

Eliminação de áreas planas e extração automática de linhas de drenagem em modelos digitais de elevação representados por grades triangulares

Camilo Daleles Rennó¹

¹ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12201-970 - São José dos Campos - SP, Brasil
camilo@dpi.inpe.br

Abstract. The use of Digital Elevation Models (DEM) in hydrology requires a realistic representation of flow through terrain. In general, regular grades tends to produce more redundancy that makes more difficult the extraction of river course and ridge information. Triangular Irregular Networks (TIN) are more flexible but even so can show flat areas. This paper presents a methodology to eliminate flat triangles and consequently to generate a hydrological corrected TIN. Simultaneously to this process, the drainage network and watershed boundaries are extracted.

Palavras-chave: rede de drenagem, MDE, TIN, drainage networks, DEM.

1. Introdução

A realização de estudos hidrológicos vem da necessidade de se compreender os processos que controlam o movimento da água e os impactos de mudanças do uso da terra sobre a quantidade e qualidade da água (Whitehead e Robinson, 1993). A importância de se adotar a bacia hidrográfica como unidade hidrológica está ligada ao fato de que suas características estão intimamente relacionadas com a produção de água. A área de uma bacia hidrográfica tem influência sobre a quantidade de água produzida e, a forma e o relevo atuam sobre o regime desta produção (Zakia, 1998). Odum (1971) já considerava a necessidade de se eleger a bacia hidrográfica como unidade de conservação. Este autor observou que alguns parques florestais, apesar de possuírem grandes áreas, não compreendiam as áreas de nascentes, e com isso estavam vulneráveis a práticas antrópicas nas cabeceiras dos rios, o que poderia prejudicar os ecossistemas dentro da área protegida pelo parque.

Os modelos hidrológicos descrevem a distribuição espacial da precipitação, as perdas por interceptação, evaporação, o movimento da água no solo causado pela infiltração, percolação, entrada e saída de água subterrânea, e o escoamento superficial, sub-superficial e nos canais de escoamento. Estes modelos procuram simular o percurso da água desde a precipitação até a saída da água do sistema, seja por escoamento para fora da bacia hidrográfica, seja por evapotranspiração.

A forma mais comum de tratar uma bacia hidrográfica é considerá-la um sistema agregado com propriedades espacialmente homogêneas, desprezando-se a variabilidade espacial natural da bacia e as relações existentes entre seus componentes. Modelos deste tipo são denominados pontuais, pelo fato de suas feições espaciais serem representadas com dimensão zero. Caso se deseje um maior detalhamento dos processos dentro da bacia hidrográfica é necessário proceder a uma subdivisão da mesma.

O caso mais simples de discretização espacial de uma bacia hidrográfica é dividi-la em sub-bacias, sendo que cada uma constitui um sistema agregado (ponto), conectadas por ligações que representam os cursos d'água (Maidment, 1993).

Para estudos hidrológicos que analisam fluxos superficiais e subsuperficiais, os modelos agregados têm pouca aplicabilidade. Como a topografia é o principal fator determinante nos processos de transporte de materiais, os modelos que tratam da distribuição espacial da água na bacia hidrográfica requerem dados baseados nas características topográficas desta bacia tais como, limites das bacias e sub-bacias, inclinação do terreno, comprimento de rampa,

forma do declive, orientação das vertentes, características dos canais de drenagem e conexões entre áreas que definirão como a água se move através da paisagem (Moore et al., 1993). Estes atributos topográficos podem ser computados a partir de um Modelo Digital de Elevação (MDE) usando-se uma variedade de técnicas. A estrutura ideal para um MDE depende do objetivo do uso do dado e de como este pode se relacionar com a estrutura de um modelo (Moore et al., 1991). A **Figura 1** ilustra as três principais formas de se estruturar um MDE: a) grades regulares; b) grades triangulares (TIN, triangulated irregular network); e c) curvas de nível.

