



## Simulação de cenários prospectivos de escoamento superficial associados ao uso e cobertura da terra na sub-bacia do rio Capivara, Botucatu-SP por meio de Modelagem Espacial Dinâmica

Rodrigo José Pisani<sup>1</sup>  
Gabriel Mikael Rodrigues Alves<sup>2</sup>  
Júlio César Demarchi<sup>3</sup>  
Paulina Setti Riedel<sup>4</sup>

<sup>1,2</sup>Universidade Federal de Alfenas – Unifal-MG  
Caixa Postal 221 - 37130-000 - Alfenas - MG, Brasil  
{pisanigeo@gmail.com; gabrielalvesmikael@gmail.com}

<sup>3</sup>Universidade Estadual Paulista- UNESP  
Caixa Postal 467 - 19060-900 – Presidente Prudente - SP, Brasil  
julio@ourinhos.unesp.br

<sup>4</sup>Universidade Estadual Paulista- UNESP  
Caixa Postal 178 - 13506-900 – Rio Claro - SP, Brasil  
psriedel@rc.unesp.br

### Abstract

The hydric erosion is considered as one of the most serious problems related to hydric resources conservation. Hence the need for prediction mechanisms made with the aid of modeling. There are several methodological approaches with the objective of modeling the erosive potential of a given region, among which there are those that analyze and evaluate several landscape variables based on an integrated approach. The objective of this paper was to elaborate a spatial dynamic modeling for monitoring and predicting silting-up processes based on the Modified Universal Soil Loss Equation (MUSLE) in the Capivara river watershed, city of Botucatu-SP, using a Cellular Automata approach, in the Dinamica EGO platform. The model was driven by orbital Landsat 5 TM imagery used for mapping the land use and land cover for 1987, 1997, and 2007, topographic maps issued, the software ENVI 4.7 and ArcGIS 10. Among the reached results, we shed light over land use and land cover and erosion maps produced for 1987, 1997 and 2007 with prospective scenarios for 2017. It was noticed an increasing in potential volumes of erosion overall the areas of drainage and cuesta related to a decreasing of bushes class in this regions. Considering the downstream regions, it was observed a decreasing of values related to erosion scenarios, overall by the replacement of grasslands by reforestation and citrus along the analyzed period (1987-2017). It shows clearly that land use and land cover changes influence directly in sediment yield in the watershed, and can be simulated with probabilistic scenarios.

**Palavras-chave:** Pesos de Evidência, MEUPS, Erosão hídrica

### 1. Introdução

Vários problemas são decorrentes dos processos erosivos, principalmente aqueles causados pela influência antrópica no meio físico. Pode-se citar como exemplo, o assoreamento de rios e reservatórios, com forte impacto nos recursos hídricos, além da grande perda de solos férteis por erosão laminar.

Para a agricultura, a erosão do solo constitui a grande causa da degradação acelerada dos solos. As enxurradas, provenientes das águas de chuva que não ficaram retidas sobre a superfície, ou não infiltraram, levam partículas de solo em suspensão e elementos nutritivos essenciais em dissolução (BERTONI e LOMBARDI NETO, 2005).

A erosão causada pelas águas pluviais (erosão hídrica) ocorre sobre grande parte da superfície terrestre, destacando-se como um dos maiores responsáveis pela modelagem do relevo. É especialmente atuante nas regiões tropicais, onde o índice pluviométrico é alto em períodos concentrados do ano (GUERRA, 1999). A erosão hídrica pode ser expressa como a



relação entre a erosividade da chuva (fator ativo), ou seja, o potencial da chuva de causar erosão, e a erodibilidade do solo (fator passivo) que, por sua vez, é a suscetibilidade do solo à erosão, tendo as águas pluviais um papel de agente ativo no processo (SILVA et al., 2003).

