

Caracterização das áreas geradoras de sedimentos provenientes dos processos erosivos em vertentes escarpadas

Moisés Pereira Galvão Salgado ¹

Cesar Edwin Garcia Cortes ¹

Enrique Maurício del Castillo ¹

¹ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil
{salgado, cgarcia, castillo}@dsr.inpe.br

Abstract. The use of digital elevation model allows calculating a series of topographic variables that can assist in the terrain analysis. This article aims to characterize the contributing areas upstream of reservoirs in the watershed of the river Buritis, using topographic variables calculated from the digital elevation model SRTM. These areas have gully erosion features that can generate large amounts of sediments, threatening the sustainability of reservoirs on the study area. The terrain analysis was based on the spatial distribution of the following topographic variables: slope, plane curvature, profile curvature, altitude above drainage network, normalized altitude, wetness index, two-dimensional topographic factor, mass balance index, terrain ruggedness index and upslope area. The hypsometric analysis was performed and visualized using the bipolar differentiation technique. The terrain analysis was carried out using the modules of hydrology and morphometry of the System for Automated Geoscientific Analyses – SAGA. The terrain analysis indicates that the reservoirs which supply hydroelectric plants have a contribution area of 755 km². The area able to generate the sediments that could achieve the reservoirs reaches 63% of the total area of the watershed. Topographic variables calculated from the SRTM data allowed the characterization of the relief forms and their interaction with local erosion processes.

Palavras-chave: erosion modeling, morphometric analysis, water resources, modelagem da erosão, análise morfométrica, recursos hídricos.

1. Introdução

A erosão acelerada dos solos é um processo destrutivo que promove a degradação da estrutura do solo, destruindo o mais básico de todos os recursos naturais. Segundo Pimentel et al. (1995), o uso inadequado dos recursos naturais ao longo da história da humanidade já resultou em uma perda de aproximadamente um terço da terra arável do planeta devido à erosão acelerada do solo. De acordo com Lal (2003), a erosão é uma das principais ameaças à capacidade de produção agrícola e à sustentabilidade dos ecossistemas.

As consequências da erosão acelerada não se limitam à degradação do solo. Segundo Polyakov e Lal (2004), a aceleração do processo erosivo pode intensificar a poluição e o assoreamento dos cursos d'água e também contribuir para o aumento da emissão de gases de efeito estufa à atmosfera por meio da remoção do carbono orgânico do solo junto às águas de enxurradas. Além disto, a degradação da estrutura do solo em vertentes com alta declividade, como no caso das escarpas erosivas localizadas nas regiões de borda do Planalto Central, contribui para a ocorrência de desmoronamentos e outros tipos de movimento do regolito, conforme Christofolletti (1980).

A erosão acelerada tem sido uma preocupação constante em áreas situadas a montante de reservatórios de usinas hidroelétricas. De acordo com Lemos e Bahia (1992), quanto maior o aporte de sedimentos para dentro dos cursos d'água e reservatórios, menor é o tempo de vida útil da usina geradora. Sendo assim, a erosão acelerada apresenta uma série de riscos sociais, econômicos e ambientais, devendo ser cuidadosamente avaliada em seus vários aspectos.

Deste modo, a modelagem dos processos erosivos nas áreas de produção de sedimentos é de suma importância para a sustentabilidade do solo e dos recursos hídricos. Portanto, o presente trabalho teve como objetivo caracterizar as áreas com características topográficas propensas à intensificação dos processos erosivos e as áreas de produção de sedimentos que afetam os reservatórios presentes na área de estudo.

2. Metodologia de Trabalho

2.1. Caracterização da área de estudo

A microbacia do rio dos Buritis, ilustrada na Figura 1, possui uma área de 1.204,5 km² e localiza-se no estado de Goiás, na fronteira com a Bahia e está inserida na mesorregião do leste goiano, microrregião do vão do Paranã IBGE (2009).

