

### 3. Algoritmo Proposto

Diferentes abordagens para simplificação de TIN utilizam a medida de erro associada à distância vertical como critério de seleção para remoção de vértices ou arestas. Como resultado, essas abordagens utilizam avaliação pela distância vertical, a qual avalia somente características geométricas dos modelos de terreno.

Como alternativa propomos um algoritmo que avalia a importância de um ponto baseado nas medidas de declividade e orientação de vertente dos triângulos adjacentes ao vértice. Com isso, buscamos preservar as características morfológicas do terreno. Para tal é criado um *ranking* dos pontos do TIN, onde os vértices com menor valor no *ranking* seriam os primeiros a serem eliminados.

O algoritmo para cálculo do *ranking* é executado como segue:

- a) Criar uma triangulação Delaunay para os pontos apresentados.
- b) Para cada vértice do TIN fazer:
  - i. Buscar todos os triângulos adjacentes.
  - ii. Calcular a declividade, área e orientação de vertente dos triângulos adjacentes.
  - iii. Calcular a declividade no vértice pela média das declividades dos triângulos adjacentes ponderada pela área dos respectivos triângulos. A área do triângulo é utilizada para que os triângulos maiores, que cobrem uma área maior do terreno, tenham maior importância, já que esse modelo tende a concentrar grande quantidade de pontos nas regiões do terreno com grandes mudanças de curvatura.
  - iv. Encontrar a maior diferença entre a declividade do vértice e dos triângulos adjacentes. (DifSlope).
  - v. Encontrar a maior diferença entre os ângulos de orientação de vertente dentre os triângulos adjacentes. (DifAspect).
  - vi. Calcular o valor do *ranking* do vértice pela soma do DifSlope com o DifAspect.

Após a criação do *ranking*, a criação de TIN com diferentes níveis de detalhes é feita partindo dos pontos com maiores valores no *ranking*. A seguir, apresentamos os testes para avaliar a qualidade do algoritmo.

### 4. Resultados Experimentais

Para avaliar a qualidade do algoritmo proposto, comparamos os resultados com os obtidos na simplificação de TIN pelo modelo *Multi-Triangulation* (MT). Puppo [1998] faz uma apresentação formal e detalhada do MT, que são implementados codificados na

biblioteca *Multi-Tesselation* [Magillo, 2005]. Os testes com o MT utilizaram o critério de distância vertical para seleção dos pontos a serem eliminados.

Utilizamos um conjunto de dados com 69.222 pontos que representam a topografia da região de San Bernardino (cortesia do *U.S. Geological Survey*). Criamos modelos simplificados com 70% dos pontos originais (com 48.455 pontos), 50% (34.611 pontos) e 30% (20.767 pontos) e comparamos os modelos simplificados com o modelo original. Avaliamos o RMSE (*root-mean-square error*) para as diferenças de altitude, declividade e orientação de vertente. Além disso, utilizamos o modelo de potencial de erosão e deposição [Mitasova *et al.*, 1996] e a grade de fluxos acumulados para modelos hidrológicos.

Na Tabela 1 temos o RMSE para as diferenças de altitude, declividade e orientação de vertente entre os modelos. Podemos notar que o algoritmo proposto apresentou menor erro para quase todos os critérios. No entanto, o erro aumentou na avaliação de diferença de altitude quando o modelo foi reduzido para 20.767 pontos, o que ocorreu também na avaliação de erro de declividade.

**Tabela 1. RMSE Altitude, Declividade e Orientação de Vertente**

<b>RMSE Altitude</b>			
	48.455 pontos	34.611 pontos	20.767 pontos
MT	8,16	8,02	8,56
Algoritmo Proposto	3,25	6,55	12,30
<b>RMSE Declividade</b>			
	48.455 pontos	34.611 pontos	20.767 pontos
MT	5,67	5,59	5,85
Algoritmo Proposto	2,07	3,94	6,49
<b>RMSE Orientação de Vertente</b>			
	48.455 pontos	34.611 pontos	20.767 pontos
MT	27,85	30,91	36,84
Algoritmo Proposto	11,42	18,49	29,80

Na Tabela 2 temos o RMSE para as aplicações de potencial de erosão/deposição e para a grade de fluxos acumulados. O algoritmo proposto obteve menor erro em todas as avaliações. Verifica-se que mesmo onde o erro de altitude e declividade foram maiores que os apresentados pelo MT, na avaliação dos modelos de erosão e fluxos acumulados, o algoritmo proposto obteve menor erro.

**Tabela 2. RMSE Potencial de Erosão/Deposição e Grade de Fluxos Acumulados**

<b>RMSE Potencial de Erosão/Deposição</b>			
	48.455 pontos	34.611 pontos	20.767 pontos
MT	0,76	0,74	0,79
Algoritmo Proposto	0,20	0,36	0,52
<b>RMSE Grade de Fluxos Acumulados</b>			
	48.455 pontos	34.611 pontos	20.767 pontos
MT	1558	1549	1637
Algoritmo Proposto	716	1028	1361

O algoritmo proposto calcula o *ranking* dos vértices de forma estática, enquanto o MT avalia a eliminação de pontos dinamicamente, recalculando o erro associado a cada vértice toda vez que um vértice é eliminado. A fim de avaliar como se comportaria o MT utilizando o mesmo critério de eliminação de pontos utilizados por nosso algoritmo, refizemos os testes e comparamos os resultados do MT utilizando distância vertical e o MT utilizando o método de cálculo do *ranking*, e avaliamos os resultados (Tabela 3).