Ainda de acordo com o mesmo autor, a erosão hídrica pode ocorrer de diferentes maneiras. Dentre elas, podem-se destacar duas: I) a primeira é a erosão linear, que ocorre de maneira localizada, sendo possível sua visualização a partir do surgimento de ravinas e voçorocas; II) a segunda vem a ser a erosão laminar, que acontece a partir da retirada gradativa de camadas dos solos pelo escoamento superficial, diminuindo sobremaneira sua capacidade produtiva. É importante lembrar que todas podem ocorrer ao mesmo tempo e em intensidades variadas, sendo que a erosão hídrica mais comum é a laminar, que ocorre em grandes áreas com pouca vegetação, pastagens degradadas e áreas com presença de solos expostos. Ela é imperceptível na maioria das vezes, pois remove uma camada fina e relativamente uniforme do solo pelo escoamento superficial.

De acordo com Zhang (2009), a elaboração de cenários para mudanças da paisagem pode fornecer subsídios para um planejamento estratégico por parte de prefeituras e órgãos competentes, visando prevenir os possíveis fatores responsáveis, principalmente os relacionados a atividades de ordem antrópica. No mundo real, os processos ambientais são tipicamente tridimensionais, dependentes do tempo e complexos (STEYAERT, 1993). Comportamentos não lineares, componentes estocásticos e retroalimentações em múltiplas escalas de tempo e de espaço podem ser incluídos nessa escala de análise (BOHAM-CARTER, 1994). Na modelagem matemática, as propriedades ambientais são tratadas como variáveis do modelo, enquanto suas inter-relações são representadas por operações aritméticas ou lógicas (BRIASSOULIS, 2000).

Atualmente, a elaboração de mapas estáticos para fins diversos não mais atende à necessidade de gestores locais, sendo necessário que se forneçam simulações de diferentes cenários futuros (ALMEIDA et al., 2012). Neste contexto inserem-se os modelos espaciais dinâmicos, que são utilizados principalmente para a modelagem espaço-temporal de processos, especialmente os físicos e os de planejamento urbano-regional (SUAREZ E SOARES-FILHO, 2013). Esses modelos têm como característica principal a facilidade com que são utilizados na descrição da dimensão espacial, bem como o fato de tentarem abordar o sistema com um todo.

A modelagem espacial dinâmica é usada, entre outras finalidades, para o entendimento das alterações do uso e cobertura da terra, possibilitando, ainda, a realização de simulações de mudanças na paisagem como potencial ferramenta para antecipar prováveis tendências passíveis de ocorrerem em uma região (MAEDA et al., 2011; DIAS e WALDE, 2012).

Para o presente trabalho foi realizada uma análise multitemporal dos valores do uso e cobertura da terra associados aos cenários de escoamento superficial a partir da Equação Universal de Perda de Solos Modificada – MEUPS dos anos de 1988, 1997 e 2007, na sub-bacia do rio Capivara, município de Botucatu-SP e, com o auxílio do método de Pesos de Evidência na plataforma Dinâmica EGO, realizou-se uma simulação para 2017, buscando monitorar e compreender a razão das alterações no período analisado na área de estudo. Desta forma, este trabalho subsidia um melhor planejamento do uso da terra para áreas agrícolas, levando em consideração o ambiente da bacia hidrográfica como unidade de planejamento dos recursos hídricos.

## **2. Procedimentos metodológicos**

### **2.1 Localização**

O presente trabalho foi realizado na sub-bacia do Rio Capivara, localizada no município de Botucatu (SP), região centro-oeste paulista, distante 220 km da capital São Paulo e possui uma área total de 222,18 km<sup>2</sup>.

O Rio Capivara é um afluente da margem esquerda da bacia do Rio Tietê e sua sub-bacia foi selecionada por apresentar atributos naturais que merecem atenção, tais como seu relevo, constituído pela morfologia de Cuesta, pela fragilidade de seus solos, além da importância de seu recurso hídrico, com aptidão potencial de abastecimento de água para a região, e pelo fato de se inserir em uma importante área de recarga do aquífero Guarany. Além disso, na região predominam as erosões hídricas laminares, que não são facilmente identificáveis, em função dos diferentes níveis de escoamento superficial.