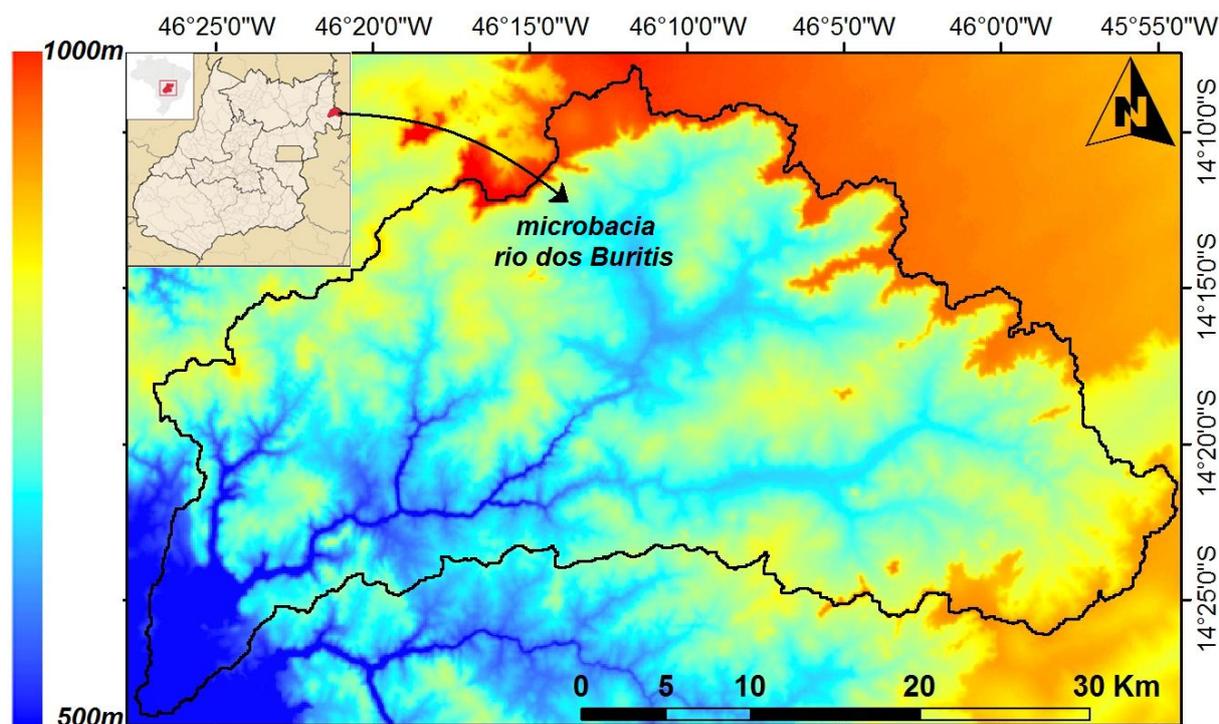


Figura 1. Limite da microbacia do rio dos Buritis sobreposto ao modelo digital de elevação SRTM em escala cromática de cores representando a variação altimétrica da área de estudo.

A microbacia do rio dos Buritis apresenta escarpas erosivas à montante das áreas de captação da microbacia. Estas vertentes escarpadas apresentam grandes feições erosivas, conforme ilustrado na Figura 2, comprometendo a vida útil dos reservatórios de água e desfavorecendo a manutenção das pequenas centrais hidroelétricas (PCH) localizadas no interior da microbacia.



Figura 2. Escarpas erosivas localizadas nas bordas do planalto central no estado de Goiás.

A região localizada à montante da microbacia tem como uso do solo predominante a agricultura extensiva, conforme representado na Figura 3, característica esta que favorece a intensificação dos processos erosivos nas vertentes escarpadas das regiões de borda do planalto. A microbacia apresenta fitofisionomias do bioma Cerrado, intercaladas com áreas de

pastagens em diferentes estágios de degradação e pequenas áreas de cultivo agrícola. Além disto, duas pequenas centrais hidroelétricas estão inseridas na microbacia. A PCH Santa Edwiges II, situada no município de Mambaí, e a PCH Santa Edwiges III, situada na divisa dos municípios de Buritinópolis e Posse, apresentam-se vulneráveis ao assoreamento decorrente dos processos erosivos localizados à montante da microbacia.

