



Análise dos processos erosivos nas sub-bacias dos Córregos dos Alpes e do Retiro - município de São Pedro - SP: avaliação de metodologias para determinação das áreas de contribuição

Monique de Paula Neves¹
Osni José Pejon¹

¹Escola de Engenharia de São Carlos
Universidade de São Paulo
Av. Trabalhador São-Carlense, 400 - Parque Arnold Schimidt
13566-590 - São Carlos - SP, Brasil
moniqueneves@usp.br
pejon@sc.usp.br

Resumo. A avaliação de processos erosivos deve ser desenvolvida com base na interação existente entre os fatores que condicionam a sua ocorrência, sejam estes, climáticos, geológicos, hidrológicos, entre outros. Uma das abordagens adotadas por diversos autores é análise hidrológica, visando à determinação de áreas de contribuição, a fim de estabelecer as zonas de acumulação de água no relevo e suas relações com os processos erosivos. Para elaboração de mapas de área de contribuição tem sido realizado o processamento automático de dados em SIG utilizando diferentes algoritmos, como o D8 e D-*Infinity*. Desta forma, o presente trabalho tem por objetivo avaliar estes diferentes métodos de mapeamento a partir do Modelo Digital de Elevação (MDE), em escala 1:10.000. A área em estudo compreende as sub-bacias dos Córregos dos Alpes e do Retiro, localizadas no município de São Pedro - SP, que apresentam uma área aproximada de 7 km². A partir dos mapas de áreas de contribuição obtidos constatou-se que, o método D-*Infinity* define regiões de distribuição de fluxo com características mais similares a realidade da área. Além disso, ao elaborar a rede de drenagem de forma automática verificou-se que este método apresenta melhores resultados quando comparado com a rede de drenagem obtida pelas folhas topográficas do IGC. Em relação às feições erosivas, foi possível também melhor identificar as zonas de acumulação de água que influenciaram no surgimento dos processos erosivos.

Palavras-chave: SIG, processamento automático, modelo digital de elevação.

Abstract. The evaluation of erosive processes should be developed with a base in the existent interaction among the factors that affect its occurrence, such as, climate, geology, soils, hydrology, among others. One of the approaches adopted by several authors is hydrologic analysis, seeking to the determination of contribution areas, in order to establish the areas of accumulation of water in the relief and their relationship with the erosive processes. For elaboration of maps of contribution area is accomplished the automatic processing of data in GIS using different algorithms, like D8 and D-Infinity. Thus, the present work has for objectives to evaluate these mapping methods using the Digital Elevation Model (DEM), in scale 1:10.000. The area of study is the watershed of the Córrego Alpes and Retiro, located in the municipality of São Pedro, state of São Paulo, with an approximate area of 7 km². From the analysis of both maps of contribution areas was verified that the method D-Infinity defines areas of flow distribution with more similarities with the reality of the area. Furthermore, the drainage network automatically extracted with D-Infinity showed better agreement with the drainage network of the topographical map at 1:10.000 scale. Also with this method, it was possible to better identify the water accumulation areas that influenced the onset of gully erosion.

Key-words: GIS, automatic processing; digital elevation model.

1. Introdução

A dinâmica dos processos erosivos está diretamente relacionada com um conjunto de fatores que condicionam a sua ocorrência: condições climáticas, hidrológicas, geológicas, pedológicas e geomorfológicas. Para desenvolver uma avaliação adequada das erosões devem-se considerar as interações existentes entre estes fatores. Uma das abordagens adotadas por diversos autores é análise hidrológica, visando à determinação das áreas de contribuição e sua relação com o surgimento de feições erosivas. Segundo Ramos et al. (2003), os mapas de área de contribuição são fundamentais em diversos estudos, uma vez que indicam as zonas potenciais de saturação e possíveis áreas de instabilidade, nas diversas porções do relevo.

Para elaboração destes mapas tem sido utilizado o processamento automático em SIG (Sistema de Informação Geográfica). O SIG como uma das ferramentas de geoprocessamento tem beneficiado diversas pesquisas que visam à avaliação do meio físico. Segundo Sobreira (2004), a utilização do SIG possibilita o armazenamento, tratamento e análise de dados, favorecendo a elaboração de diferentes tipos de mapas e cartas, contribuindo significativamente para o desenvolvimento da cartografia geotécnica como um todo.

Desta forma, a partir de processamento automático de dados espaciais pode ser realizada a análise hidrológica, visando à delimitação automática de bacias hidrográficas, elaboração dos mapas de direção de fluxo e áreas de contribuição. Para isto, são utilizados diferentes algoritmos, conforme citado por Jesus (2009): D8 (*Deterministic Eight-Node*) proposto O'Callaghan e Mark (1984); Rho8 (*Random eight-node*) desenvolvido por Quinn et al. (1991); DEMON de Costa-Cabral e Burges (1994); e o *D-Infinity*, método mais recente proposto por Tarboton (1997).

Considerando estes métodos de mapeamento, Ramos et al. (2003), Tesfa et al. (2011), Oliveira et al. (2012), Bosquilia (2014), entre outros autores, realizaram suas pesquisas comparando os resultados obtidos por diferentes algoritmos. Ramos et al. (2003), verificaram que o método D8 apresenta resultados indesejáveis, por gerar áreas de contribuição mais concentradas nas vertentes, enquanto que o *D-Infinity* tende a determinar as direções de fluxo com maior exatidão, gerando conseqüentemente mapas de áreas de contribuição com maior confiabilidade, para aplicação em estudo de processos erosivos, modelos para previsão de áreas de instabilidade, determinação de zonas de saturação, entre outras formas de estudo.