Em decorrência desse processo, cada vez mais significativas áreas de solos cultiváveis são perdidas, do que decorre também um aumento do aporte de sedimentos para as drenagens. No caso da área de estudo, o aporte acelerado de sedimentos pode comprometer a capacidade do reservatório de Barra Bonita-SP, responsável pela geração de energia para uma região relevante do estado. A Figura 1 apresenta a área de estudo compreendida no município de Botucatu-SP.

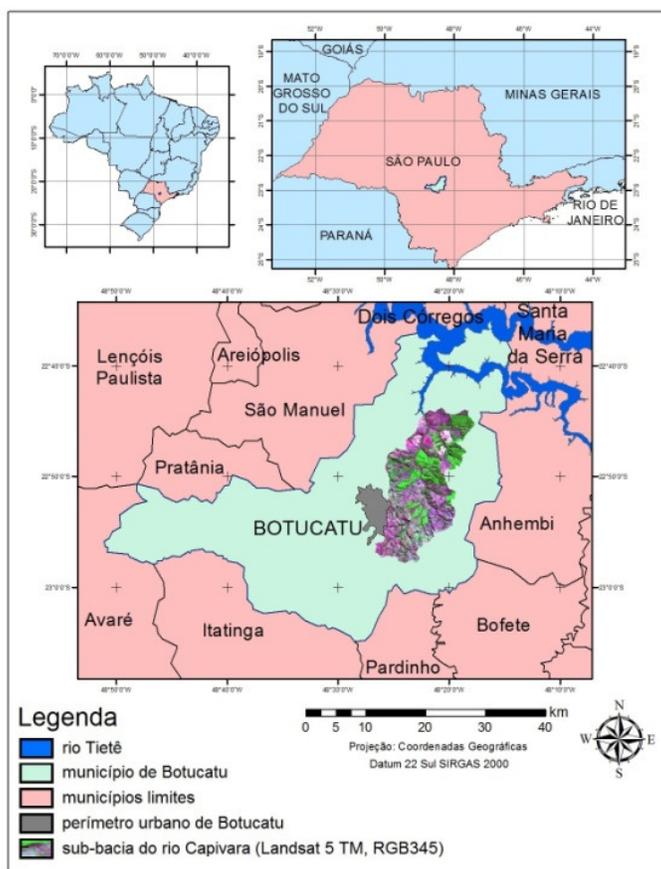


Figura 1. Localização da área de estudo

## 2.2 Determinação das variáveis do escoamento superficial (*Runoff*)

O escoamento superficial vem a ser uma relação hidrológica de volume e intensidade em uma dada superfície a partir de um fenômeno de chuva intensa, podendo ser um elemento determinante para a probabilidade de ocorrência de processos erosivos. De uma maneira geral são representadas pelo fator Q que indica o volume do escoamento superficial e o fator qp que indica a vazão de pico do escoamento superficial.

Segundo Williams (1975), sua obtenção é possível por meio da determinação dos fatores Q e qp a partir da seguinte equação:

$$Runoff = 89,6 * (Q * qp)^{0,56} \quad (1)$$

O fator Q vem a ser o volume de escoamento superficial, (*Q runoff*) obtido por meio do método proposto por USDA-SCS, (1973), como indicado em Williams (1975), Chaves (1991), por meio da Equação 2.

$$Q_{ij} = \frac{(Im - 0,25a)^2}{(Im + 0,085a)} \quad (2)$$

Em que:

$Q_{ij}$  : volume do escoamento superficial em uma célula com coordenadas (*i, j*), para um determinado evento chuvoso (mm);

Im: quantidade máxima do volume de precipitação em 1 hora (mm);

Sa: parâmetro de retenção da água pelas características de superfície do terreno.

