

ANÁLISE DO RELEVO PARA O MAPEAMENTO DE ÁREAS FAVORÁVEIS AO PROCESSO DE INFILTRAÇÃO

Anna Hoffmann Oliveira¹; Gustavo Klinke Neto²; Sueli Yoshinaga Pereira³

Resumo – A recarga tem início com a infiltração da água superficial através do perfil do solo, alcançando os aquíferos. Este processo pode levar dias, meses ou anos dependendo das características dos aquíferos, tais como sua profundidade, geologia e transmissividade. Os modelos hidrológicos são capazes de determinar o movimento de água no solo através dos processos de infiltração, percolação e escoamento superficial e subsuperficial. O objetivo deste trabalho foi aplicar o índice topográfico de umidade (Topographic Wetness Index – TWI) numa sub-bacia de 524 ha localizada às margens do Rio Mogi Guaçu, no município de Mogi Guaçu (SP). Nas áreas de cabeceira, onde o relevo é ondulado, a umidade é reduzida, em vista do favorecimento do escoamento superficial, refletindo diretamente na diminuição da infiltração de água. As áreas com elevado índice de umidade possuem maior potencial de recarga subterrânea de água e, portanto, o TWI foi eficaz em definir na paisagem as regiões mais favoráveis à infiltração da água no perfil do solo. Tais regiões se concentram preferencialmente nas conexões de áreas planas com regiões de concentrações de fluxo, o que torna fundamental a conservação da vegetação nestas áreas, a fim de aumentar a infiltração, reduzir a suscetibilidade à erosão e aumentar a recarga hídrica na sub-bacia.

Abstract – The recharge process begins with the infiltration of surface water through the soil profile, finding the aquifer. This process can take days, months or years depending on the characteristics of aquifers, such as its depth, geology and transmissivity. The hydrological models are able to determine the movement of water through the soil infiltration processes, leaching and surface and subsurface flow. The objective of this study was to apply the Topographic Wetness Index (TWI) in a sub-basin of 524 ha located on the banks of the Mogi Guaçu River, in Mogi Guaçu City (SP). In headwater areas, where the relief is wavy, moisture is reduced in view of favoring runoff, reflecting directly in the reduction of water infiltration. The areas with high moisture content have greater potential for groundwater recharge of water and therefore the TWI was effective in defining the landscape regions more favorable to infiltration of water in the soil

¹ Instituto de Geociências UNICAMP. Rua João Pandiá Calógeras, 51. Campinas. SP. Fone: +55 019 3521 4698. E-mail: anna.ufla@gmail.com

² Instituto de Geociências UNICAMP. Rua João Pandiá Calógeras, 51. Campinas. SP. Fone: +55 019 3521 4698. E-mail: gus.klinke@gmail.com

³ Instituto de Geociências UNICAMP. Rua João Pandiá Calógeras, 51. Campinas. SP. Fone: +55 019 3521 4698. E-mail: sueliyos@ige.unicamp.br

profile. Such regions are concentrated preferentially in the connections between flat areas and regions of higher flow accumulation, which makes essential the maintenance of the vegetation in these areas in order to enhance infiltration, reduce susceptibility to erosion and increase water clearance in the sub-basin.

Palavras-Chave – Índice topográfico. Infiltração. Fluxo acumulado.

1 INTRODUÇÃO

As componentes do ciclo hidrológico, como infiltração, evapotranspiração e escoamento superficial, necessitam considerar a caracterização do meio físico para o seu estudo. O comportamento do escoamento superficial é definido pela topografia que, por sua vez, define a bacia hidrográfica, unidade referência em estudos-físico territoriais. Em sub-bacias menores, a declividade é maior e as características do solo acarretam em áreas com mais expressividade do fenômeno de recarga de aquíferos, embora ocorra descarga nas surgências (Tucci, 2009). Quanto maiores a área, forma e declividade da bacia, tanto maior deverá ser a vazão máxima de escoamento superficial. A topografia influencia a velocidade da água e a capacidade de armazenamento da água sobre o solo, de forma que quanto mais plana é a área, maior a sua capacidade de armazenamento de água.

