

AVALIAÇÃO DA PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS EM UMA BACIA DE PEQUENO PORTE POR MEIO DO SIMULADOR SWAT

Paulo Ponce Arroio Junior^{1}; Julio Issao Kuwajima¹; Frederico Fábio Mauad²*

Resumo – Os processos de erosão e produção de sedimentos constituem fenômenos de grande relevância na atualidade, ocorrendo em grande escala e ocasionando prejuízos ambientais, econômicos e sociais. Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo realizar a modelagem da produção de sedimentos na bacia hidrográfica do Rio Itaqueri, localizada nos municípios de Itirapina e Brotas – SP, a qual possui uma extensão de 220 km². Foi utilizado o modelo SWAT para simular as condições hidrológicas e de produção e transporte de sedimentos, fornecendo-se ao modelo dados referentes aos solos, ao uso da terra, dados climáticos e dados topográficos. Por meio da simulação verificou-se que ocorrem na bacia áreas com diferentes comportamentos hidrossedimentológicos, com locais onde a produção anual média de sedimentos chega a 18 t/ha e outras áreas onde esta é próxima de zero. Foi constatado que o Rio Itaqueri contribuiu com 65% do total anual médio de sedimentos que chega ao reservatório. A modelagem permitiu com sucesso obter cenários de perda de solo espacializados, constituindo-se como uma importante ferramenta para o planejamento conservacionista da bacia.

Palavras-Chave – SWAT, sedimentologia, modelagem

SEDIMENT YIELD EVALUATION IN A SMALL CATCHMENT USING SWAT SIMULATOR

Abstract – Nowadays sediment yield and erosion processes are considered to be of great importance, occurring in large scale and causing environmental, economic and social damages. The present study's objective is to perform a sediment yield modeling at the river Itaqueri watershed, located between the municipalities of Itirapina and Brotas on the state of São Paulo (SP), which has a length of 220 km². Provided of soil, land use, climatic and topographic data, the SWAT model simulated hydrology and sediment yield. The simulations indicated different hydrosedimentological within the watershed; presenting locations with an average annual sediment yield varying from almost null to 18 t/ha. The river Itaqueri contributes with 65% of the reservoir's total average annual incoming sediment. Specialized soil loss scenarios where successfully obtained, which are important tools for the watershed conservation management.

Keywords – SWAT, sedimentology, modeling.

¹ Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Ciências da Engenharia Ambiental - Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP). Av. Trabalhador São Carlense, 400, São Carlos, SP. e-mail: pauloarroio@sc.usp.br; julio.kuwajima@usp.br

² Professor Doutor do Programa de Pós-Graduação em Ciências da Engenharia Ambiental - Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP). Av. Trabalhador São Carlense, 400, São Carlos, SP. e-mail: mauadffm@sc.usp.br

INTRODUÇÃO

As modificações do espaço ocasionadas pelo crescimento urbano e expansão das fronteiras agropastoris ocorridas no último século acabaram por submeter o ambiente natural a diversas pressões antrópicas, resultando em processos de degradação dos solos e alterações na quantidade e qualidade dos recursos hídricos.

As ações relacionadas à gestão dos recursos hídricos têm como objetivo principal garantir as demandas hídricas necessárias para atender às necessidades da sociedade, devendo ser conduzidas de forma integrada no âmbito das bacias hidrográficas. Desse modo, é de fundamental importância que o manejo integrado dos recursos hídricos envolva o gerenciamento das águas articulado às ações de planejamento e ordenamento do uso do solo, permitindo a integração de aspectos técnicos, econômicos e ambientais.

Nesse sentido, a utilização de modelos matemáticos de predição de erosão e de produção de sedimentos constituem ferramentas importantes no planejamento ambiental, permitindo-se quantificar impactos, gerar previsões de cenários atuais e futuros e auxiliar nos processos de tomada de decisão. Um destes modelos largamente utilizados no Brasil é o Soil and Water Assessment Tool (SWAT), desenvolvido pelo Agricultural Research Service e pela Texas A&M University.