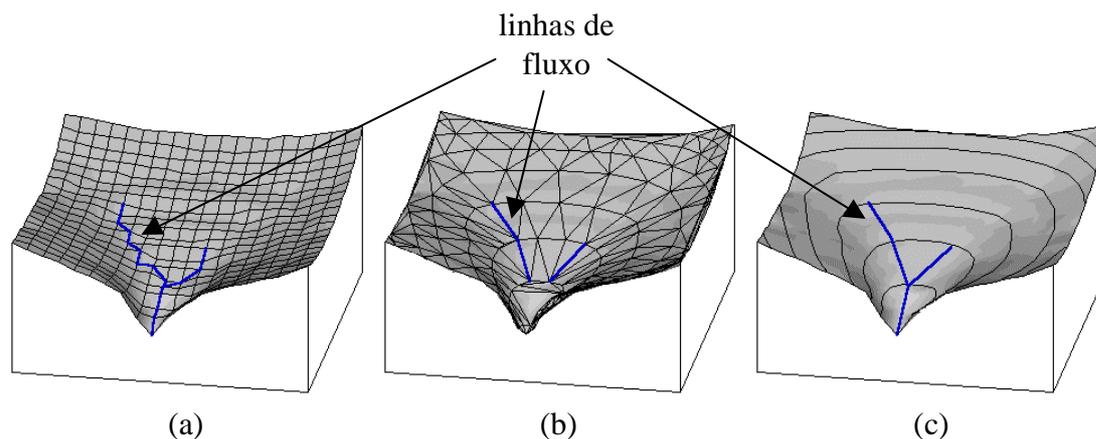


Figura 1 – Representações do MDE. a) grade regular; b) TIN; c) curvas de nível

Uma das estruturas de dados mais amplamente utilizadas para representar um MDE consiste numa grade regular retangular (em geral com elementos quadrados) devido sua fácil implementação e alta eficiência computacional (Collins e Moon, 1981). Entretanto, este tipo de representação possui grandes desvantagens. Em geral, grades regulares não conseguem representar facilmente mudanças abruptas de elevação e o espaçamento da malha da grade afeta diretamente os resultados, causando grande mudança na eficiência computacional. Além disso, caminhos de fluxos determinados a partir de grades regulares utilizados em análises hidrológicas tendem a produzir linhas em ziguezague e portanto são de certa forma não realistas. Uma vez que grades regulares devem ser ajustadas de acordo com a rugosidade do terreno, estas produzem significativa redundância em partes mais planas do terreno (Moore et al., 1991).

Grades triangulares têm sido usadas em modelos hidrológicos dinâmicos (Palacios-Vélez e Cuevas-Renaud, 1986). A principal dificuldade na utilização deste tipo de estrutura de dados se dá quando as facetas dos triângulos não possuem orientação (triângulos horizontais), o que dificulta a determinação das linhas de fluxo. Uma discussão sobre a utilização de TIN em modelagem hidrológica pode ser encontrada em Moore et al. (1993).

O método de particionamento da bacia hidrográfica baseado em curvas de nível é um modo natural de estruturar modelos hidrológicos e de qualidade de água uma vez que este particionamento é feito com base na hidráulica de fluidos através da determinação de linhas de fluxo (Moore et al., 1993). Esta técnica de particionamento é essencialmente vetorial, sendo inicialmente proposta por Onstad e Bradkensiek (1968) e melhorada por muitos autores (por exemplo, Maunder, 1999). Dentro deste conceito, um elemento de área típico é delimitado por um par de segmentos de curvas de nível e um par de linhas de fluxos. Três modelos hidrológicos bastante conhecidos que utilizam esta abordagem são o TAPES-C (Moore e Grayson, 1991), o THALES (Grayson et al., 1992) e o TOPOG (Dawes e Short, 1988; Dawes et al., 1997; CSIRO, 2000).

Rennó e Soares (2001) compararam os métodos de discretização espacial baseado em curvas de nível e em grade regular. Estes autores verificaram que a discretização em grade regular tende a suavizar o terreno, eliminando áreas mais acidentadas, assim como aumenta a proporção de áreas mais planas (declividade menor que 0,1 m/m). Além disso, observaram diferenças entre os dois métodos quanto à exposição (aspecto) e a determinação de linhas de fluxo.

A discretização espacial baseada em curvas de nível, apesar de ser hidrológicamente mais realista, possui dois inconvenientes principais: a) sua estrutura de dados complexa, na qual a unidade hidrológica é definida através de polígonos irregulares e redes, dificulta a integração de modelos hidrológicos e sistemas de informação geográfica; e b) regiões mais planas tendem a formar elementos muito grandes, podendo compreender muitas classes de uso com diferentes características hidrológicas. Já a representação TIN é comum entre os sistemas de informação geográfica que eficientemente armazenam e manipulam dados representados neste formato.