A recarga tem início com a infiltração da água superficial através do perfil do solo, alcançando os aquíferos. Este processo pode levar dias, meses ou anos dependendo das características dos aquíferos, tais como sua profundidade, geologia e transmissividade. Os modelos hidrológicos são capazes de determinar o movimento de água no solo através dos processos de infiltração, percolação e escoamento superficial e subsuperficial (Sabzavari et al., 2010). Em se tratando de um modelo de índice topográfico de umidade, é possível analisar a disponibilidade hídrica na paisagem, além de previsão de enchentes e planejamento de uso do solo mais eficazes em termos de redução da vulnerabilidade ambiental.

Segundo Capoane et al. (2015), a manutenção da qualidade ambiental de bacias hidrográficas agrícolas, está diretamente relacionada com áreas de saturação hídrica temporária ou permanente, que exercem uma importante função do ponto de vista hidrológico, ecológico e geomorfológico. Essas áreas apresentam forte relação com a dinâmica do lençol freático, devido à expansão e contração durante eventos pluviométricos.

A modelagem do relevo e dos atributos topográficos com finalidade de estudos hidrológicos, pedológicos e geomorfológicos vem se desenvolvendo rapidamente com o avanço da computação e a implementação de novas teorias e novos modelos de cálculo. Como resultado, os atributos

topográficos analisados podem ser divididos em primários e secundários ou compostos. Atributos primários podem ser obtidos diretamente do modelo digital de elevação (MDE) e incluem variáveis como elevação, declividade, plano e perfil de curvatura, caminho de fluxo e área específica de contribuição. Os atributos secundários ou compostos envolvem combinações de atributos primários e podem ser usados para caracterizar a variabilidade espacial de processos específicos que ocorrem na paisagem (Sirtoli et al., 2008).

Neste sentido, merece atenção especial a qualidade da base de dados que dará origem ao MDE. Atualmente, existe grande disponibilidade de diversas bases de dados altimétricos, como as cartas topográficas do território nacional digitalizadas, elaboradas pela Diretoria do Serviço Geográfico (DSG) do Exército na década de 70, e as bases globais digitais obtidas por radar, como a SRTM (90 m) e a TOPODATA (30 m). Contudo, cabe ressaltar que as citadas referências não apresentam resultados confiáveis para estudos mais detalhados em escala inferior a 1:50.000.

Numa bacia hidrográfica, áreas mais suscetíveis à saturação são àquelas onde o lençol freático localiza-se superficialmente, em pedoforma côncava. Componentes como relevo, geologia, hidrografia, solos e também as atividades antrópicas e cobertura vegetal, também podem atuar no aumento ou diminuição dessas áreas.

Portanto, a identificação de áreas com saturação hídrica temporária ou permanente é de grande relevância no entendimento da dinâmica hidrológica e os índices topográficos de umidade (TWI – acrônimo em inglês para Topographic Wetness Index) são de grande relevância neste sentido, pois abordam a relação entre a declividade local e a área de contribuição específica de montante possuindo, assim, uma variação espacial significativa (Capoane et al., 2015). Neste sentido, com o objetivo de identificar e mapear as áreas favoráveis a infiltração de água no perfil do solo, o presente trabalho utilizou um levantamento topográfico de alta precisão (escala 1:10.000) para analisar o relevo e os atributos topográficos a fim de aplicar o índice topográfico de umidade (TWI) em uma sub-bacia hidrográfica na planície aluvionar do Rio Mogi Guaçu.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

A sub-bacia de estudo possui área de 524 ha e está localizada às margens do médio curso superior do Rio Mogi Guaçu, no município de Mogi Guaçu (SP). A sub-bacia integra o Complexo de Unidades de Conservação de Mogi Guaçu (CUCMG), situado na zona de transição entre os biomas Cerrado e Mata Atlântica. Apresentando características bióticas de ambos os biomas, pode ser considerada uma área de tensão ecológica ou um ecótono e inclui também uma importante

parcela da Área de Preservação Permanente (APP) do Rio Mogi Guaçu, de suas sub-bacias e mananciais. Contudo, o relevo suave ondulado da área potencializa seu uso agrícola e urbano, aumentando assim a importância de sua conservação na matriz florestal da região.