O SWAT permite a análise dos impactos das alterações no uso do solo sobre o escoamento superficial e subterrâneo, sobre a produção de sedimentos e qualidade da água, permitindo a simulação de diferentes processos físicos em uma bacia hidrográfica (Srinivasan e Arnold, 1994). Este modelo permite simular espacialmente uma bacia hidrográfica como um mosaico complexo, considerando diversos tipos de cobertura da terra e tipos de solo, podendo ser aplicado mesmo em bacias não instrumentadas.

De acordo com Minotti (2006), para execução da simulação são necessárias informações específicas sobre o clima, as propriedades do solo, a topografia, a vegetação e as práticas de manejo do solo que ocorrem na bacia hidrográfica. Os processos físicos associados ao movimento da água, movimento dos sedimentos, crescimento das culturas, ciclagem de nutrientes, entre outros, são diretamente modelados pelo simulador utilizando esses dados de entrada.

No Brasil, diversos centros de pesquisa têm utilizado o SWAT para as mais diversas aplicações, sendo em sua maioria voltadas à simulação de vazões líquidas e de produção de sedimentos (Garbossa *et al.* 2011). Podem ser encontrados na literatura trabalhos aplicados em todas as regiões do país, envolvendo desde bacias de pequena extensão (Minotti, 2006; Baltokoski *et al.*, 2010) até bacias com 29.000 km² (Baldissera, 2005).

Neste trabalho o simulador SWAT foi utilizado para avaliar a produção de sedimentos na bacia hidrográfica do Rio Itaqueri, localizada nos municípios de Itirapina e Brotas – SP, onde se insere o Reservatório do Lobo ou Broa. Desse modo, espera-se que este trabalho possa contribuir com um cenário da produção de sedimentos na bacia e consequente assoreamento do reservatório, bem como possa gerar informações visando subsidiar o planejamento e gestão ambiental da bacia.

MATERIAIS E MÉTODOS

Localização da área de estudo

A bacia hidrográfica do Rio Itaqueri localiza-se na porção central do Estado de São Paulo, e está inserida na Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos 13 - Tietê/Jacaré, mais precisamente no trecho correspondente ao alto curso do Rio Jacaré-Guaçu. Seu território abrange parte dos municípios de Itirapina e Brotas, compreendendo uma área de aproximadamente 220 km²

de extensão. Os principais afluentes da bacia possuem padrão dendrítico, destacando-se o Rio Itaqueri, o Ribeirão do Lobo e os Córregos do Geraldo e das Perdizes, todos tendo seu deságue no reservatório do Lobo (Figura 1).