O objetivo principal deste trabalho é apresentar uma metodologia para produzir um TIN hidrológicamente corrigido utilizando curvas de nível. Como resultado, tem-se um TIN, cujos triângulos planos são eliminados. Simultaneamente à construção do TIN, faz-se a extração automática da rede de drenagem e dos divisores d'água. Todos os algoritmos apresentados neste trabalho foram implementados em IDL como parte do Sistema de Análise e Simulação Hidrológica - SASHI (Rennó, 2004).

2. Construção da grade triangular (TIN) corrigida hidrológicamente

Num MDE representado por um TIN, a superfície do terreno é modelada como um conjunto de triângulos contíguos e disjuntos, cujos vértices representam os pontos de cota. Estes pontos podem ser extraídos de curvas de nível e de pontos cotados.

O método mais adotado na construção do TIN é o da triangulação de Delaunay. Esta triangulação tem a propriedade de que os círculos que circunscrevem cada triângulo não contêm nenhum vértice de outro triângulo. Além disso, esta representação é intercambiável com o diagrama de Voronoi no qual, para cada ponto é construído um polígono convexo que compreende a região mais próxima a este ponto do que a qualquer outro ponto.

A triangulação de Delaunay não considera a relação topológica existente entre os pontos que definem as curvas de nível. Neste caso, todos os segmentos que compõem cada curva de nível deveriam ser representados por arestas dos triângulos, o que nem sempre acontece. Assim, após a triangulação, é feita uma verificação para corrigir aqueles triângulos cujos vértices interceptem algum segmento (**Figura 2**). Este método é denominado triangulação de Delaunay restrita. É importante salientar que, neste caso, as propriedades da triangulação de Delaunay não são mais observadas.

A triangulação não considera o valor de cota de cada ponto. Assim, podem aparecer vários triângulos planos (**Figura 3**), ou seja, triângulos cujos vértices apresentam mesma cota. Estes triângulos são inconvenientes do ponto de vista hidrológico pois não representam feições reais do terreno (áreas com declividade muito reduzida), dificultando a determinação dos fluxos de água. Pelo contrário, os triângulos planos estão, quase sempre, associados a feições que descrevem linhas de drenagem ou divisores d'água.

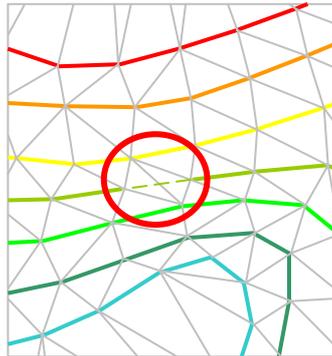


Figura 2 – Triangulação de Delaunay. As linhas coloridas representam curvas de nível e as linhas cinza, as arestas dos triângulos. A área circundada destaca um segmento de curva de nível não representado na triangulação.

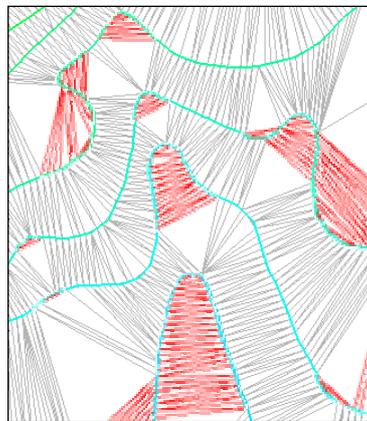


Figura 3 – Triangulação de Delaunay restrita. As linhas coloridas representam curvas de nível e as linhas cinza e vermelha, as arestas dos triângulos. As linhas vermelhas são arestas de triângulos planos.

Para a eliminação dos triângulos planos, pode-se criar linhas artificiais que representam linhas de drenagem (áreas mais baixas do terreno) ou divisores d'água (área mais altas do terreno). Diferentes abordagens podem ser empregadas para construir estas linhas a partir da união de pontos representativos dos triângulos planos:

- a) Ligando-se os baricentros

O baricentro (ou centróide) de um triângulo representa o centro de gravidade deste triângulo e é obtido pela intersecção das medianas do triângulo (**Figura 4**).