O clima da região, conforme a classificação de Koppen, varia entre Aw (clima tropical com estação seca de inverno e chuvosa no verão) e Cwa (clima temperado úmido com inverno seco e verão quente) com médias anuais de temperatura de 21,5 °C e precipitação de 1.500 mm. As principais formações vegetais na sub-bacia são: Floresta Estacional Semidecidual Submontana (Mata Atlântica), Floresta Estacional Semidecidual Aluvial (Mata Galeria), vegetação com influência fluvial (várzeas e os campos úmidos), florestas de Pinus e Eucalipto não manejadas há cerca de 20 anos, e pastagem na mesma condição. Os solos da sub-bacia de estudo possuem textura média a arenosa e as classes presentes são o Gleissolo Háptico (GX) e Gleissolo Melânico (GM) distróficos e o Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA).

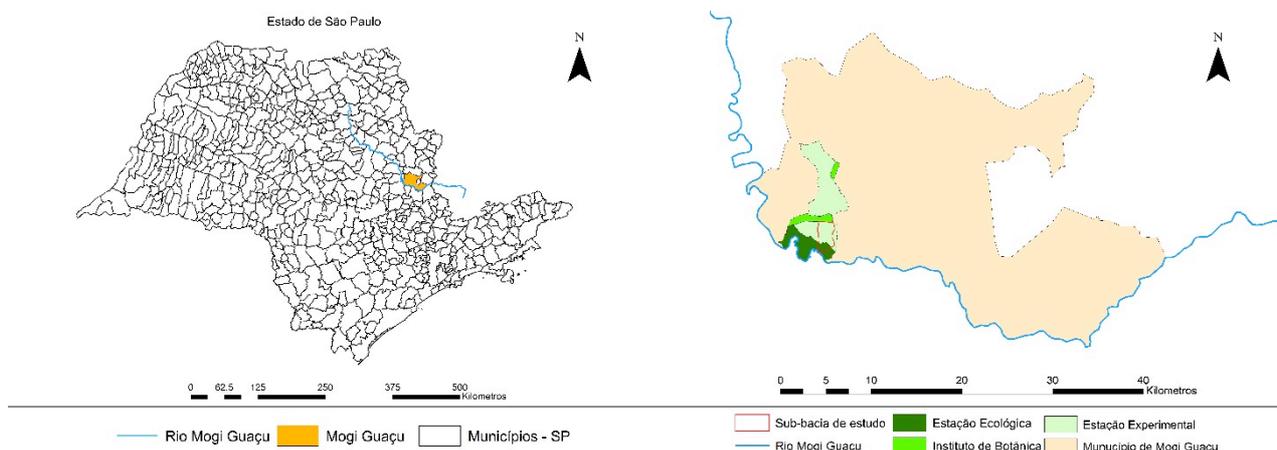


Figura 1 – Localização do Complexo de Unidades de Conservação de Mogi Guaçu (CUCMG) e da sub-bacia de estudo.

2.2 Índices topográficos

Com a finalidade de obtenção de uma base de dados sólida e detalhada para subsidiar a geração do modelo digital de elevação (MDE), foi realizado o levantamento topográfico de uma malha de pontos altimétricos com alta precisão espalhados arbitrariamente em toda a área de estudo, através do equipamento Receptor GNSS Geodésico Topcon Hiper L1/L2, com 40 canais universais capaz de rastrear sinais de satélites GPS e GLONASS, precisão horizontal de 3 mm + 0,5 PPM e precisão vertical de 5mm + 0,5 PPM. Os dados levantados foram transferidos para o software ArcGIS 10.2 onde foi realizada a construção do MDE com o auxílio da ferramenta Topo to Raster. Esta ferramenta apresenta um método específico de interpolação desenvolvido para a geração de

modelos de elevação hidrologicamente corretos. Seu funcionamento prioriza a geração de uma rede de fluxo coerente e conectada, bem como garante a correta representação das linhas de cumeada e das linhas de drenagens presentes na base original (Esri, 2014).