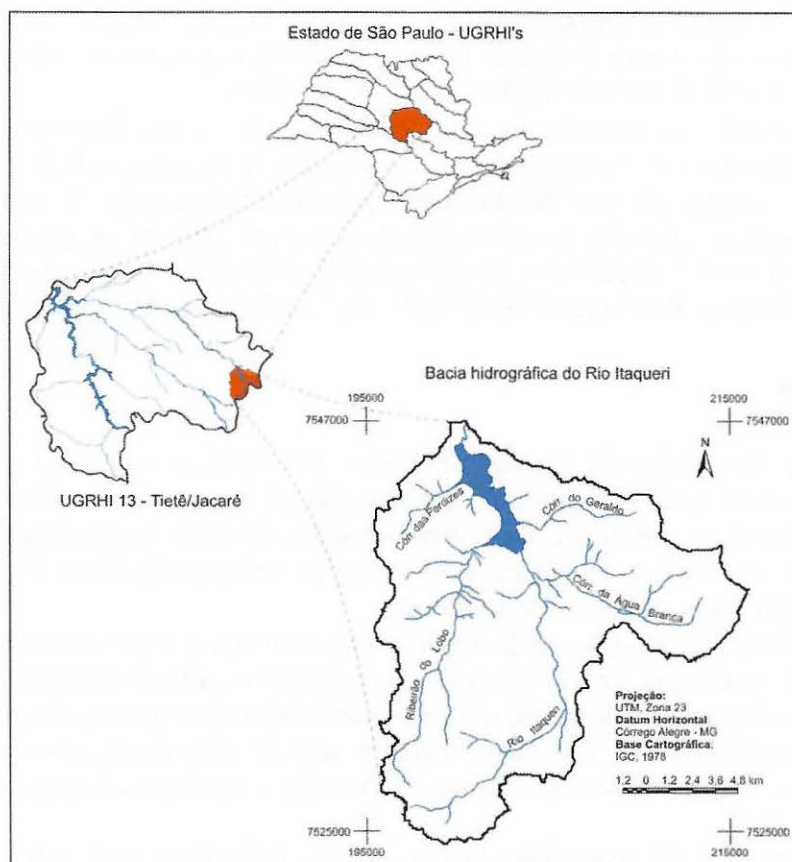


Figura 1 – Localização da bacia hidrográfica do Rio Itaqueri

O Reservatório Carlos Botelho, também conhecido como Reservatório do Lobo ou do Broa, com seus 6,8 km² de espelho d'água, teve como principal objetivo em sua concepção a produção de energia elétrica em pequena escala. Este foi construído em 1936 pela Central Elétrica de Rio Claro S. A. (SACERC), que hoje faz parte da Elektro/Centrals Elétricas de São Paulo (CESP). Com o passar dos anos, outros complexos hidrelétricos foram construídos suprimindo as necessidades energéticas das diversas regiões do país. Assim, pequenos reservatórios, como a Represa do Lobo, deixaram de ter a função principal de gerar energia, passando a ser usados em atividades voltadas ao lazer (Tundisi, 1988; Argenton, 2004).

Preparação da base cartográfica e delimitação das sub-bacias

A etapa inicial de simulação no SWAT consiste na delimitação da bacia de drenagem e na sua divisão em sub-bacias, as quais são tratadas como unidades independentes no processo de modelagem. Para tal, nesta primeira etapa o simulador requer como dado de entrada o Modelo Digital de Elevação (Digital Elevation Model - DEM) envolvendo a área da bacia.

Para geração do DEM, foi utilizado como base de referência o mapeamento planialtimétrico realizado pelo Instituto Geográfico e Cartográfico do Estado de São Paulo – IGC (1978), cuja escala

é de 1:10.000, sistema de projeção UTM. Após a digitalização das cartas topográficas por meio de scanner, estas foram georreferenciadas e vetorizadas manualmente através do software ArcGIS 9.3. Os elementos vetorizados foram as curvas de nível, cuja equidistância nas cartas é de 5 metros, os pontos cotados relativos a topos e depressões e a hidrografia.

Através das ferramentas disponíveis na extensão *3D Analyst Tools* do ArcGIS, obteve-se por meio de triangulação uma Grade Irregular Triangular (TIN), a qual foi convertida para o formato *raster*, gerando-se um DEM com resolução espacial de 10 metros.

Para as operações de modelagem utilizou-se o SWAT versão 2009.93.7b, o qual permite integração com o ArcGIS 9.3. Através desta interface foram importados o DEM, em formato *raster*, e a representação vetorial da rede de drenagem gerada anteriormente. A partir do modelo de elevação, foi realizada a determinação da direção do fluxo para cada pixel, permitindo-se delimitar a área que contribui com o escoamento superficial para cada ponto da rede hidrográfica. Ao final deste processo, a Bacia do Rio Itaqueri foi dividida em 32 sub-bacias de contribuição.