Além disso, a eficiência destes métodos tem sido discutida em diversos trabalhos que visam a elaboração do índice topográfico, como Farinasso et al. (2006), Oliveira et al. (2013), e Lopes (2013). Farinasso et al. (2006) compararam a aplicação dos algoritmos D8 e *D-Infinity* para determinação do fator topográfico (LS), e segundo estes autores o método *D-Infinity* apresentou

resultados melhores para aplicação em estudos de predição de processos erosivos, que utilizam como base a Equação Universal de Perda do Solo (EUPS). Oliveira et al. (2013) também verificaram que o algoritmo *D-Infinity* é mais adequado para simulação da direção de fluxo em vertentes, apresentando conseqüentemente, uma análise mais adequada da distribuição espacial de processos erosivos.

2. Objetivo

O presente trabalho tem por objetivo comparar a aplicação dos métodos D8 e *D-Infinity* para elaboração dos mapas de área de contribuição para as sub-bacias hidrográficas dos Córregos Água dos Alpes e Córrego do Retiro, a partir do Modelo Digital de Elevação (MDE), em escala 1:10.000.

3. Material e Métodos

Para o desenvolvimento deste trabalho foram utilizados os seguintes materiais: folhas topográficas do IGC (1:10.000); inventário de feições erosivas (GOMES, 2002; ARAÚJO, 2011); e os softwares ArcGIS® 10.3, TauDEM 5.0 e AutoCAD® Map.

3.1 Área de estudo

A área em estudo está inserida no município de São Pedro, localizado na região centro-oeste do estado de São Paulo e engloba as sub-bacias hidrográficas dos Córregos Água dos Alpes e Córrego do Retiro, pertencentes à Bacia do Córrego do Meio. As sub-bacias estão localizadas entre as coordenadas UTM 196000 - 200000mE e 7496000 - 7502000mN, na zona 23S e possuem uma área aproximada de 7km² (Figura 1).

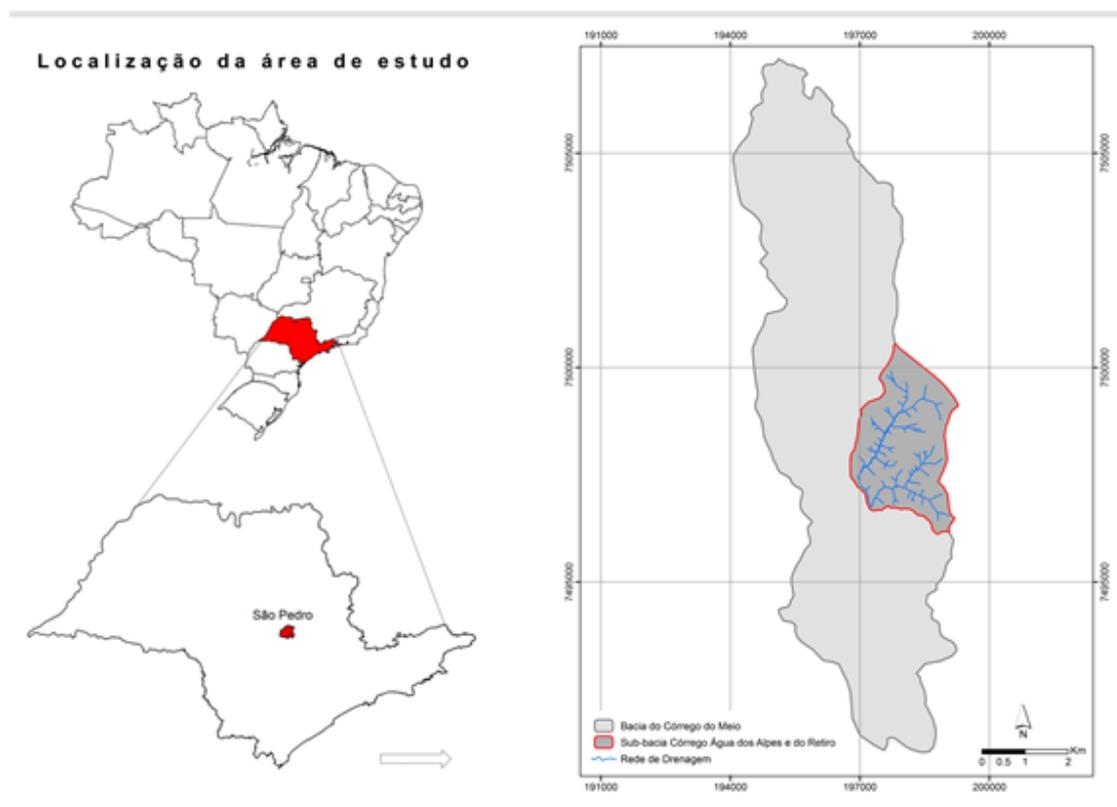


Figura 1. Mapa de localização da área em estudo.

Quanto as características gerais da área em estudo, o clima predominante segundo a classificação de Köppen é o CWa (clima sub-tropical úmido) com inverno seco e verão quente (ARAÚJO, 2011). No que tange as formações geológicas, predomina o afloramento de rochas sedimentares da Formação Pirambóia (PEJON, 1992), que se caracterizam pela presença de arenitos finos de cores vermelha, branca e amarela, com estratificações cruzadas. Quanto aos materiais inconsolidados, segundo Gomes (2002), há ocorrência de materiais transportados e residuais associados à Formação Pirambóia, com espessuras entre 2 e 10m, e sedimentos aluvionares. E de acordo com o IPT (1981), a geomorfologia da área está inserida na Depressão Periférica Paulista.

Em relação às feições erosivas, Gomes (2002) identificou a alta susceptibilidade da área à formação de erosões, desde sulco à voçoroca, em decorrência das características geológicas e do relevo. As erosões estão associadas principalmente aos materiais da Formação Pirambóia (solos transportados), e também aos terrenos inclinados (declividade superior a 10%), localizados próximos às redes de drenagem. O processo na área pode ainda ser acelerado, devido a práticas inadequadas decorrentes das atividades antrópicas.