Os atributos topográficos obtidos a partir do MDE e utilizados para a geração do Índice Topográfico de Umidade foram: elevação, declividade, direção de fluxo, fluxo acumulado ou área de contribuição e o índice topográfico de umidade. Conceitualmente, a declividade do terreno é definida como a taxa de diminuição da altura na direção do aspecto, e o aspecto corresponde à direção de máximo gradiente (Minella e Merten, 2012). A declividade exerce influência direta sobre o fluxo da água, o processo erosivo, o sombreamento, a energia solar recebida, a reflectância da superfície, a temperatura, dentre outras variáveis.

A direção, a distribuição e a conseqüente acumulação do fluxo em um MDE são os principais pontos a serem controlados em um estudo hidrológico. Neste sentido, foi utilizado o software SAGA (System for Automated Geoscientific Analyses) que apresenta a mais completa base em relação aos algoritmos de direção de fluxo. Merece destaque na literatura e foram testados neste estudo os algoritmos D_{∞} (TARBOTON, 1997), MFD – Multiple Flow Direction (FREEMAN, 1991) e Rho 8 (FAIRFIELD & LEYMARIE, 1991). A área de contribuição é calculada a partir do produto do fluxo acumulado pela área de cada célula.

O índice topográfico de umidade (TWI), por definição, apresenta a distribuição das zonas de saturação de água superficial e do conteúdo de água nos solos (Sirtoli et al., 2008). Assim, com base no MDE, o TWI estima um balanço entre acúmulo de água e condições de drenagem em escala local (Hancock et al., 2010).

Numericamente o TWI é representado pela expressão (Beven e Kirkby, 1979):

$$TWI = \ln \frac{a}{\tan b}$$

onde: a = área de contribuição x tamanho do grid em m²; b = declividade expressa em radianos.

O modelo considera que o fluxo infiltra até um plano de mais baixa condutividade, em geral o contato solo-rocha, seguindo então um caminho determinado pela topografia.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise da topografia da sub-bacia obteve uma altitude média de 617 m e elevações mínima e máxima de 560 a 650 metros, respectivamente (Figura 1-A). A declividade, Figura 1-B, mostra uma área muito plana (Figura 1-B), de relevo bem suave, às margens do Rio Mogi Guaçu. A parte sudeste da sub-bacia apresenta uma área de várzea inundável sazonalmente, de relevo muito plano e rede de drenagem difusa, não apresentando um único canal principal de escoamento superficial.

Neste caso, o solo turfoso e de baixa densidade favorece diretamente a infiltração de água no perfil do solo, agindo também como área de retenção de sedimentos e consequente inibidor do assoreamento causado por perturbações no uso do solo na parte superior da bacia.