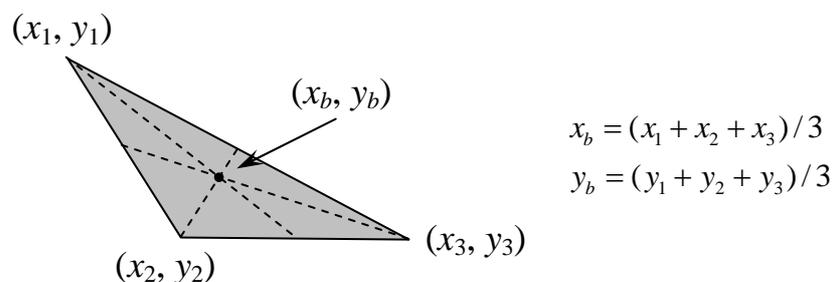


Figura 4 – Baricentro de um triângulo.

A **Figura 5a** apresenta a linha resultante da união dos baricentros dos triângulos planos. Note que a linha descreve um padrão em ziguezague o que inviabiliza seu uso como descritor de uma drenagem ou divisor d'água.

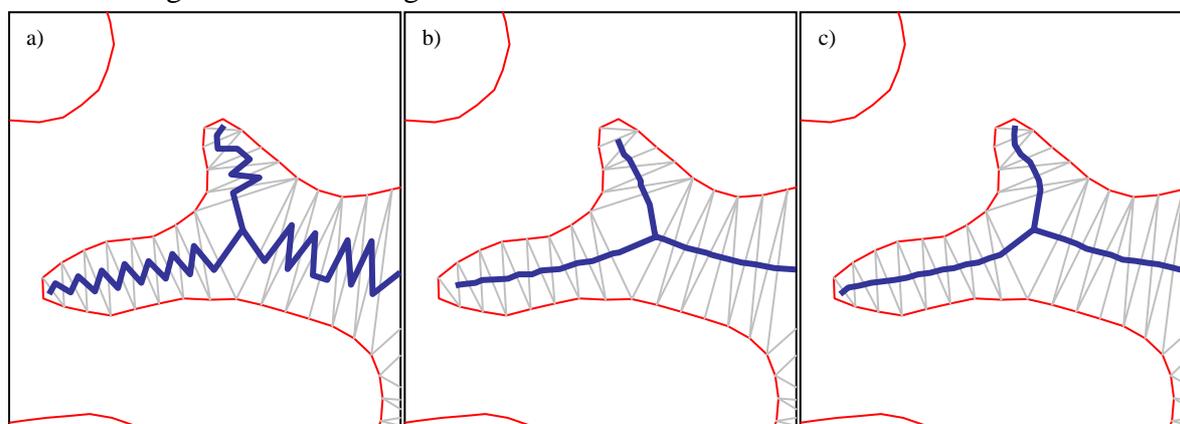


Figura 5 – Linhas resultantes da união dos triângulos planos utilizando diferentes pontos representativos dos triângulos: a) baricentro; b) circuncentro; e c) ponto médio da mediana
b) Ligando-se os circuncentros

O circuncentro de um triângulo representa o centro de um círculo que circunscreve o triângulo e é obtido pela intersecção das perpendiculares das bissetrizes do triângulo (**Figura 6**).

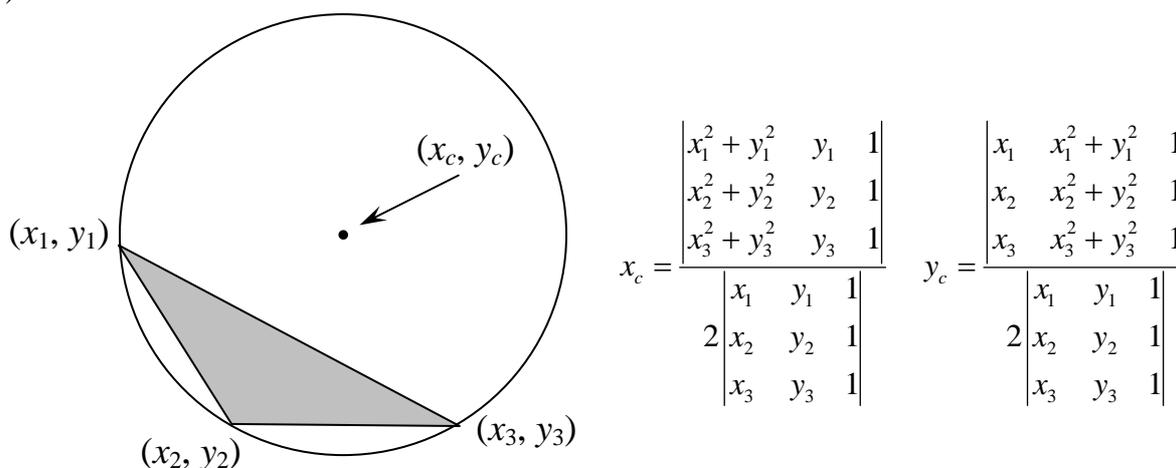


Figura 6 – Circuncentro de um triângulo.