3.2 Métodos

A **Figura 2** apresenta a sistemática de trabalho adotada. Apesar deste estudo ter sido realizado fora da área do Pantanal o procedimento metodológico apresentado pode ser aplicado a qualquer área para a definição do fluxo acumulado de água.

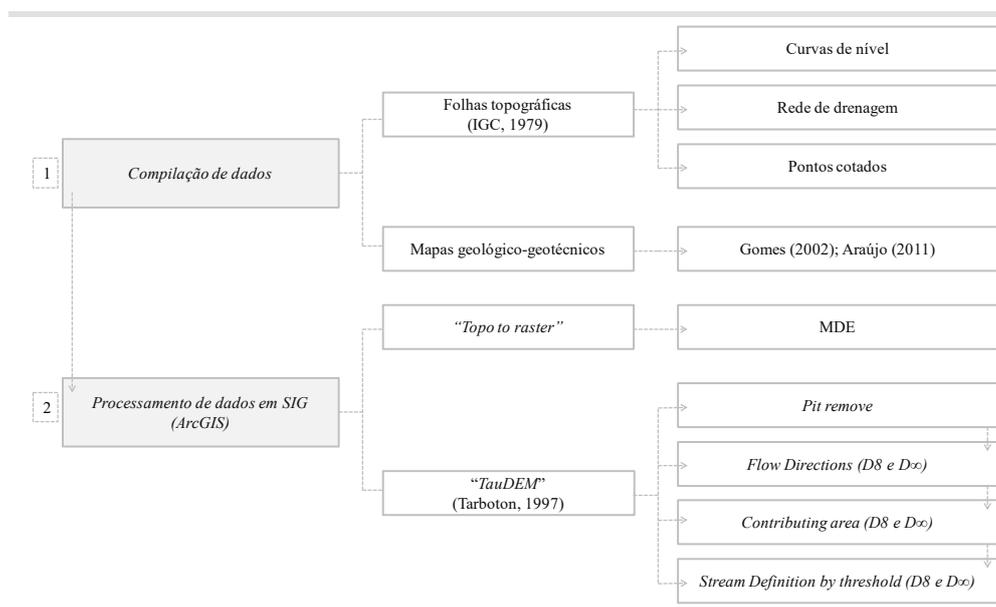


Figura 2. Etapas de trabalho.

Quanto as características gerais da área em estudo, o clima predominante segundo a classificação de Köppen é o CWa (clima sub-tropical úmido) com inverno seco e verão quente (ARAÚJO, 2011). No que tange as formações geológicas, predomina o afloramento de rochas sedimentares da Formação Pirambóia (PEJON, 1992), que se caracterizam pela presença de arenitos finos de cores vermelha, branca e amarela, com estratificações cruzadas. Quanto aos materiais inconsolidados, segundo Gomes (2002), há ocorrência de materiais transportados e residuais associados à Formação Pirambóia, com espessuras entre 2 e 10m, e sedimentos aluvionares. E de acordo com o IPT (1981), a geomorfologia da área está inserida na Depressão Periférica Paulista.

Em relação às feições erosivas, Gomes (2002) identificou a alta susceptibilidade da área à formação de erosões, desde sulco à voçoroca, em decorrência das características geológicas e do relevo. As erosões estão associadas principalmente aos materiais da Formação Pirambóia (solos transportados), e também aos terrenos inclinados (declividade superior a 10%), localizados próximos às redes de drenagem. O processo na área pode ainda ser acelerado, devido a práticas inadequadas decorrentes das atividades antrópicas.

3.2.1 Compilação de dados existentes

Esta etapa compreendeu o levantamento de informações existentes da área em estudo: dados bibliográficos, folhas topográficas e mapas geológico-geotécnicos. As folhas topográficas, na escala 1:10.000, foram obtidas do IGC (1979); e os mapas geológico-geotécnico de trabalhos já realizados na área em estudo, como: Gomes (2002) e Araújo (2011), elaborados em escala de detalhe. As curvas de nível, pontos cotados, rede de drenagem e mapas de inventário de feições erosivas, já haviam sido vetorizados, portanto nesta etapa realizou-se a adequação destes arquivos para a área em estudo. Todos os dados compilados nesta etapa foram organizados em um banco de dados georreferenciados.

3.2.2 Processamento em SIG

Para a elaboração dos produtos cartográficos obtidos nesta etapa foram utilizados os software ArcGIS® 10.3 e o TauDEM - *Terrain Analysis Using Digital Elevation Models* (Tarboton, 1997).

- *Modelo Digital de Elevação (MDE)*: a partir das curvas de nível (equidistância de 5m), pontos cotados e rede de drenagem, elaborou-se o MDE (Modelo Digital de Elevação). Para isto, foi utilizada a ferramenta “*3D Analyst Tools - Raster Interpolation - Topo to raster*”, que realiza a interpolação a partir das isolinhas de altimetria. Considerando a escala dos dados de entrada (1:10.000) e a representação adequada dos detalhes do terreno, o MDE foi elaborado com um pixel de 2m de resolução. Após a obtenção do MDE realizou-se um teste para avaliar sua precisão, inicialmente foi aplicado um filtro para corrigir os possíveis erros (*TauDEM Tools - Basic Grid Analysis - Pit Remove*), e em seguida foram geradas curvas de nível (*3D Analyst Tools - Raster Surface - Contour*) com a mesma equidistância das curvas obtidas pelas folhas topográficas.