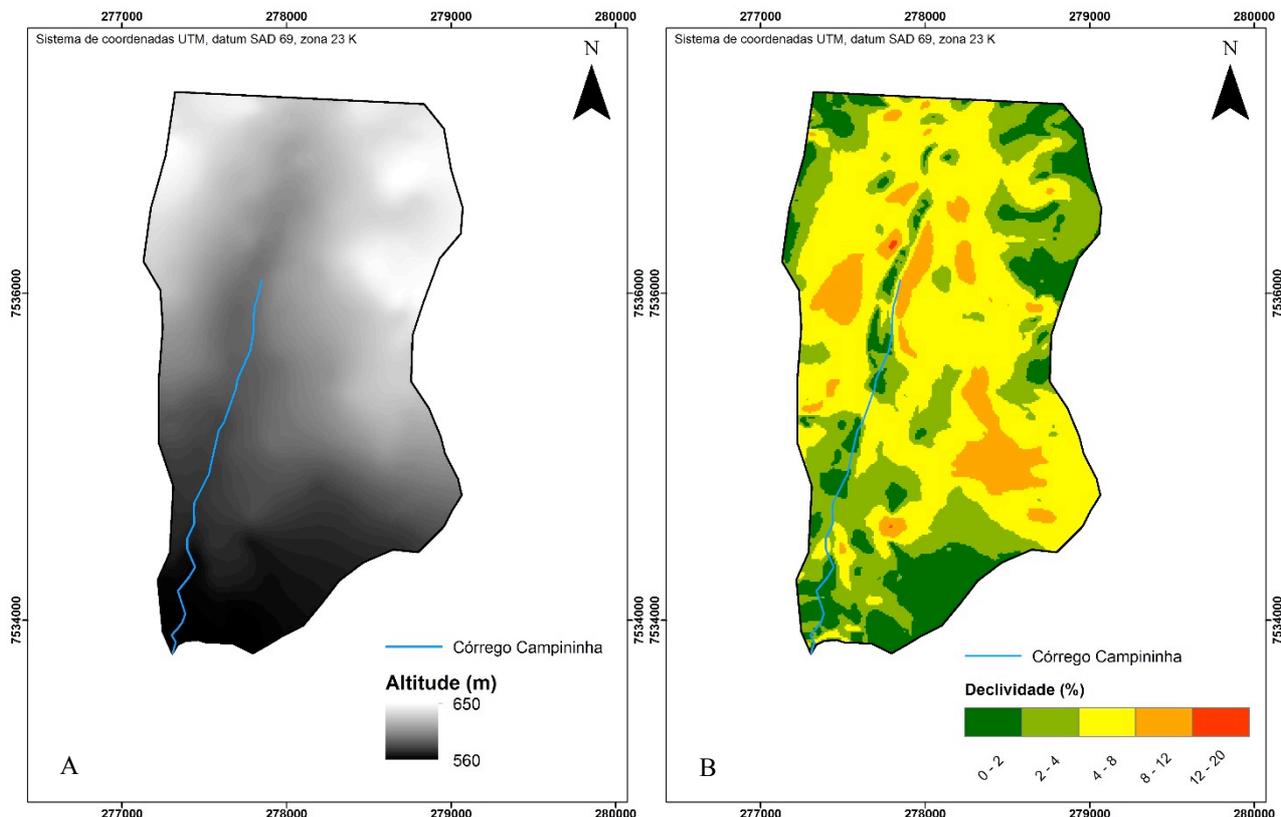


Figura 1 – A: MDE com resolução 10 m; B: Mapa de declividade da sub-bacia de estudo.

Em relação aos modelos testados para direção de fluxo, optou-se pelo algoritmo D_{∞} (Figura 2-A) que em comparação direta com a rede de drenagem obtida em campo apresentou os melhores resultados. O método D_{∞} é reconhecido por ter a vantagem de considerar a forma da superfície divergente, ou seja, o fluxo também pode ser divergente (BOGAART & TROCH, 2006). Consequentemente, este método proporciona o maior detalhamento e uma melhor definição dos caminhos preferenciais do fluxo que formam a rede de drenagem da sub-bacia, sendo mais preciso e, portanto, adequado as análises hidrológicas em pequenas escalas como nesta pesquisa.

O modelo gerado neste estudo também revelou com detalhes o sistema de drenagem de águas pluviais presentes na sub-bacia e os caminhos preferenciais do fluxo durante um evento pluviométrico. Além do próprio curso d'água presente na área, podemos perceber a presença de dois drenos principais na parte nordeste da sub-bacia e também, a concentração de fluxo nas áreas ao sul, áreas estas de relevo plano e ocupadas por florestas nativas, evidenciando o caráter protetor do solo que neste caso se torna ainda mais importante devido ao alto fluxo superficial nestes locais.