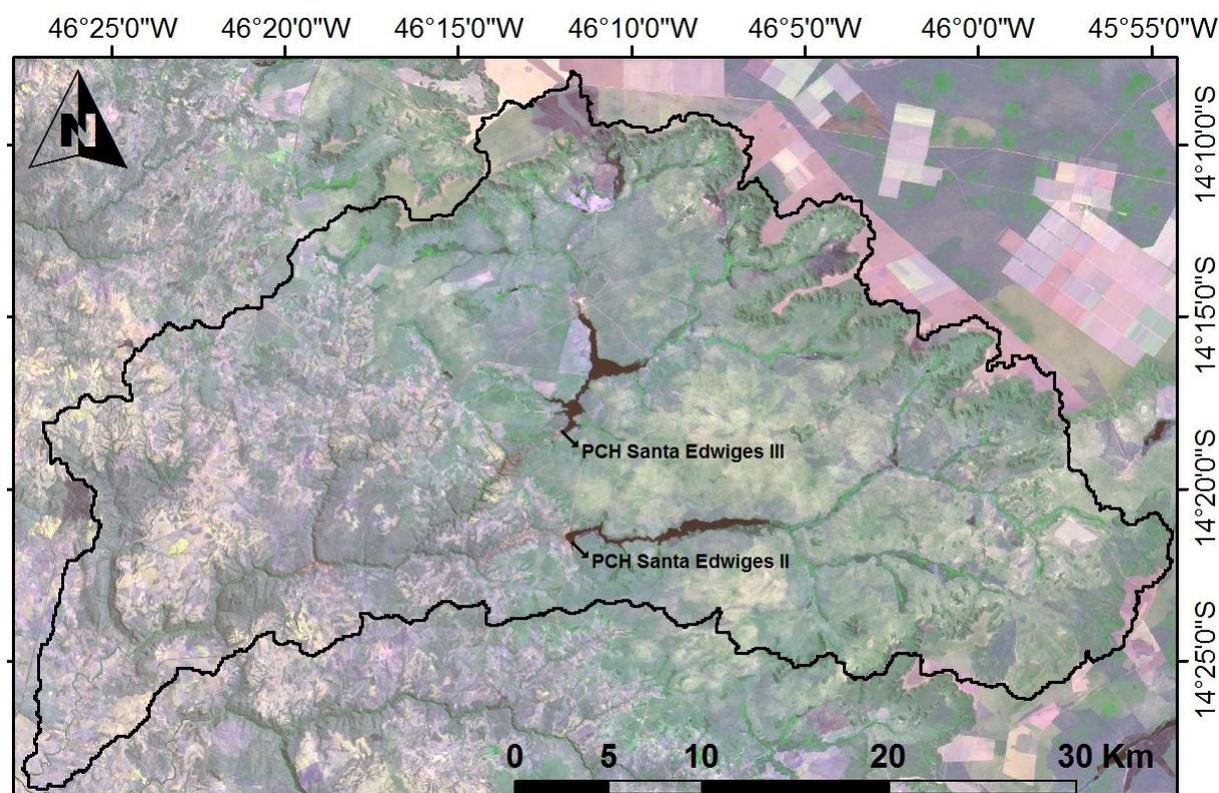


Figura 3. Representação do uso e cobertura da terra na microbacia do rio dos Buritis utilizando imagens TM/Landsat5, órbita/ponto 220/70, composição de bandas 5R 4G 3B.

2.2. Materiais e método

O modelo digital de elevação utilizado para a análise do terreno foi obtido a partir do mosaico disponibilizado por Miranda (2005), gerado com base nos dados *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM). A imagem orbital obtida pelo sensor TM/Landsat5 no dia 10 de setembro de 2008, obtida por meio do aplicativo *Glovis* USGS (2010), foi utilizada para a análise visual dos tipos de uso e cobertura da terra presentes na microbacia do rio dos Buritis.

A folha SD-23-Y-B do mosaico SRTM foi importada para o aplicativo *Global Mapper* Global Mapper Softwares (2008) e recortada de modo a cobrir as dimensões da área de estudo. Utilizou-se o aplicativo *System for Automated Geoscientific Analyses* (SAGA), desenvolvido por Böhner e Conrad (2009), para importar o MDE referente à área de estudo, estimar as possíveis trajetórias dos sedimentos gerados e calcular as variáveis utilizadas na identificação das áreas susceptíveis à intensificação dos processos erosivos.

Os módulos de análise do terreno (*Standard Terrain Analysis*), hidrologia (*Hydrology*) e morfometria (*Morphometry*) foram utilizados para calcular as variáveis topográficas necessárias à caracterização do potencial erosivo. O método de roteamento do fluxo nas células do MDE, denominado múltiplas direções de fluxo (*Multiple Flow Direction*), proposto por Freeman (1991) foi utilizado para estimar as características do fluxo e da rede de drenagem.

Foram calculadas as seguintes variáveis topográficas: declividade (*Slope*), curvatura horizontal (*Plane Curvature*), curvatura vertical (*Profile Curvature*), altitude acima da rede de

drenagem (*Altitude Above Drainage Network*), altitude normalizada (*Normalized Altitude*), índice de saturação do solo (*Wetness Index*), fator topográfico bidimensional (*LS-Factor*), índice de balanço de massa (*Mass Balance Index - MBI*), índice de rugosidade do terreno (*Terrain Ruggedness Index - TRI*) e área de contribuição (*Upslope Area*).

Foi realizada a análise hipsométrica com base no MDE e aplicou-se a técnica de diferenciação bipolar (*Bipolar Differentiation Technique*) utilizando uma equidistância de 20 metros de altitude para a transição de cores, conforme Prodobnikar (2009). A partir das variáveis topográficas geradas com base no MDE, foram analisadas as relações das formas do relevo local sobre os processos erosivos de remoção e deposição das partículas do solo, resultantes do escoamento superficial na microbacia do rio dos Buritis.

3. Resultados e Discussão

A análise da área de contribuição dos reservatórios presentes na microbacia do rio dos Buritis demonstrou que os sedimentos originários das vertentes escarpadas, localizadas nas bordas do planalto, atingem ambos os reservatórios. Observando a Figura 4 é possível identificar as áreas de contribuição dos reservatórios que abastecem as usinas hidroelétricas.