O cálculo para obtenção dos valores de Sa (parâmetro de retenção da água pelas características de superfície do terreno) pode ser conferido a partir da Equação 3, assim como os índices de Curva Número (relação: tipo de solo e uso da terra na área de estudo). É importante ressaltar que os valores foram obtidos para cada pixel.

$$Sa = 254 \left( \frac{100}{CN} - 1 \right) \quad (3)$$

### 2.3 Entrada dos dados no DinamicaEGO

A modelagem da dinâmica do uso e cobertura da terra, que serviu como parâmetro para a prospecção dos mapas de escoamento superficial, foi realizada no período de simulação de 1997 para 2007 onde com os resultados da calibração e validação estatística descritos a seguir, foram prospectados cenários para 2017. A imagem de 1987 serve como base para uma análise multi-temporal que avaliou as mudanças no uso e cobertura e o escoamento superficial entre esse período e 2017 (30 anos). A síntese da modelagem e simulação no Dinamica EGO pode ser conferida na Figura 2.

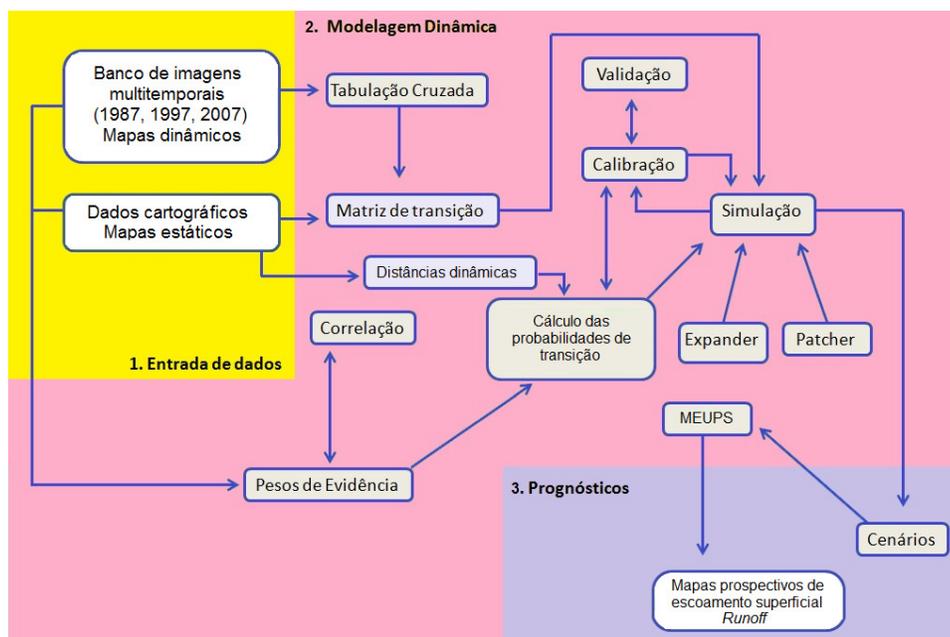


Figura 2. Síntese da modelagem com a plataformas do Dinamica EGO.

O Dinamica EGO, desenvolvido pelo Centro de Sensoriamento Remoto - CSR da Universidade Federal de Minas Gerais é um programa que utiliza um modelo com base no paradigma de autômatos celulares, implementado através de algoritmos empíricos de alocação do uso do solo, e a natureza de sua interface gráfica baseia-se na teoria de grafos direcionados (SOARES-FILHO et al., 2009).