**Tabela 3. RMSE Altitude, Declividade, Orientação de Vertente, Potencial de Erosão/Deposição e Grade de Fluxos Acumulados**

<b>RMSE Altitude</b>			
	48.455 pontos	34.611 pontos	20.767 pontos
MT – distância vertical	8,16	8,02	8,56
MT - <i>ranking</i>	7,87	7,65	8,06
<b>RMSE Declividade</b>			
	48.455 pontos	34.611 pontos	20.767 pontos
MT – distância vertical	5,67	5,54	5,85
MT - <i>ranking</i>	5,36	5,10	5,34
<b>RMSE Orientação de Vertente</b>			
	48.455 pontos	34.611 pontos	20.767 pontos
MT – distância vertical	27,85	30,91	36,84
MT - <i>ranking</i>	26,66	26,79	30,44
<b>RMSE Potencial de Erosão/Deposição</b>			
	48.455 pontos	34.611 pontos	20.767 pontos
MT – distância vertical	0,75	0,75	0,79
MT - <i>ranking</i>	0,74	0,71	0,69
<b>RMSE Grade de Fluxo Acumulados</b>			
	48.455 pontos	34.611 pontos	20.767 pontos
MT – distância vertical	1558	1549	1637
MT - <i>ranking</i>	1470	1561	1593

Os resultados na Tabela 3 mostram que o MT, utilizando o método de *ranking*, resultou em simplificações com menores erros.

## 6. Conclusão

Simplificações que melhor representem as características de declividade e orientação de vertente são mais úteis às aplicações do que as que utilizam a distância vertical, devido à diminuição da quantidade de pontos para representação dos modelos de terreno sem perder a qualidade. Assim, este trabalho apresenta um algoritmo para simplificação de TIN baseado em declividade e orientação de vertente dos triângulos e faz comparação com um algoritmo de simplificação que utiliza a distância vertical como critério.

Nota-se que mesmo onde os erros de altitude (12,3 metros) e declividade (6,49 graus), são maiores que os apresentados pelo MT (8,56 metros e 5,85 graus, respectivamente), na avaliação utilizando os modelos de erosão e fluxos acumulados, o algoritmo proposto obteve um erro menor.

Apesar do nosso algoritmo não ter apresentado melhores resultados em todos os níveis de simplificação em relação ao erro de altitude, que normalmente é o parâmetro utilizado para avaliar modelos de terreno, o algoritmo mostrou-se adequado para simplificar malhas utilizadas pelas aplicações apresentadas.

O algoritmo proposto ainda possui algumas melhorias que poderão ser implementadas, como, por exemplo, avaliar a possibilidade de acrescentar pesos diferentes aos dados de declividade e orientação de vertente no cálculo do *ranking*.

### Referências

- De Floriani, L.; Magillo, P.; Puppo, E. Efficient implementation of multi-triangulations. In: Visualization '98, 1998, Research Triangle Park, NC, USA. IEEE, p. 43-50.
- Garland, M. Multiresolution Modeling: Survey & Future Opportunities. In: EUROGRAPHICS '99 - State of the Art Report (STAR), 1999, Aire-la-Ville (CH). p. 111-131.
- Garland, M.; Heckbert, P. S. Surface simplification using quadric error metrics. In: SIGGRAPH '97, 1997 p. 209-216.
- Lindstrom, P.; Pascucci, V. Terrain simplification simplified: a general framework for view-dependent out-of-core visualization. **IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics**, v. 8, p. 239-254, 2002.
- Magillo, P. **The MT (Multi-Tesselation) Library**. Genova, Italia, 2005. Disponível em: [www.disi.unige.it/person/MagilloP/MT/](http://www.disi.unige.it/person/MagilloP/MT/). Acesso em: jun/2009.
- Mitasova, H.; Hofierka, J.; Zlocha, M.; Iverson, L. R. Modelling topographic potential for erosion and deposition using GIS. **International Journal of Geographical Information Systems**, v. 10, n. 5, p. 629-641, 1996.
- Puppo, E. Variable Resolution Triangulations. **Computational Geometry: Theory and Applications**, v. 11, n. 3-4, p. 219-238, 1998.
- Rennó, C. D. Eliminação de áreas planas e extração automática de linhas de drenagem em modelos digitais de elevação representados por grades triangulares. In: XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2005, Goiânia, Brasil. p. 2543-2550.
- Sanyal, J.; Lu, X. X. GIS-based flood hazard mapping at different administrative scales: A case study in Gangetic West Bengal, India. **Singapore Journal of Tropical Geography**, v. 27, n. 2, p. 207-220, 2006.
- Schroeder, W. J.; Zarge, J. A.; Lorensen, W. E. Decimation of triangle meshes. **Computer Graphics**, v. 26, n. 2, p. 65-70, 1992.
- 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.; Shi, W.; Li, Q. A Dynamic Method for Generating Multi-Resolution TIN Models. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 71, n. 8, p. 917-926, 2005.