- *Direção de Fluxo (Flow Direction)*: o mapa de direção de fluxo foi elaborado utilizando os algoritmos D8 e *D-Infinity*. No método D8, a direção do fluxo é definida a partir da diferença de cota existente entre oito pixels vizinhos, para isto, considerando uma célula central entre estes pixels, são definidos códigos, a fim de determinar a direção do fluxo de acordo com o pixel de menor cota (O’callaghan; Mark, 1984). No método *D-Infinity*, podem ser obtidas infinitas possibilidades de direção de fluxo, distribuídas proporcionalmente entre os pixels, para calcular estas direções considera-se a declividade existente entre as facetas triangulares (Tarboton, 1997). A **Figura 3** apresenta uma representação dos métodos utilizados.

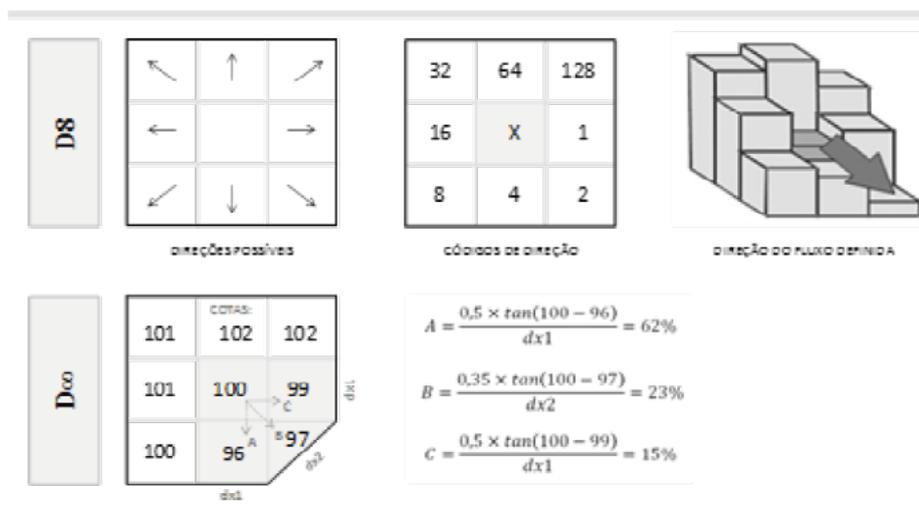


Figura 3. Métodos para determinar as direções de fluxo. Adaptado de Bosquilia et al. (2014).

- *Área de contribuição (Contributing area):* as áreas de contribuição são definidas a partir da direção de fluxo, considerando a quantidade de células que drenam para a jusante, desta maneira, podem-se determinar as áreas com acúmulo de água, até o exutório da bacia (BOS-QUILIA, 2014). Os mapas de área de contribuição também foram elaborados utilizando os dois algoritmos (D8 e D-*Infinity*). A **Figura 4** apresenta um esquema para determinação destas áreas.

- *Delimitação das drenagens (Stream Definition by Threshold):* para delimitar as drenagens foram utilizados os mapas de área de contribuição obtidos pelos métodos D8 e D-*Infinity*. Para isto, foram estabelecidos os *threshold*, parâmetro que determina se um determinado número de pixels pode ser considerado um canal de drenagem, desta forma, para os pixels com valores menor que o *threshold*, atribui-se o valor 0, e para os maiores valor 1.

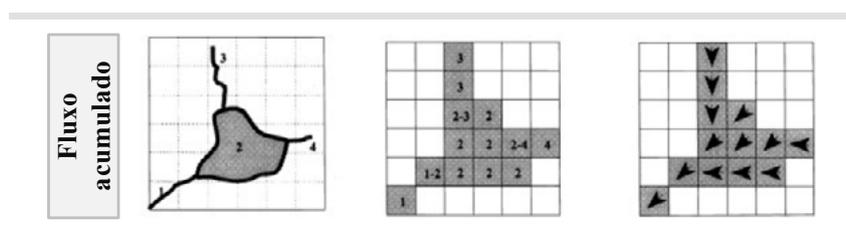


Figura 4. Representação do fluxo acumulado. Adaptado de Sobrinho et al. (2010).

4. Resultados e Discussão

Neste estudo foram obtidos os mapas de área de contribuição a partir dos diferentes métodos de interpolação, D8 e D-*Infinity*. Toda a análise hidrológica foi realizada com base no Modelo Digital de Elevação (MDE) apresentado na **Figura 5**. Após a obtenção do MDE foram realizados os testes, a fim de verificar sua precisão, que mostraram-se satisfatórios, indicando que o modelo poderia ser utilizado como base para a realização das outras etapas deste trabalho.

A **Figura 6** apresenta o mapa de área de contribuição obtido pelo método D8 e a **Figura 7** o mapa obtido pelo D-*Infinity*. Destaca-se que os mapas foram apresentados em escala logarítmica, a fim de ressaltar os valores de área de contribuição, uma vez que os mesmos apresentam uma grande variabilidade em relação à distribuição dos dados.