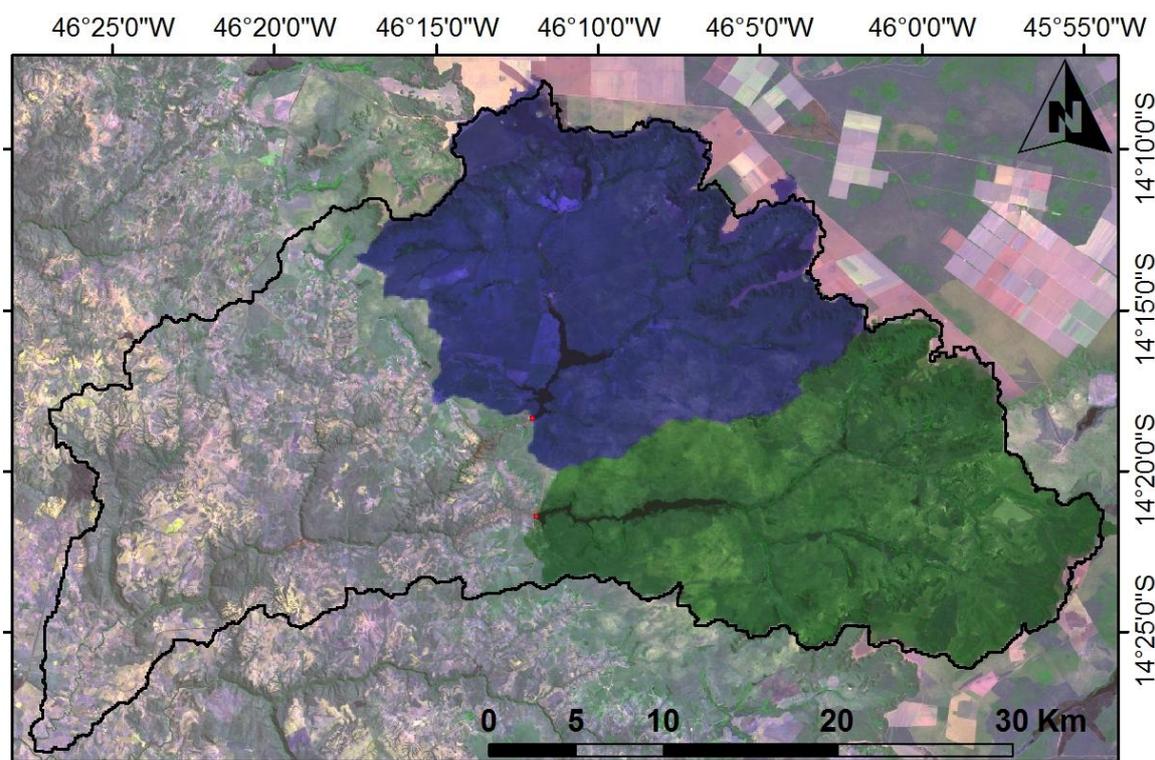


Figura 4. Representação da área de contribuição dos reservatórios que abastecem a PCH Santa Edwiges II (verde) e a PCH Santa Edwiges III (azul).

Os reservatórios que abastecem as PCH Santa Edwiges II e III apresentaram área de contribuição de 382 km² e 373 km², respectivamente. A área geradora dos sedimentos que atingem os reservatórios corresponde a 63% da área total da microbacia do rio dos Buritis.

A análise hipsométrica visualizada por meio da técnica de diferenciação bipolar, ilustrada na Figura 5, permitiu avaliar as variações altimétricas do terreno da microbacia do rio dos Buritis. A interpretação da Figura 5 assemelha-se à análise das isolinhas de um mapa altimétrico, quanto menor o espaçamento entre as cores maior a declividade local. Foi possível identificar as áreas com variações abruptas da altitude e declividade, característica das vertentes escarpadas localizadas nas regiões de rebordo do planalto, à montante da microbacia.