Pode-se notar pela **Figura 5b** que a linha resultante da união dos circuncentros dos triângulos planos apresenta o efeito ziguezague menos evidente. Apesar da aparência bastante similar com o que se esperaria de uma drenagem ou de um divisor d'água, seu uso é restrito a triângulos que apresentem as propriedades de Delaunay. Como, numa triangulação de Delaunay restrita estas propriedades podem não ser válidas, também, nesse caso, os resultados podem não ser satisfatórios.

c) Ligando-se os pontos médios da mediana

Cada triângulo possui três medianas cuja intersecção resulta no baricentro. Para cada mediana, é possível determinar um ponto médio (**Figura 7**) que pode ser utilizado na união dos triângulos planos. Como há três pontos médios para cada triângulo, deve-se definir um critério para escolha do ponto médio mais representativo.

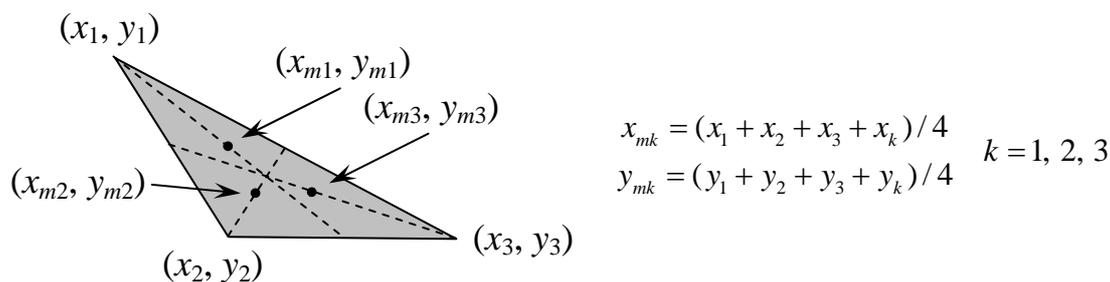


Figura 7 – Pontos médios das medianas de um triângulo.

Em geral, os triângulos planos são bastante alongados e apresentam comumente dois outros triângulos planos como vizinhos. Assim, pode-se escolher o ponto médio da mediana do vértice oposto à aresta não compartilhada por outro triângulo. Caso o triângulo plano apresente apenas um vizinho, escolhe-se o ponto médio da mediana do vértice oposto a esta aresta compartilhada por ambos os triângulos. Finalmente, quando o triângulo plano possui três vizinhos, adota-se o baricentro como ponto representativo do triângulo. Utilizando-se este critério, obtém-se como resultado da união dos triângulos planos uma linha bastante suave (sem zigzagues) como a apresentada na **Figura 5c**.

Após a identificação das linhas de drenagem e divisores d'água, os triângulos planos são eliminados e novos triângulos são construídos com base nesses novos segmentos conforme ilustrado na **Figura 8**.

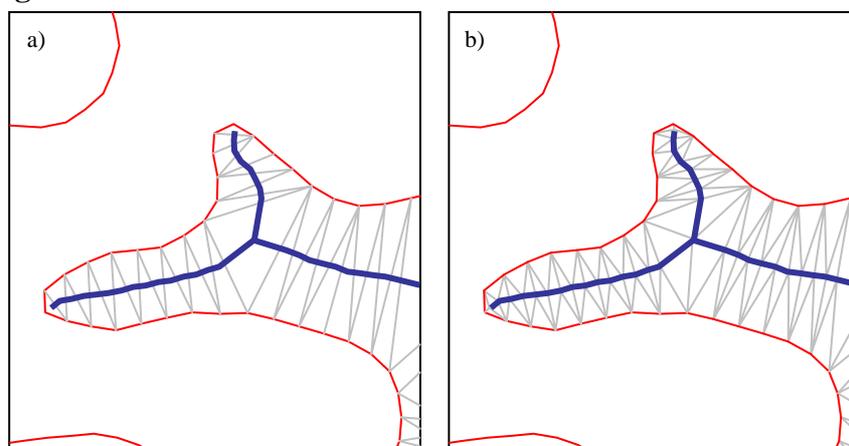


Figura 8 – Triangulação antes (a) e depois (b) da reconstrução.