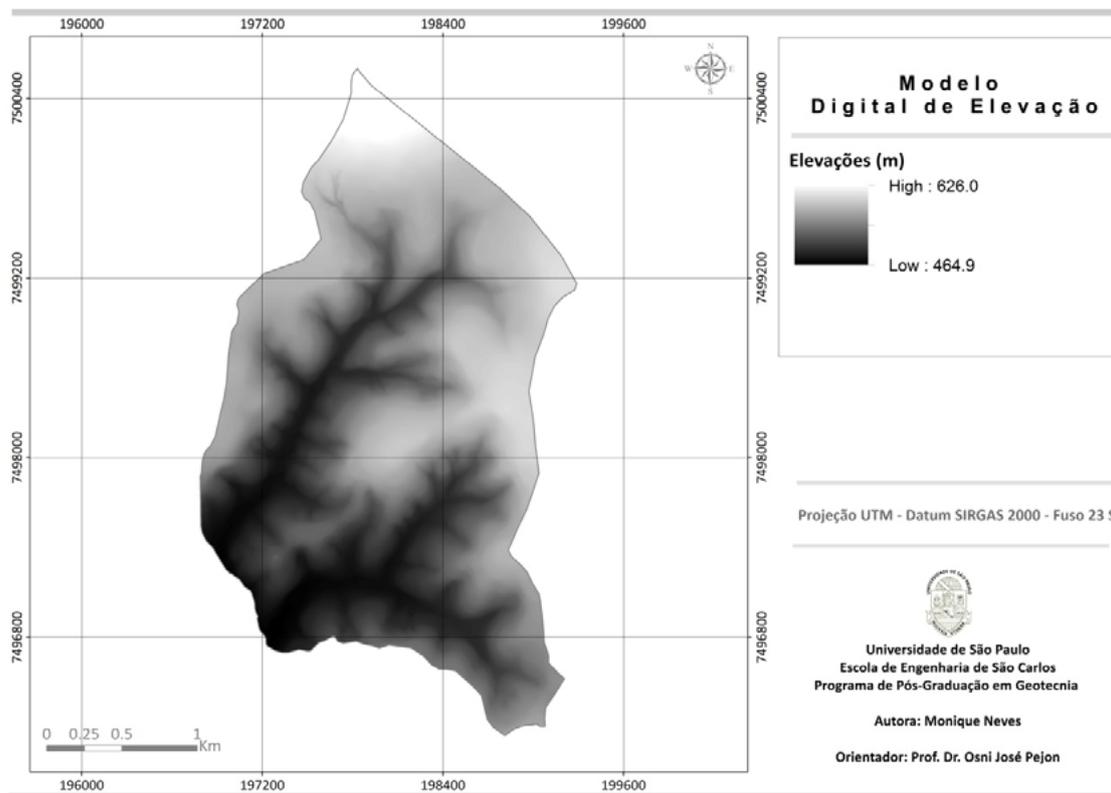


Figura 5. Modelo Digital de Elevação (MDE).

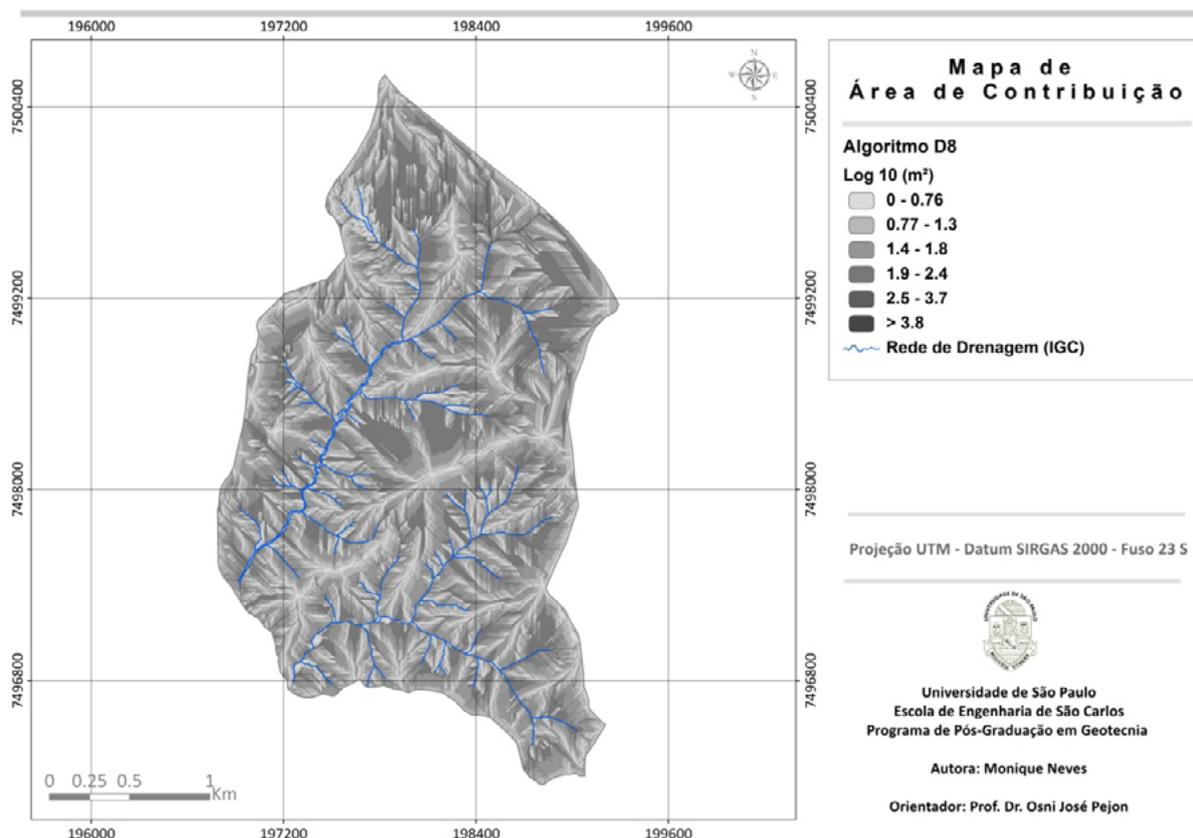


Figura 6. Área de contribuição obtida pelo método D8.