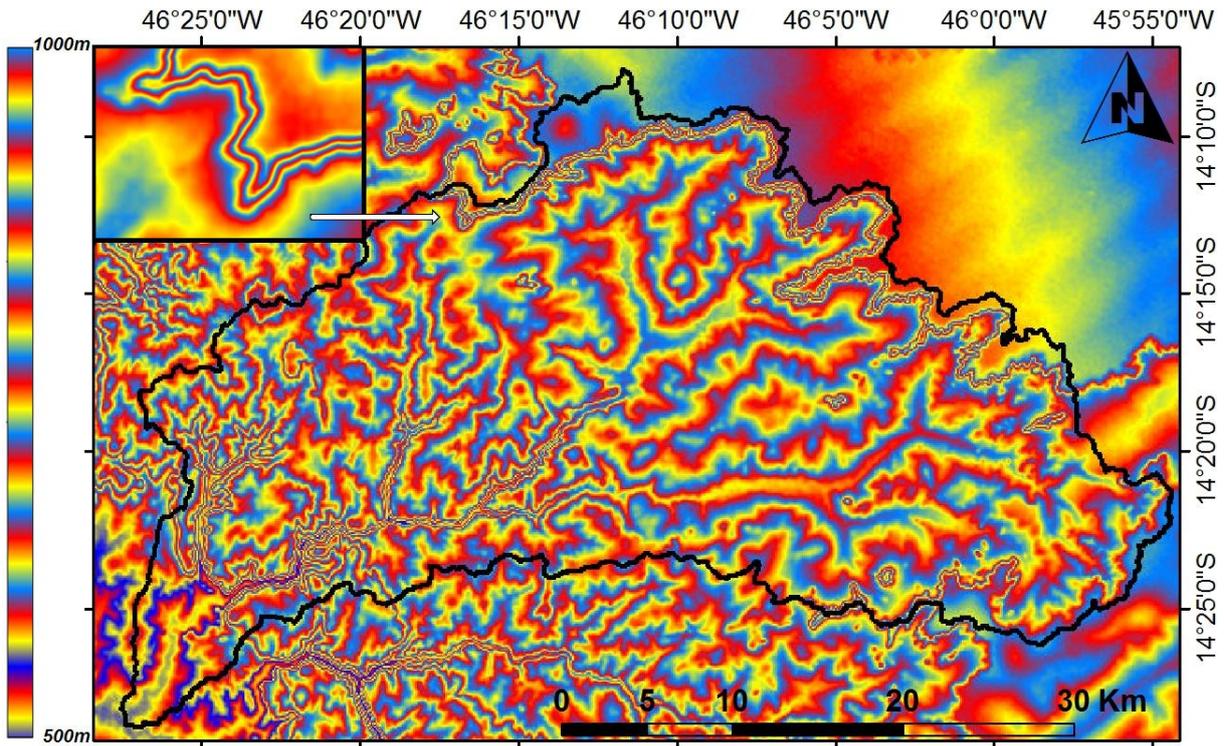


Figura 5. Representação da variação altimétrica da microbacia do rio dos Buritis.

Abaixo estão representadas as variáveis topográficas calculadas com base no MDE.

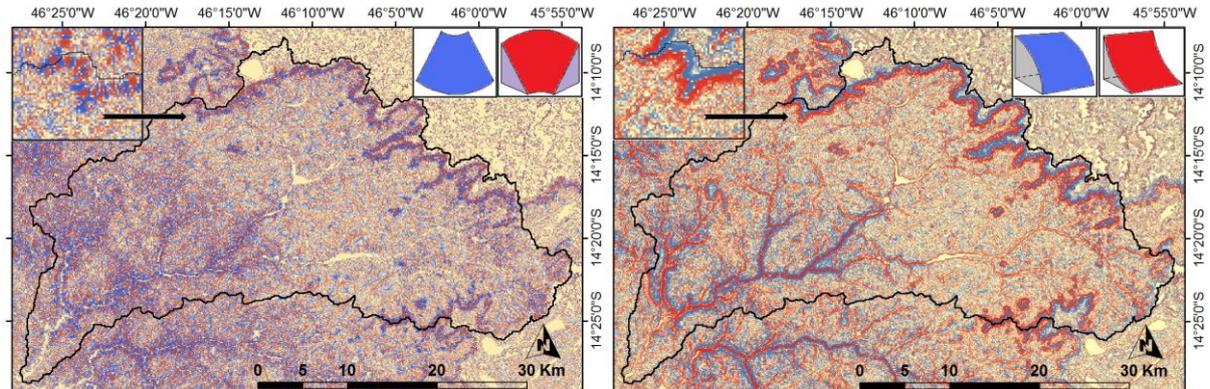


Figura 6. Curvaturas do terreno, horizontal (esq.) e vertical (dir.), convexa (azul) e côncava (vermelho).

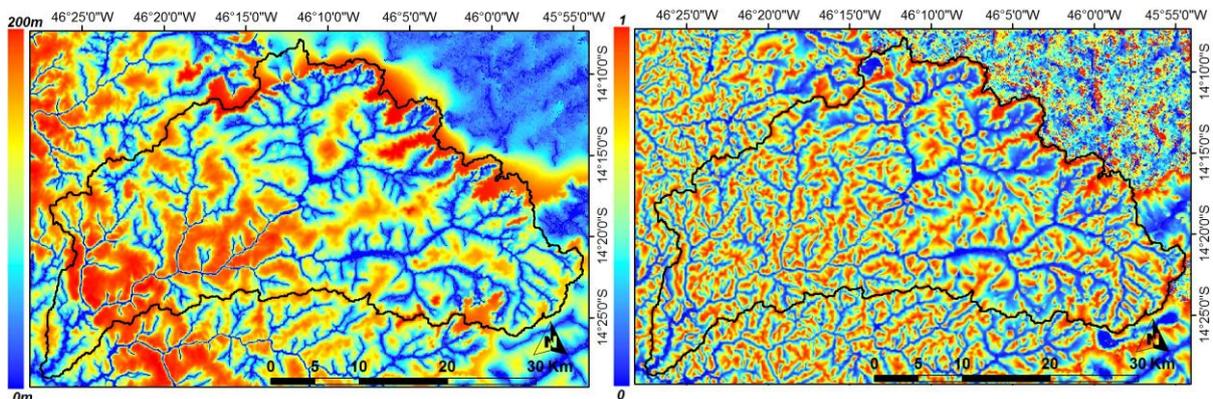


Figura 7. Altitude acima da rede de drenagem (esq.) e altitude normalizada (dir.).