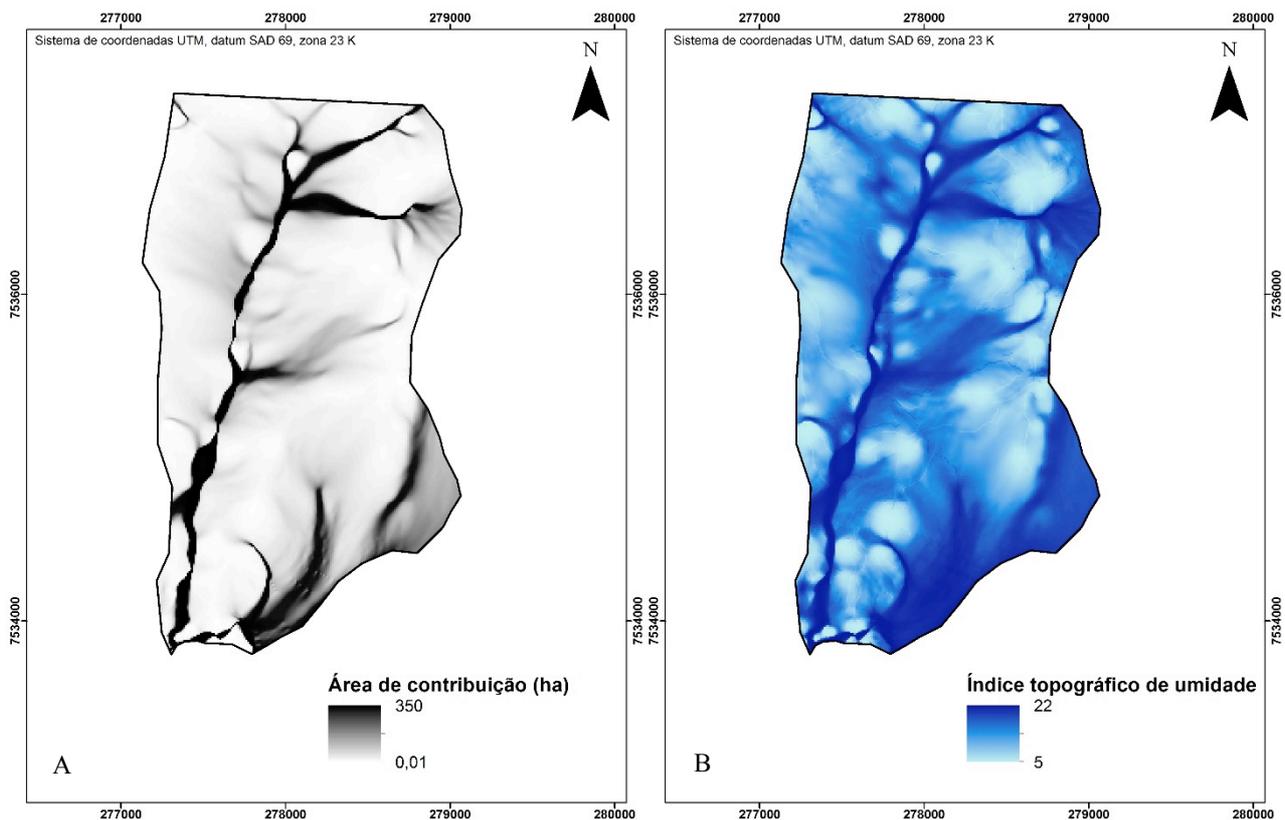


Figura 2 – A: Mapa da área de contribuição; B: Mapa do Índice Topográfico de Umidade.

O TWI encontrado (Figura 2-B) apresentou como distribuição espacial uma boa interação entre a declividade e a área de contribuição. As áreas com maior umidade se concentram não somente ao longo das linhas de drenagem, mas, preferencialmente nas conexões de áreas planas com regiões de concentrações de fluxo. Estas áreas favorecem o espalhamento da água na superfície do relevo e conseqüentemente aumentam o tempo de escoamento, possibilitando assim uma maior infiltração da água no perfil do solo.

O índice mais elevado na rede de drenagem principal, com destaque para a área ao sul da bacia onde as linhas de drenagem se encontram com o Rio Mogi Guaçu, denota a importância de se preservar estas áreas por atuarem como elementos de conectividade hidrológica entre a paisagem e os corpos hídricos, corroborando as observações de Sielfert e Santos (2010).

As áreas a noroeste da sub-bacia, de maior elevação e maior declividade, e fora das imediações da rede de drenagem, representaram as áreas de menor TWI, fato este explicável pela menor presença de linhas de fluxo associadas a uma maior velocidade de escoamento, não gerando condições propícias a infiltração. O relevo mais ondulado das áreas de cabeceira, que são fundamentais para a recarga de água subterrânea, favorece o escoamento superficial afetando negativamente a umidade e, conseqüentemente, ocasionando uma redução da infiltração de água nestes locais (Figura 2-B). Assim, é importante a conservação da vegetação e adoção de práticas

conservacionistas do solo nestas áreas de relevo mais movimentado, a fim de aumentar a infiltração, reduzir o potencial erosivo e aumentar a recarga hídrica na sub-bacia.