Dados pedológicos

Em relação aos dados de entrada referentes aos solos, o simulador exige tanto dados espaciais, representando a distribuição dos tipos de solo na bacia, quanto dados tabulares. Para a caracterização espacial da pedologia, foi utilizada a carta de solos da Quadricula de São Carlos, folha SF 23-Y-A-I, referente ao levantamento pedológico semi-detalhado do Estado de São Paulo, publicado pela EMBRAPA, na escala de 1:100.000.

Os dados tabulares exigidos pelo modelo são relativos a cada uma das classes de solo existentes no mapa, sendo que tais valores podem ser obtidos a partir da literatura ou estimados. Os parâmetros número de camadas do perfil, profundidade máxima da raiz no solo, porosidade do solo, profundidade de cada horizonte, densidade aparente, teor de carbono orgânico e porcentagens de argila, silte e areia foram extraídos do memorial descritivo referente ao mapa de solos utilizado (Oliveira e Prado, 1984).

Para identificação do grupo hidrológico do solo utilizou-se a classificação proposta por Lombardi Neto *et al.* (1989) para o estado de São Paulo. Os parâmetros capacidade de água disponível e condutividade hidráulica saturada foram estimados a partir de sua relação com as características texturais e o teor carbono orgânico, segundo metodologia apresentada por Saxton e Rawls (2006). O fator K da USLE foi calculado através da metodologia proposta por Williams (1995), e, por fim, o parâmetro albedo foi obtido através dos trabalhos de Freire *et al.* (1978).

Dados de uso da terra

De modo semelhante às informações referentes aos solos, os dados referentes aos tipos de cobertura do solo necessários para alimentação do modelo constituem dados espaciais (mapa de uso da terra) e tabulares.

Para obtenção do mapa de uso da terra, recorreu-se ao processo de classificação de imagens multiespectrais, no qual utilizou-se uma cena obtida a partir do satélite CBERS-2B, cuja resolução espacial é de 20 metros. A imagem utilizada foi disponibilizada pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, sendo adquirida na data de 2 de fevereiro de 2010, órbita 155/ ponto 125. A classificação supervisionada foi realizada no software Spring 5.1, pelo método supervisionado de máxima verossimilhança.

Em relação aos dados tabulares de uso da terra, optou-se por utilizar os parâmetros definidos como *default* no bando de dados do SWAT, visto que tais atributos são de caracterização complexa e de grande dificuldade de obtenção na literatura.

Dados climáticos

Para o processo de simulação, o SWAT requer que sejam informados tanto dados diários como dados mensais. Os dados climáticos diários utilizados foram cedidos pela estação meteorológica situada no Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada (CRHEA), localizada no interior da bacia, nas proximidades de seu exutório (201.156m E, 7.545.471m N, 732m de altitude). As séries diárias requeridas pelo simulador incluem dados de precipitação, temperatura máxima e mínima, radiação solar, umidade relativa e de velocidade do vento. Foi utilizada uma série de dados relativa ao período entre 01/01/1992 e 31/12/2011, representando um total de 20 anos contínuos.

Em relação aos parâmetros mensais requeridos, estes foram obtidos através de uma planilha de cálculo automatizada disponibilizada no site do SWAT, a qual obtém tais parâmetros através das séries históricas diárias.

Definição de Unidades de Resposta Hidrológica e simulação

Após a delimitação das sub-bacias e inserção dos dados pedológicos, climáticos e de cobertura da terra no banco de dados do SWAT, é realizada a definição das Unidades de Resposta Hidrológica (HRU). As HRUs representam uma combinação única de um tipo de solo, um tipo de cobertura da terra e uma classe de declividade, sendo geradas através de uma operação de superposição de planos de informação.

O simulador permite que o usuário escolha diferentes combinações para se trabalhar com as HRUs nas sub-bacias. É possível trabalhar apenas com a HRU dominante, onde, em cada sub-bacia, o uso da terra, o tipo de solo e a classe de declividade que apresentarem maior extensão, ou seja, forem predominantes, serão considerados para toda a área da sub-bacia; bem como pode-se trabalhar com múltiplas HRU, onde serão criadas várias combinações destes atributos para cada sub-bacia. Neste trabalho, utilizou-se a opção de múltiplas HRU por sub-bacia, com o intuito de manter um maior detalhamento e evitar a perda ou alteração das informações de entrada.