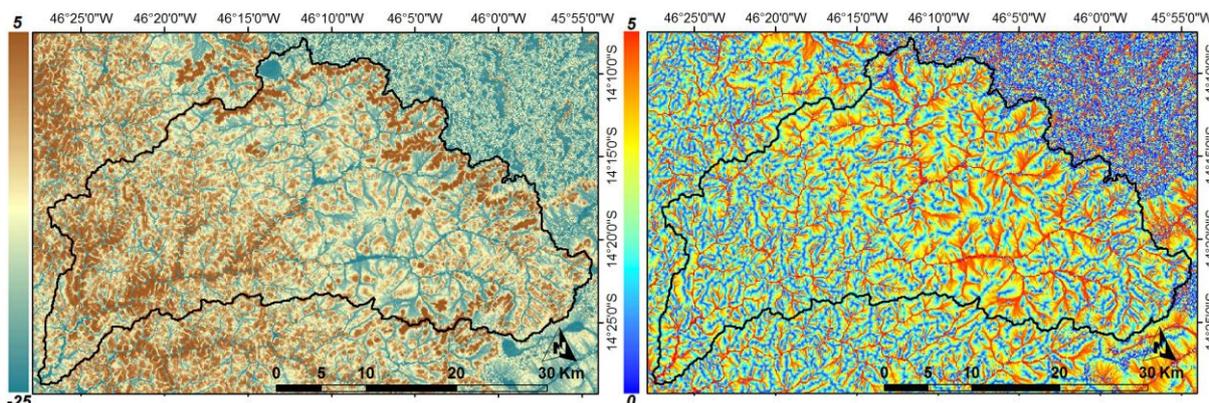


Figura 8. Índice de saturação do solo (esq.) e fator topográfico bidimensional (dir.)

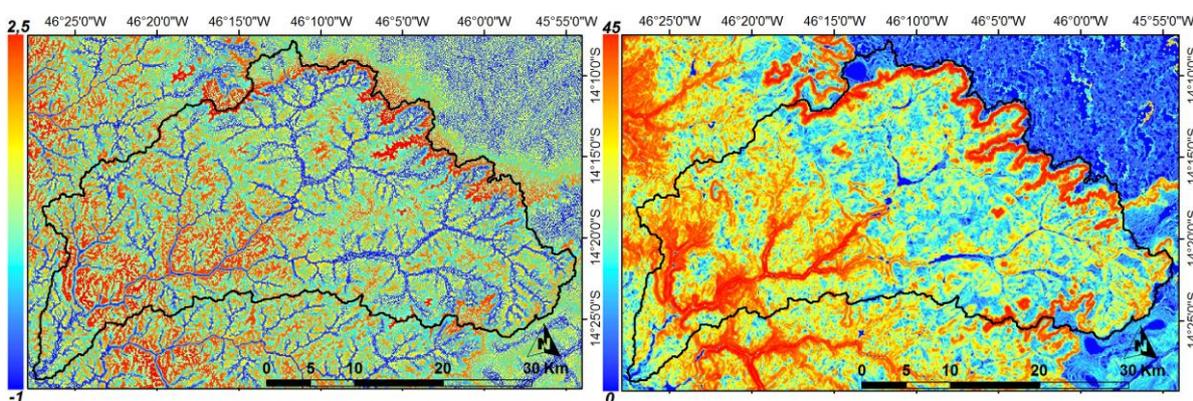


Figura 9. Índice de balanço de massa (esq.) e índice de rugosidade do terreno.

As variáveis topográficas calculadas a partir do MDE permitiram analisar a morfometria das vertentes escarpadas localizadas à montante da microbacia do rio dos Buritis. Com base nestas variáveis foram identificadas as características morfométricas das regiões geradoras de sedimentos. A análise da curvatura do terreno, representada na Figura 6, permitiu identificar os diferentes padrões de terreno presentes na microbacia. As vertentes escarpadas apresentaram curvatura horizontal seguindo um padrão de curvaturas côncavas e convexas dispostas alternadamente ao longo da extensão da vertente. Este padrão indica a ocorrência das áreas de divergência (convexo) e convergência (côncavo) do fluxo da água na vertente.

A análise da curvatura vertical das vertentes escarpadas demonstrou áreas de curvatura côncava na base das vertentes, sobrepostas por áreas de curvatura convexa no topo das vertentes. A curvatura vertical auxiliou o cálculo do índice de balanço de massa. O índice de balanço de massa é calculado por meio da combinação das variáveis topográficas: declividade, altitude acima da rede de drenagem e curvatura vertical. De acordo com Möller et al. (2009), os valores negativos de MBI representam áreas com saldo positivo de massa (*i.e.* áreas favoráveis à deposição de sedimentos), enquanto que os valores positivos de MBI correspondem às áreas com saldo negativo de massa (*i.e.* áreas geradoras de sedimentos)

A análise da distribuição espacial do índice de balanço de massa, ilustrada na Figura 9, indicou as áreas que favorecem a geração e a deposição dos sedimentos. As vertentes escarpadas apresentaram valores positivos de MBI, caracterizando-se como áreas geradoras de sedimentos, enquanto que as áreas ocupadas pelos reservatórios apresentaram valores negativos de MBI, caracterizando-se como áreas de deposição dos sedimentos.