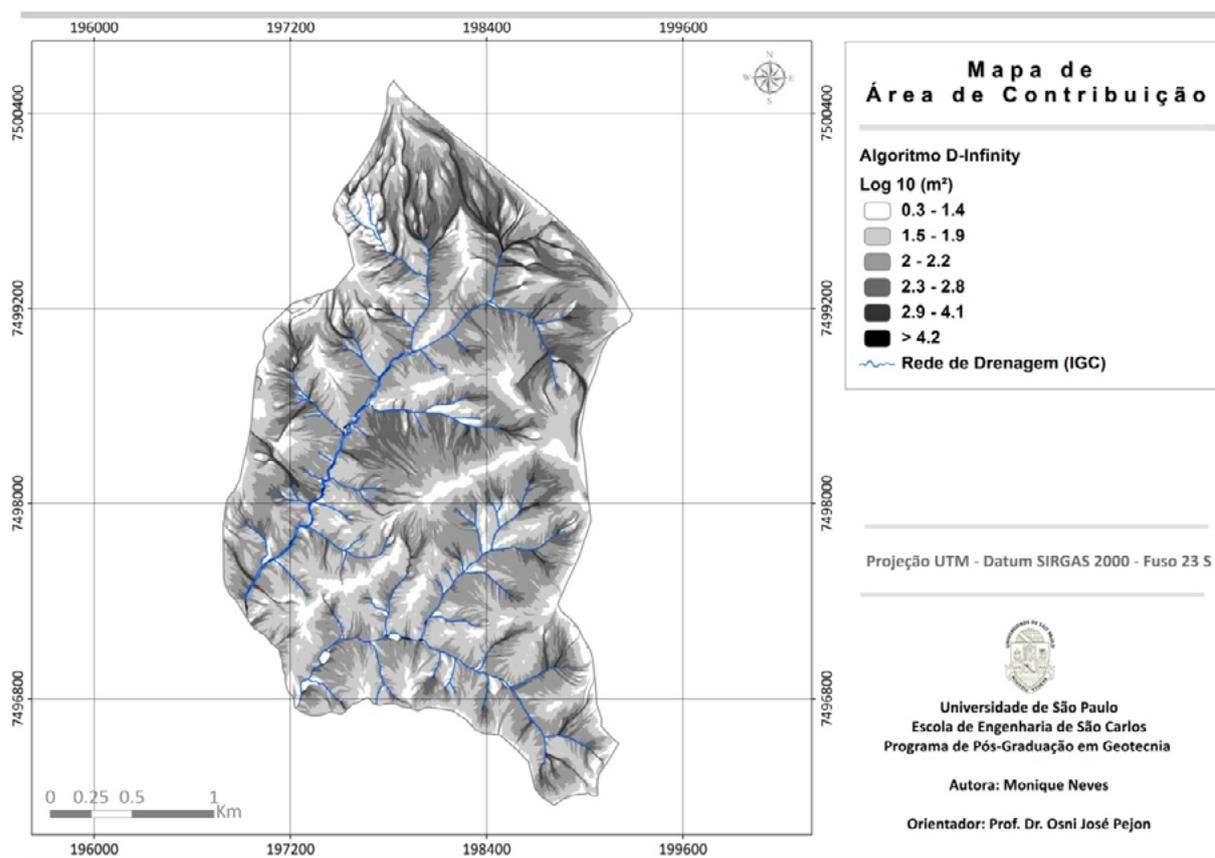


Figura 7. Área de contribuição obtida pelo método *D-Infinity*.

A **Figura 8** apresenta uma região da bacia com a rede de drenagem obtida pelos métodos D8 e *D-Infinity*, e também a rede de drenagem digitalizada a partir das folhas topográficas do IGC. Os *threshold* utilizados foram 1000 para o método D8, e 1250 para o *D-Infinity*. Ressalta-se que, para estabelecimento destes valores foram realizados testes, a fim de analisar aquele que mais se adequava a área em estudo.

Verifica-se que, visualmente, o método D8 tende a apresentar canais de drenagem mais retilíneos, diferente do método *D-Infinity*, que apresentou resultados mais fidedignos a rede de drenagem obtida pelas folhas topográficas.

A fim de analisar a relação entre as áreas de contribuição e as feições erosivas existentes na área em estudo, elaboraram-se os mapas da **Figura 9**, que mostram uma região da bacia com grande concentração de feições erosivas. Verifica-se que, o mapa obtido pelo método *D-Infinity* apresenta melhores resultados, uma vez que define regiões de distribuição de fluxo mais representativas da realidade, ou seja, estas zonas apresentam conformidade com as características da área, mostrando, inclusive, melhor concordância com a rede de drenagem obtida pelas folhas do IGC. Pode-se constatar também que estas áreas estão relacionadas com as erosões existentes, mostrando que zonas de acumulação de água, podem levar a ocorrência de processos erosivos.