4 CONCLUSÕES

O TWI detalhou a sub-bacia em regiões distintas quanto ao potencial de infiltração e, conseqüentemente, quanto ao favorecimento do processo de recarga de água subterrânea. Nas áreas distantes da rede de drenagem, onde o relevo é mais ondulado, a umidade é reduzida em vista do favorecimento do escoamento superficial, refletindo diretamente na diminuição da infiltração de água. As áreas com elevado índice de umidade se concentram preferencialmente nas conexões de áreas planas com regiões de concentrações de fluxo, o que torna fundamental a conservação da vegetação nestas áreas, a fim de aumentar a infiltração, reduzir a suscetibilidade à erosão e aumentar o favorecimento ao processo recarga hídrica na sub-bacia.

5 AGRADECIMENTOS

À CAPES e ao CNPq, pela concessão das bolsas de estudo aos autores deste trabalho; à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo financiamento do projeto (Nº 2013/22729-2); e ao Instituto Florestal (IF-SP) pelo apoio logístico para condução do estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BEVEN, K.J., KIRKBY, M.J., 1979. A physically-based variable contributing area model of basin hydrology. **Hydrology Science Bulletin**, v.24, n.1, p.43-69,
- BOGAART, P. W.; TROCH, P. A., 2006. Curvature distribution within hillslopes and catchments and its effect on the hydrological response. **Hydrology and Earth System Sciences**, Göttingen, v. 10, p. 925-936.
- CAMPOS, M.C.C.; Cardozo, N.P.; Marques Júnior, J., 2006. Modelos de paisagem e sua utilização em levantamentos de pedológicos. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v. 6, n. 1, p. 104-114.
- CAPOANE, V.; Tiecher, T.; Alvarez, J.W.R.R.; Pellegrini, A.; Schaefer, G.L.; Santos, L.J.C.; dos Santos, D.R., 2015. Influência da resolução do modelo digital de elevação na determinação do índice topográfico de umidade e na capacidade de predição dos teores carbono orgânico do solo. **Revista Geo**, n.27, p.144-155.
- Environmental Systems Research Institute – ESRI, 2014. **ArcGIS Professional GIS for the desktop, version 10.2**. Redlands. CD ROM.

- FAIRFIELD, J.; LEYMARIE, P., 1991. Drainage networks from grid digital elevation models. **Water Resources Research**, v.27, p.709-717.
- FREEMAN, G.T., 1991. Calculating catchment area with divergent flow based on a regular grid. **Computers and Geosciences**, v.17, p.413-22.
- HANCOCK, G. R.; Murphy, D.; Evans, K. G., 2010. Hillslope and catchment scale soil organic carbon concentration: An assessment of the role of geomorphology and soil erosion in an undisturbed environment. **Geoderma**, v.155, n.36–45.
- HEWLETT, J.D.; HIBBERT, A.R. Factors affecting the response of small watersheds to precipitation in the humid areas. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON FOREST HYDROLOGY, 1., 1965, New York. **Proceedings...** New York: Pergamon, 1967. P. 275-290.
- MINELLA, J.P.G.; MERTEN, G.H., 2009. Índices topográficos aplicados à modelagem agrícola e ambiental. **Revista Ciência Rural**, v.42, n.9.
- SABZEVARI, T. et al. A steady-state saturation model to determine the subsurface travel time (STT) in complex hillslopes. **Hydrology and Earth System Sciences**, Gottingen, v.14, n.6, p.891-900. 2010.
- SIEFERT, C. A. C.; SANTOS, I. dos., 2010. Áreas hidrologicamente sensíveis: teoria e aplicação para a bacia do rio Barigui, PR, Brasil. **Revista Ambiente & Água**, Taubaté, v. 5, n. 2, p. 61-76.
- SIRTOLI, A.E.; da Silveira, C.T.; da Silva, C.R.; Montovani, L.E.; Ribeiro, S.R.A.; Oka-Fiori, C., 2008. Atributos topográficos secundários no mapeamento de pedoformas. **Revista Geociências**, v.27, n.1, p.63-77.
- TARBOTON, D.G., 1997. 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.
- TUCCI, C. E. M. (org.). **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. Segunda Edição. ABRH. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: Editora da Universidade. 2009. 944p.