Segundo Conrad et al. (2006) a altitude normalizada permite analisar a posição do terreno em relação à vertente, sendo que os valores próximos a zero (0) correspondem aos terrenos localizados nos canais da rede de drenagem e os valores próximos a um (1) indicam terrenos situados no topo do relevo. A análise da altitude acima da rede de drenagem e altitude

normalizada, representadas na Figura 7, permitiu identificar as principais áreas de escoamento dos sedimentos gerados nas vertentes à montante da microbacia.

O índice de saturação do solo e o fator topográfico bidimensional, representados na Figura 8, auxiliaram na caracterização do fluxo do escoamento superficial ao longo das vertentes. O índice de saturação do solo permite modelar a distribuição espacial das zonas de saturação do conteúdo de água na superfície do terreno, conforme indicado por Moore et al. (1993). Enquanto que o fator topográfico bidimensional, proposto por Desmet e Govers (1996), possibilitou a identificação das áreas com características topografias de maior suscetibilidade aos processos erosivos ocasionados pelo escoamento superficial. As áreas correspondentes aos canais que possibilitam o escoamento dos sedimentos das vertentes escarpadas apresentaram fator topográfico bidimensional elevado, esta característica favorece o transporte dos sedimentos até que alcancem os cursos d'água.

O índice de rugosidade do terreno, ilustrado na Figura 9, permite caracterizar a heterogeneidade da superfície do terreno e até mesmo identificar áreas que atuam como nichos para diferentes espécies, conforme Riley et al. (1999). A análise da distribuição espacial dos valores de TRI permitiu identificar as áreas caracterizadas por vertentes escarpadas à montante da microbacia, as áreas de planalto acima destas vertentes, áreas com superfícies menos rugosas localizadas abaixo das vertentes escarpadas e áreas com superfícies rugosas localizadas à jusante dos reservatórios.

A análise do perfil topográfico, ilustrada na Figura 10, permite visualizar a variação dos valores do índice de saturação do terreno (WI), fator topográfico bidimensional (LS), índice de balanço de massa (MBI) e índice de rugosidade do terreno (TRI) em uma área escarpada.