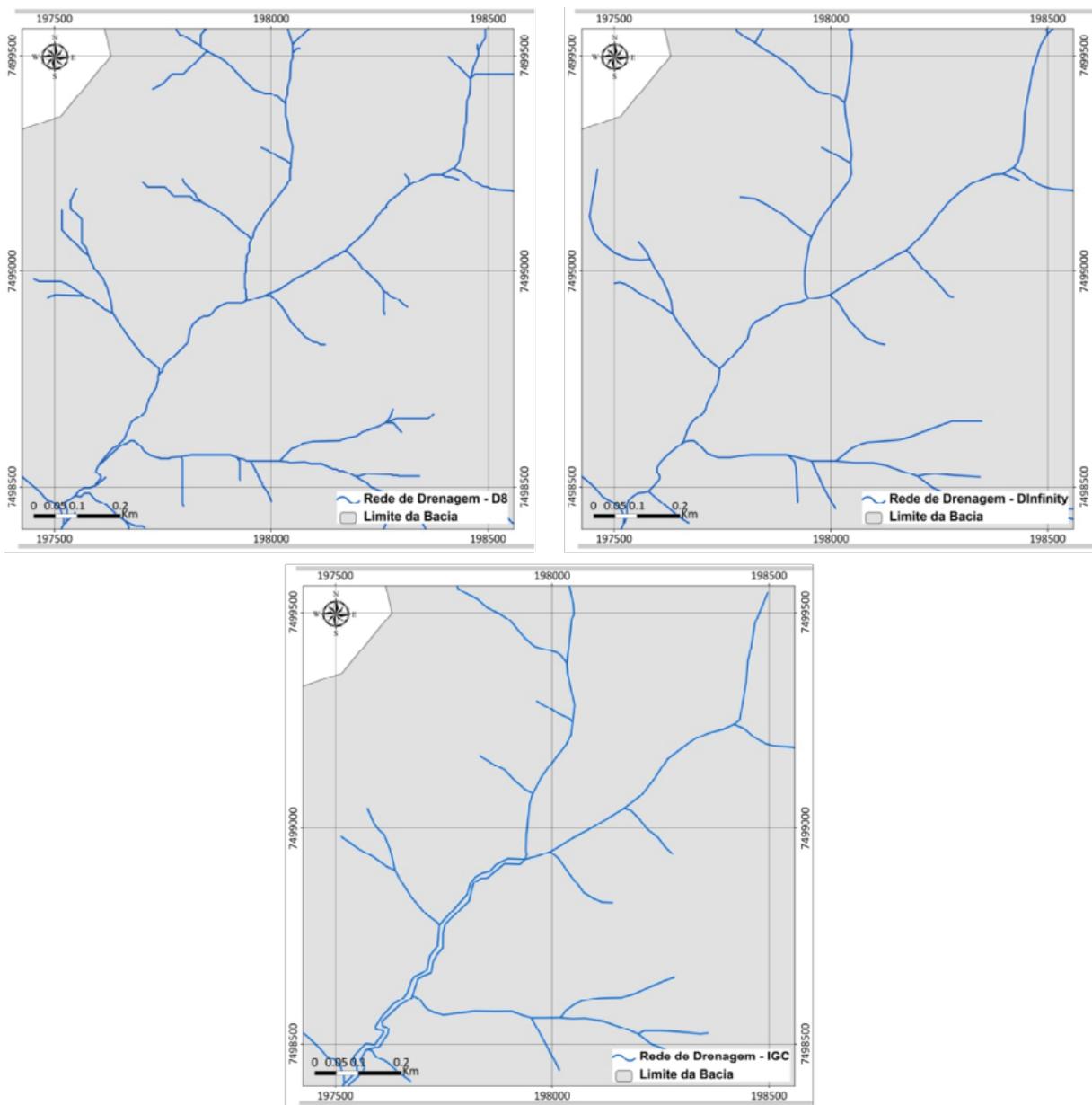


Figura 8. Redes de drenagem obtidas pelos métodos D8 e *D-Infinity*, e pelas folhas topográficas (IGC).

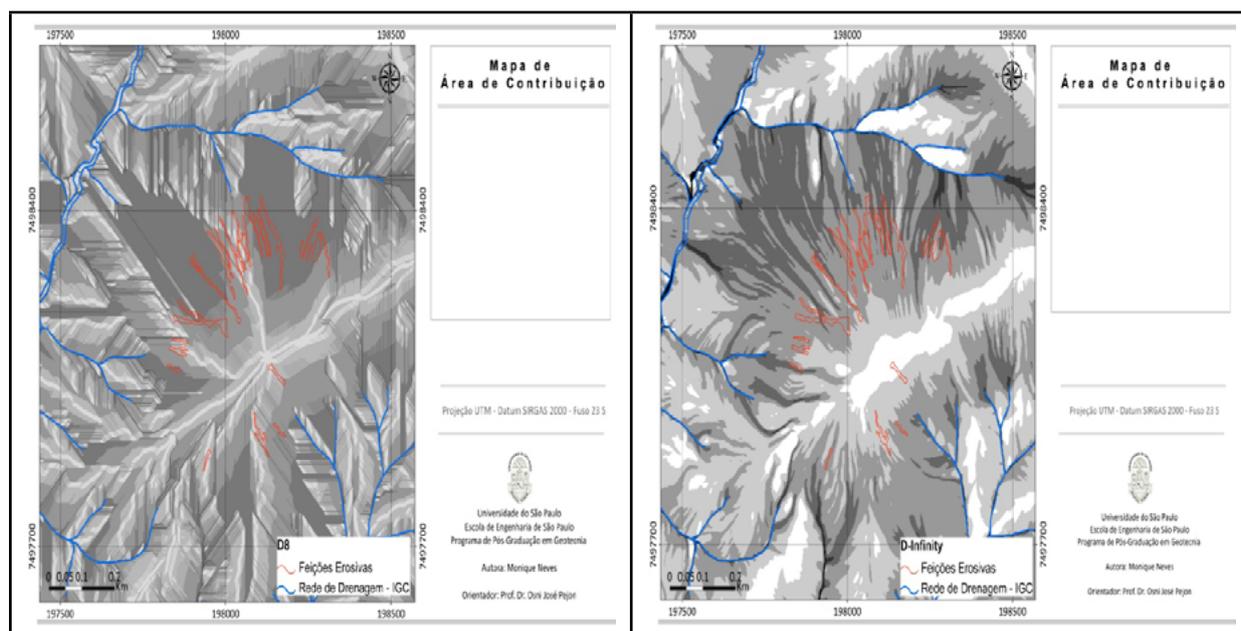


Figura 9. Mapas de área de contribuição e feições erosivas.

5. Conclusões

A área em estudo é altamente suscetível a ocorrência de processos erosivos, desta forma torna-se fundamental o desenvolvimento de estudos que indiquem as possíveis relações entre o surgimento de erosões e processos do meio físico, como condições hidrológicas, abordando especificamente as zonas de acumulação de água.