O período definido para a simulação foi de 1/1/1992 até 31/12/2011, representando um total de 20 anos contínuos. Desses 20 anos, três foram utilizados para aquecimento do modelo, em procedimento conhecido como *warm up*, visto que, no início da simulação, ocorrem grandes incertezas devido ao desconhecimento das condições iniciais, principalmente em parâmetros como a umidade do solo (DURÃES, 2010).

Por se tratar de uma bacia não instrumentada do ponto de vista sedimentológico, onde os poucos postos fluviométricos encontram-se desativados e postos hidrossedimentométricos são inexistentes, não foi possível realizar o processo de calibração e validação dos resultados obtidos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 2 são apresentados os resultados da produção média anual de sedimentos por sub-bacia para o período de 1995 a 2011, os quais foram especializados de modo a permitir uma melhor avaliação de sua distribuição espacial.

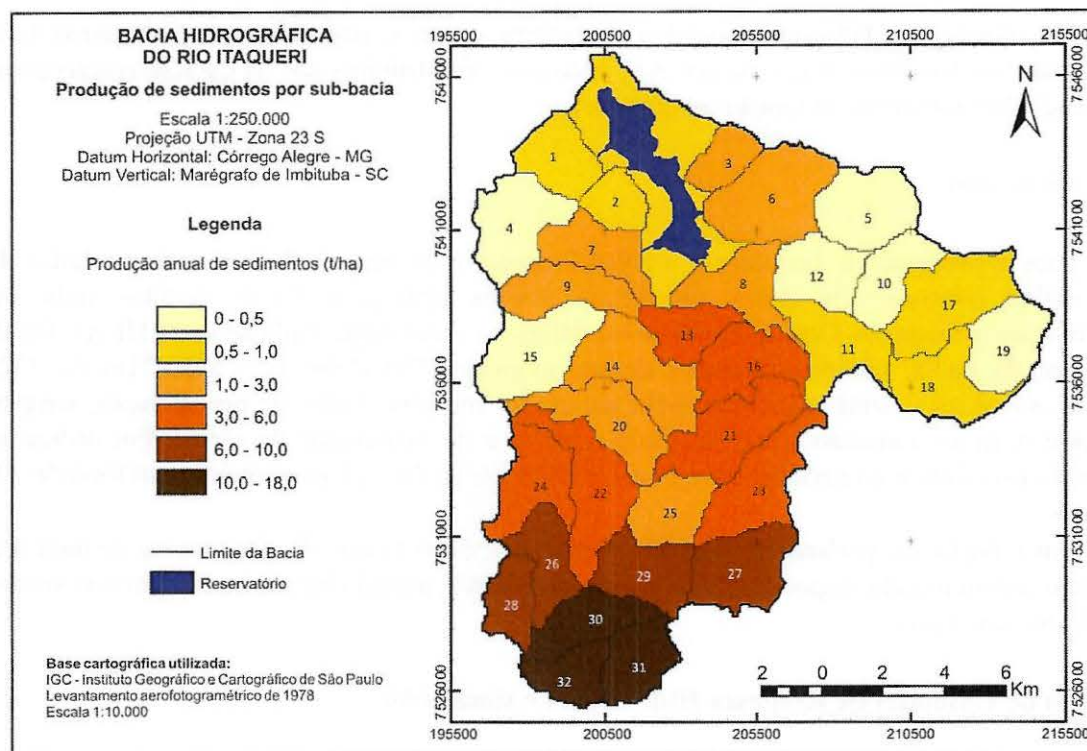


Figura 2 – Mapa da produção de sedimentos média para cada sub-bacia no período de 1995 a 2011

Verifica-se que a produção de sedimentos na bacia do Rio Itaqueri apresentou desde valores próximos a zero em algumas áreas até valores próximos a 18 t/ha, valor observado na sub-bacia de número 31. De modo geral, a distribuição da produção de sedimentos mostrou-se bastante dispersa na bacia, sendo que poucas áreas são responsáveis pelas maiores taxas de produção. Em relação ao valor médio de produção de sedimentos para toda a bacia, este foi de 3,5 t/ha.