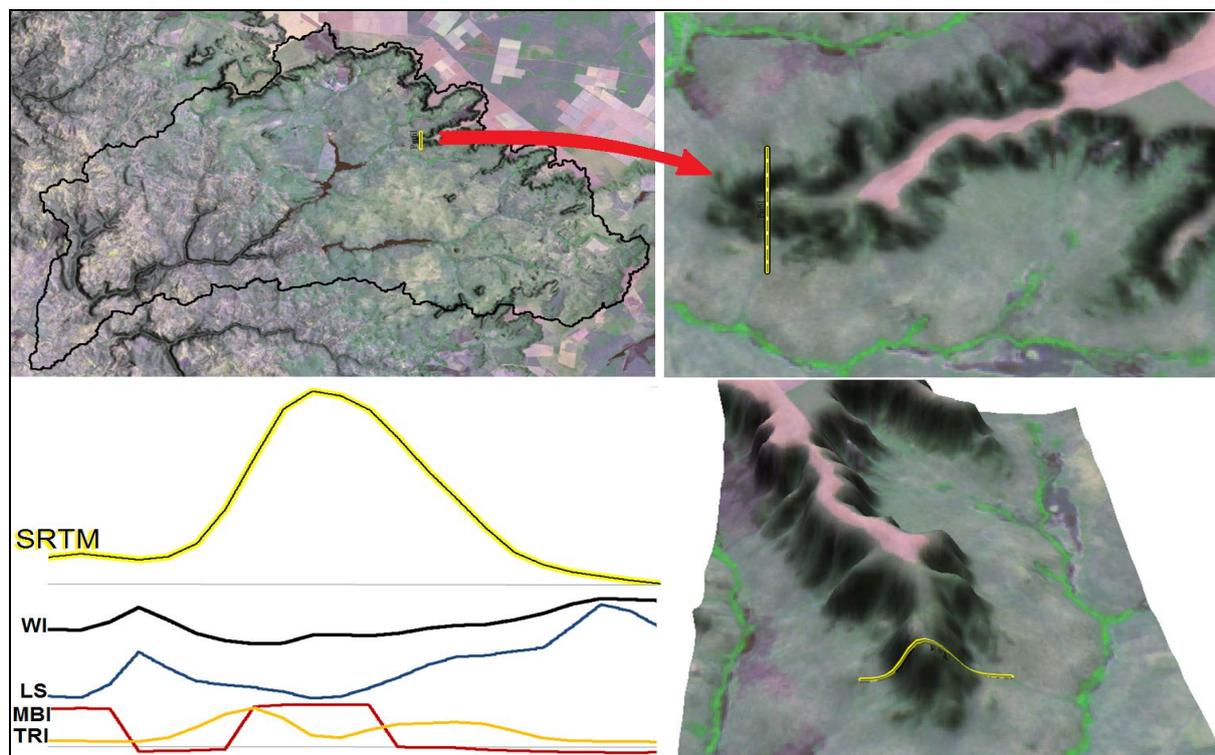


Figura 10. Perfil topográfico representando a variação altimétrica e o comportamento das variáveis *Wetness Index* (WI), *LS-Factor* (LS), *Mass Balance Index* (MBI) e *Terrain Ruggedness Index* (TRI) ao longo do perfil.

4. Conclusões

As vertentes escarpadas localizadas à montante da microbacia do rio dos Buritis compõem a área de produção de sedimentos que ameaça a vida útil dos reservatórios

presentes na microbacia. As variáveis extraídas a partir do MDE permitiram identificar as áreas geradoras de sedimentos e caracterizar as formas de relevo utilizando medidas quantitativas associadas à interação da topografia com os processos erosivos. A utilização destas variáveis topográficas possibilitou distinguir as diferentes participações das formas do relevo local sobre os processos de geração e redistribuição dos sedimentos produzidos.

Referências Bibliográficas

Böhner, J.; Conrad, O. (Coord.). **System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA)**. 2.0.5. Hamburg: Institute of Geography at the University of Hamburg, 2009. Disponível em: <<http://sourceforge.net/projects/saga-gis/files/>>. Acesso em: 22 set. 2010.

Christofoletti, A. **Geomorfologia**. 2. São Paulo: Edgard Blucher, 1980. 188 p.

Conrad, O.; Krüger, J. P.; Bock, M.; Gerold, G. Soil degradation risk assessment integrating terrain analysis and soil spatial prediction methods. In: International Conference Soil and Desertification, 2006, Hamburg. **Proceedings...** Hamburg: Coordination of Desert Net Germany, 2006. On-line. Disponível em: <http://www.desertnet.de/proceedings/content/Conrad_et_al.pdf>. Acesso em: 30 set. 2010.

Desmet, P.J.J.; Govers, G. A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 51, p. 427-433, 1996.

Freeman, G. T. Calculating catchment area with divergent flow based on a regular grid. **Computers and Geosciences**, v. 17, n. 3, p. 413-22, 1991.

Global Mapper Software LLC. **Global Mapper**. Versão 9.03. Parker: Global Mapper Software LLC, 2008.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Divisão Territorial do Brasil e Limites Territoriais. DTB_05_05_2009.xls**. Rio de Janeiro: IBGE. 2009. Disponível em <ftp://geofpt.ibge.gov.br/Organizacao/Divisao_Territorial/2009>. Acesso em 27 set. 2010.

Lal, R. Soil erosion and the global carbon budget. **Environment International**, v. 29, p. 437-450, 2003.

Lemos, M. S. S.; Bahia, V. G. Erosividade da chuva. **Informe Agropecuário**, v. 16, p. 25-31, 1992.

Miranda, E. E. (Coord.). **Brasil em Relevo**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2005. Disponível em: <<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br>>. Acesso em: 30 set. 2010.

Möeller, M.; Volk, M.; Friedrich, K.; Lymburner, L. Placing soil-genesis and transport processes into a landscape context: A multiscale terrain-analysis approach. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 171, p. 419-430, 2008.

Moore, I. D.; Gessler, P. E.; Nielsen, G. A.; Peterson, G. A. Soil attribute prediction using terrain analysis. **Soil Science Society of America Journal**, v. 57, p. 443-452, 1993.

Pimentel, D.; Harvey, C.; Resosudarmo, P.; Sinclair, K.; Kurz, D.; McNair, M.; Crist, S. Shpritz, L. Fitton, L. Saffouri, R. Blair, R. Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits. **Science**, v. 267, p. 1117-1122, 1995.

Podobnikar, T. Methods for visual quality assessment of a digital terrain model. **Surveys and Perspectives integrating Environment and Society**, v. 2, n. 2, p. 19, 2009.

Polyakov, V.; Lai, R. Modeling soil organic matter dynamics as affected by soil water erosion. **Environment International**, v. 30, p. 547-556, 2004.

Riley, S. J.; DeGloria, S. D.; Elliot, R. A terrain ruggedness index that quantifies topographic heterogeneity. **Intermountain Journal of Sciences**, v. 5, p. 23-27, 1999.

United States Geological Survey (USGS). **Global Visualization Viewer (Glovis)**. Disponível em:<<http://glovis.usgs.gov/>>. Acesso em: 23 ago. 2010.