3. Aplicação do método

A metodologia proposta para construção de um TIN hidrológicamente corrigido foi testada numa área que compreende a porção norte do rio Corumbataí, tributário do rio Piracicaba, Estado de São Paulo. A região selecionada apresenta topografia bastante variada.

Para a triangulação, foram utilizados 65.632 pontos amostrais, compreendendo as curvas de nível e pontos cotados digitalizados de cartas topográficas na escala 1:50.000. Inicialmente, foi aplicada a triangulação de Delaunay restrita que resultou em 131.016 triângulos dos quais 33.232 foram identificados com planos (ou 24% da área total). A **Figura 9** apresenta a imagem exposição resultante da triangulação sem a eliminação de triângulos planos.

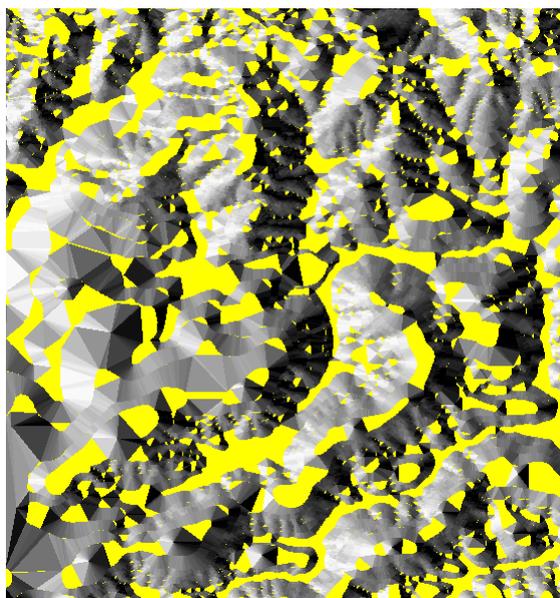


Figura 9 – Imagem exposição (aspecto) indicando, em amarelo, áreas planas.

A **Figura 10** apresenta a mesma imagem exposição após a eliminação dos triângulos planos e reconstrução da triangulação. Nesse processo, foram acrescentados mais 21.506 triângulos ao modelo. Pode-se notar uma melhoria significativa na representação do relevo.

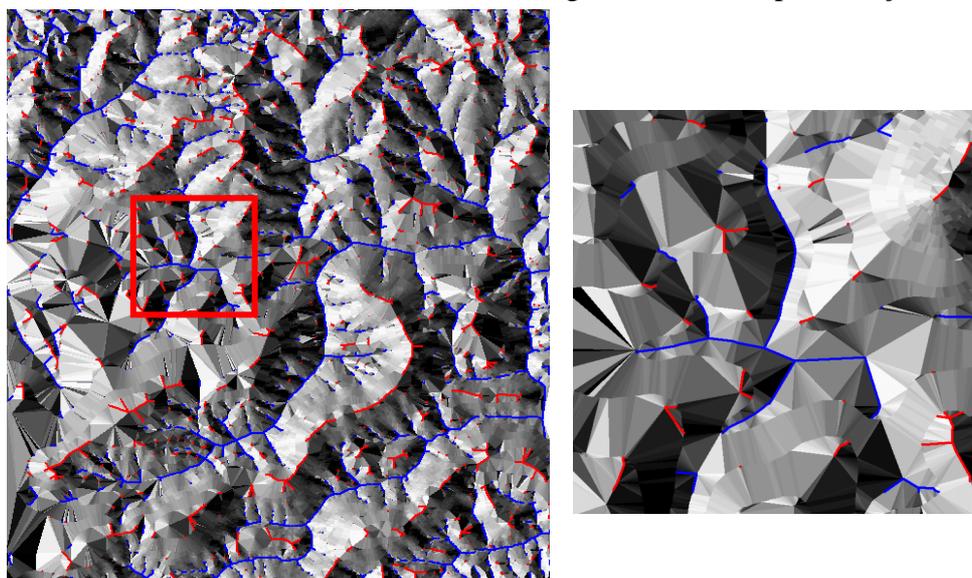


Figura 10 – Imagem exposição (aspecto) com linhas de drenagem em azul e divisores d'água em vermelho.