A partir da análise hidrológica desenvolvida neste trabalho, pode-se comparar as metodologias para obtenção dos mapas de área de contribuição. Como constatado por outros autores, verificou-se que o algoritmo desenvolvido por Tarboton (1997) apresenta melhores resultados, uma vez que permite uma análise mais consistente da área, em conformidade com as características do meio físico. A representatividade deste método também foi avaliada através da elaboração da rede de drenagem, que resultou em um mapa com características mais similares a rede drenagem digitalizada a partir das folhas topográficas. Desta forma, conclui-se que o método *D-Infinity* apresenta maior confiabilidade para aplicação em estudos, que visem à análise de processos erosivos.

Verifica-se ainda que a metodologia de trabalho adotada pode ser aplicada nas bacias hidrográficas localizadas na região do Pantanal, que apresentam susceptibilidade à ocorrência de erosão, como: Bacia do Rio Taquari (Abdon, 2004) e Bacia do Alto Taquari (Machado, 2010).

6. Agradecimentos

Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pela concessão da bolsa de mestrado.

7. Referências

Abdon, M. M. **Os impactos ambientais no meio físico - erosão e assoreamento na bacia hidrográfica do Rio Taquari, MS, em decorrência da pecuária.** 2004. 302 p. Tese (Engenharia ambiental). Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

Araújo, T. P. de. **Estudo do desencadeamento das erosões lineares concentradas em uma área do município de São Pedro/ SP.** 2011. 181p. Dissertação (Geotecnia) - Universidade de São Paulo, São Carlos. 2011.

- Bosquilia, R. W. D. **Geotecnologias aplicadas ao mapeamento de drenagens e nascentes**. 2014. 136p. Dissertação (Engenharia sistemas agrícolas). Universidade de São Paulo, Piracicaba. 2014.
- Farinasso M.; Carvalho Junior, O. A.; Guimarães, R. F.; Gomes, R. A. T.; Ramos, V. M. Avaliação qualitativa do potencial de erosão laminar em grandes áreas por meio da EUPS - Equação universal de perdas de solos utilizando novas metodologias em SIG para os cálculos dos seus fatores na região do Alto Parnaíba - PI-MA. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 2, p. 73-85, 2006.
- Gomes, D. M. **Mapeamento geológico-geotécnico para análise de feições erosivas concentradas na Bacia do Córrego Ribeirão do Meio, região de São Pedro/SP, na escala 1:20.000**. 2002. 242p. Dissertação (Geotecnia). Universidade de São Paulo, São Carlos. 2002.
- IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas. **Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo - 1:500.000**. USP/IPT: 1981.
- Jesus, N. **Avaliação do Modelo Digital de Elevação Aster para análise morfométrica de bacias hidrográficas**. 2009. 154p. Tese (Análise ambiental). Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2009.
- Lopes, F. C. A. **Avaliação da influência da distribuição espacial da espessura do solo e do nível freático na estabilidade de encosta**. 2013. 124p. Dissertação (Geografia). Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2013.
- Machado, D. O. **Erosividade das chuvas e erosão hídrica em bacia hidrográfica do Bioma Pantanal**. 2010. 53p. Dissertação (Recursos hídricos). Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2010.
- O'Callaghan, J. F.; Mark, D. M. The extraction of drainage network from digital elevation data. **Computer vision, graphics image process**, v. 28, p. 323-344, 1984.
- Oliveira, A. H.; Silva, M. A.; Silva, M. L. N.; Curi, N.; Klinke Neto, G.; Freitas, D. A. F. Development of Topographic Factor Modeling for Application in Soil Erosion Models. In: Soriano, M. C. H. (Org.). **Soil Processes and Current Trends in Quality Assessment**. Croatia: Intech, 2013, v. 1, cap. 4, p. 50-68.
- Oliveira, A. H.; Silva, M. L. N.; Curi, N.; Klinke Neto, G.; Silva, M. A.; Araújo, E. F. Consistência hidrológica de modelos digitais de elevação (MDE) para definição da rede de drenagem na sub-bacia do Horto Florestal Terra Dura, Eldorado do Sul, RS. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 1259-1267, 2012.
- Pejon, O. J. **Mapeamento geotécnico regional da folha de piracicaba – SP (Escala 1:100.000): estudo de aspectos metodológicos, de caracterização e de apresentação de atributos**. 1992. 224p. Tese (Geotecnia). Universidade de São Paulo, São Carlos. 1992.
- Ramos, V. M.; Guimarães, R. F.; Redivo, A. L.; Carvalho Junior, O. A.; Fernandese, N. F.; Gomes, R. A. T. Avaliação de metodologias de determinação do cálculo de áreas de contribuição. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, n. 4, p. 41-49, 2003.
- Sobreira, F. G. Cartas geotécnicas em áreas sujeitas a escorregamentos. In: **Simpósio brasileiro de cartografia geotécnica e geoambiental**, 5, 2004, São Carlos, 2004, p. 151 - 153.
- Sobrinho, T. A.; Oliveira, P. T. S.; Rodrigues, D. B. B.; Ayres, F. M. Delimitação automática de bacias hidrográficas utilizando dados SRTM. **Revista engenharia agrícola**, Jaboticabal, v. 30, n. 1, p. 46-57, 2010.
- Tarboton, D. G. A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. **Water Resources Research**, v. 33, n. 2, p. 309-319, 1997.
- Tesfa, T. K.; Tarboton, D. G.; Watson, D. W.; Schreuders, K. A. T.; Baker, M. E., Wallace, R. M. Extraction of hydrological proximity measures form DEMs using parallel processing. **Environmental Modelling & Software**, v. 26, p. 1696-1709, 2011.