As áreas de maior produção de sedimentos ocorreram ao sul da bacia, nas proximidades das nascentes do Ribeirão do Lobo e do Rio Itaqueri, onde também foi observado um elevado potencial de geração de escoamento superficial. Como a simulação é realizada em função das relações hídricas de precipitação e escoamento, é esperado que os maiores valores ocorram em áreas onde o escoamento é elevado, visto que nessas condições os materiais desagregados serão mais facilmente transportados até o canal.

Nestas áreas, além de serem encontradas declividades acentuadas, observam-se apenas alguns fragmentos de vegetação densa protegendo os maiores declives, estando o restante do território ocupado por pastagens e plantios de cana-de-açúcar. Tais características, aliadas aos solos de erodibilidade moderada e forte que ocorrem nestas áreas (Argissolos Vermelho-Amarelos e Neossolos Quartzarênicos), acabam por gerar uma maior perda de solo, e, consequentemente, maior produção de sedimentos.

A partir dos resultados obtidos para a produção de sedimentos nas sub-bacias estimou-se também a quantidade total de sedimento produzida na bacia do Rio Itaqueri, bem como as quantidades produzidas pelas bacias de cada um dos afluentes do Reservatório do Lobo. Na Tabela 1 são apresentados os resultados desta estimativa.

Verifica-se que a quantidade anual total de sedimento produzida na bacia foi de 77.905 toneladas. Deste total, 50.866 toneladas chegam ao reservatório através do Rio Itaqueri, o que corresponde a 65,2% da produção total de sedimentos da bacia. Pelo Ribeirão do Lobo, entram no

reservatório 19.551 toneladas, o que corresponde a 25% da produção total. Os Córregos das Perdizes e do Geraldo apresentaram produções menos expressivas, contabilizando 600 e 1.861 toneladas de sedimento por ano, o que corresponde a 0,7% e 2,3% do total, respectivamente.

Tabela 1 – Quantidade total anual média de sedimentos produzida nas bacias dos principais contribuintes do Reservatório do Broa

Afluente	Sedimento produzido (t)	Área drenada (ha)
Rio Itaqueri	50.866	10.562
Ribeirão do Lobo	19.551	5.930
Córrego das Perdizes	600	1.274
Córrego do Geraldo	1.861	1.690
Outros	5.025	2.620
TOTAL	77.905	22.076

Sob a categoria ‘outros’ foram contabilizadas as produções de afluentes de menor importância e a produção referente à sub-bacia em que se encontra o reservatório, incluindo neste montante os sedimentos que chegam diretamente à represa por escoamento superficial e subsuperficial, não sendo carregados por nenhum curso d’água. Nesta categoria, a produção de sedimentos foi de 5.025 toneladas, o que corresponde a 6,4% da produção total da bacia.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O SWAT mostrou-se como um modelo bastante completo para avaliação da produção de sedimentos, englobando diversos processos físicos que ocorrem nas bacias hidrográficas. Verificou-se que poucas áreas foram responsáveis pelos maiores valores de sedimentos produzidos, a exemplo das sub-bacias localizadas na parte alta da bacia, onde foram obtidos médios anuais de até 18 t/ha, o que evidencia a maior criticidade destas áreas.