4. Conclusão e recomendações

Este trabalho apresentou um método que simultaneamente elimina triângulos planos e extrai automaticamente linhas de drenagem e divisores d'água. O resultado da aplicação do método em uma área com topografia variada mostrou-se bastante satisfatório, permitindo eliminar todos os triângulos planos, o que representava quase 25% da área total testada.

Numa próxima etapa, as linhas de drenagem e divisores d'água devem ser conectados de modo a formar a rede de drenagem e os divisores de bacias. De fato, todos os segmentos da rede de drenagem e dos divisores de bacias já estão presentes na triangulação resultante na

forma de arestas. Faz-se necessário apenas a implementação de algoritmos que as identifique e as conecte.

Referências

- Collins, S.H.; Moon, G.C. Algorithms for dense digital terrain models. **Photogr. Eng. Rem. Sens.**, v. 47, n. 1, p. 71-76, 1981.
- CSIRO. **Topog online**: user guide. [online]. <<http://www.clw.csiro.au/topog>>. 2000.
- Dawes, W.R.; Short, D.L. **TOPOG Series topographic analysis and catchment drainage modeling package**: user manual. Canberra, CSIRO. 1988.
- Dawes, W.R.; Zhang, L.; Hatton, T.J.; Reece, P.H.; Beale, G.T.H.; Packer, I. Evaluation of a distributed parameter ecohydrological model (TOPOG_IRM) on a small cropping rotation catchment. **J. Hydrology**, v. 191, p. 64-86, 1997.
- Grayson, R.B.; Moore, I.D.; McMahon, T.A. Physically based hydrologic modeling: a terrain based model for investigative purposes. **Water Resour. Res.**, v. 28, n. 10, p. 2639-2658, 1992.
- Maidment, D.R. GIS and hydrologic modeling. In: Goodchild, M.F.; Parks, B.O.; Steyaert, L.T.; ed. **Environmental modeling with GIS**. New York, Oxford University Press, 1993. Cap. 14, p. 147-167.
- Maunder, C.J. An automated method for constructing contour-based digital elevation models. **Water Resour. Res.**, v. 35, n. 12, p. 3931-3940, 1999.
- Moore, I.D.; Grayson, R.B. Terrain-based catchment partitioning and runoff prediction using vector elevation data. **Water Resour. Res.**, v. 27, n. 6, p. 1177-1191, 1991.
- Moore, I.D.; Grayson, R.B.; Ladson, A.R. Digital terrain modeling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications. **Hydrol. Proc.**, v. 5, p. 3-30, 1991.
- Moore, I.D.; Turner, A.K.; Wilson, J.P.; Jenson, S.K.; Band, L.E. GIS and land-surface-subsurface process modeling. In: Goodchild, M.F.; Parks, B.O.; Steyaert, L.T.; ed. **Environmental modeling with GIS**. New York, Oxford University Press, 1993. Cap. 19, p. 196-230.
- Odum, E.P. **Fundamentals of ecology**. 3ed. Philadelphia, W. B. Saunders Company, 1971. 574p.
- Onstad, C.A.; Brakensiek, D.L. Watershed simulation by stream path analogy. **Water Resour. Res.**, v. 4, p. 965-971, 1968.
- Palacios-Vélez, O.L.; Cuevas-Renaud, B. Automated river-course, ridge and basin delineation from digital elevation data. **J. Hydrology**, v. 86, p. 299-314, 1986.
- Rennó, C.D. **Construção de um sistema de análise e simulação hidrológica: aplicação a bacias hidrográficas**. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2004.
- Rennó, C. D.; Soares, J.V. Discretização espacial de bacias hidrográficas. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 10, Foz do Iguaçu, abr. 2001. **Anais**. São José dos Campos: INPE, 2001. Sessão Técnica Oral. p. 485-492.
- Whitehead, P.G.; Robinson, M. Experimental basin studies: an international and historic perspective of forest impacts. **J. Hydrology**, v. 145, p. 217-230, 1993.
- Zakia, M.J.B. **Identificação e caracterização da zona ripária em uma microbacia experimental: implicações no manejo de bacias hidrográficas e na recomposição de matas nativas**. Doutorado – Escola Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.