De modo geral, a produção anual média de sedimentos observada na bacia pode ser considerada baixa quando comparada com outros trabalhos que utilizaram o simulador. Ainda verificou-se que o principal contribuinte para o aporte de sedimentos ao Reservatório do Lobo é o Rio Itaqueri, responsável por 65% do total.

Através dos resultados obtidos foi possível identificar na bacia áreas com diferentes comportamentos hidrossedimentológicos, permitindo-se sinalizar os locais que mais contribuem com a produção de sedimentos. A obtenção deste cenário é de extrema importância no planejamento conservacionista da bacia, visto que permite conciliar a capacidade de uso do solo conforme as fragilidades detectadas. O manejo adequado destas áreas permitirá menor dinâmica erosiva dos solos, evitando o carreamento de sedimentos para os corpos d’água e, consequentemente, diminuindo seu aporte no Reservatório do Lobo.

REFERÊNCIAS

ARGENTON, E. C (2004). *Limnologia, balneabilidade e impactos ambientais: uma análise temporal e espacial na represa do Lobo (Broa), Itirapina/Brotas – SP*. 146p. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental.) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

- BALDISSERA, G. C (2005). *Aplicabilidade do modelo de simulação hidrológica SWAT para a bacia hidrográfica do Rio Cuiabá/MT*. 144 p. Dissertação (Mestrado em Física e Meio Ambiente) – Instituto de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá.
- BALTOKOSKI, V. *et al* (2010). Calibração de modelo para a simulação de vazão e de fósforo total nas sub-bacias dos Rios Conrado e Pinheiro - Pato Branco (PR). *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, Viçosa, v. 34, n. 1.
- DURÃES, M. F (2010). *Caracterização e avaliação do estresse hidrológico da bacia do rio Paraopeba, por meio de simulação chuva-vazão de cenários atuais e prospectivos de ocupação e uso do solo utilizando um modelo hidrológico distribuído*. 147 p. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- EMBRAPA; INSTITUTO AGRONÔMICO DE CAMPINAS (1981). *Levantamento pedológico semi-detalhado do Estado de São Paulo*. Campinas: IAC. Quadricula de São Carlos, Folha SF 23-Y-A-I. Escala 1:100.000.
- FREIRE, R. *et al.* (1978). *Solos da Bacia do Broa*. São Carlos: Univ. Fed. São Carlos. 125 p.
- GARBOSSA, L. H. P. *et al.* (2011). The use and results of the Soil and Water Assessment Tool in Brazil: A review from 1999 until 2010. In: *2011 International SWAT Conference & Workshops*, Toledo, 2011.
- LOMBARDI NETO, F. *et al.* (1989). Nova abordagem para cálculo de espaçamento entre terraços. In: *Simpósio Sobre Terraceamento Agrícola*, Campinas, 1989. p. 99-124.
- MINOTTI, R. T (2006). *Abordagens Qualitativa e Quantitativa de Microbacias Hidrográficas e Áreas Alagáveis de um Compartimento do Médio Mogi-Superior-SP*. 247 p. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- OLIVEIRA, J. B.; PRADO, H (1984). *Levantamento pedológico semidetalhado do Estado de São Paulo*: Quadricula de São Carlos. Memorial descritivo. Campinas: IAC, 110 p.
- SAXTON, K. E.; RAWLS, W. J (2006). Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. *Soil Society of America Journal*, Madison, v. 70, p. 1569-1578.
- SRINIVASAN, R.; ARNOLD, J. G (1994). Integration of a basin-scale water quality model with GIS. *Water Research*, v. 30, p. 453-462.
- TUNDISI, J. G (1998). Impactos ecológicos da construção de represas: aspectos específicos e problemas de manejo. In: *Limnologia e manejo de represas*. Org. por Tundisi J. G, ACIESP, São Paulo – SP, p. 1 – 75.
- WILLIAMS, J. R (1995). The EPIC model. In: *Computer models of watershed hydrology*. Org. por Singh, V. P., Water Resources Publications, Littleton, p. 909-1000