Para o presente trabalho utilizou-se do método de Pesos de Evidência (Bonham-Carter, 1994), o qual se baseia no teorema de probabilidade condicional Bayesiana e foi utilizado originalmente na área de prospecção mineral para avaliar as condições de ocorrência de uma mineralização. No caso deste trabalho, foi calculada a probabilidade de mudança de uso e cobertura da terra a partir da influência de um conjunto de variáveis. Foram utilizadas as variáveis que mais ajudaram a explicar as mudanças dos cenários de aporte de sedimentos na área de estudo, sendo as seguintes: Contínuas - altimetria (MDE), declividade, distância euclidiana às drenagens, às principais rodovias e às estradas vicinais; Categórica - solos. A Figura 3 ilustra os mapas com as variáveis utilizadas para o trabalho:

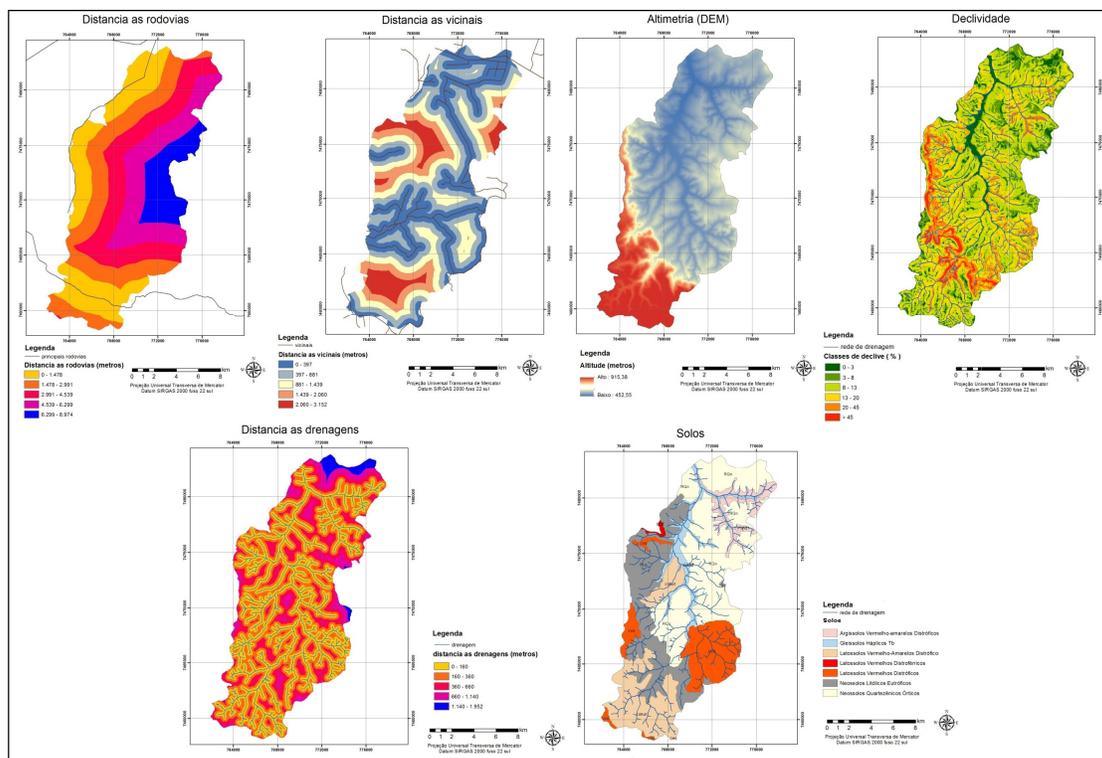


Figura 3. Variáveis utilizadas na modelagem do uso e cobertura da terra  
Fonte: Pisani (2014).

Em relação à validação do modelo, esta foi obtida por meio do índice de similaridade fuzzy onde são comparados os mapas finais simulados e reais. Para tal foram observadas as semelhanças e diferenças entre os mapas, onde, se estiverem muito diferentes, volta-se à fase de calibração e novas simulações, até que estes sejam os mais semelhantes possíveis.

## 2.4 Elaboração dos mapas de uso e cobertura da terra e declividade

Para os mapas de uso e cobertura da terra, foram utilizadas três imagens orbitais Landsat 5 TM dos anos de 1987, 1997 e 2007, obtidas a partir do cadastro de imagens gratuitas do INPE (disponíveis em [www.inpe.br](http://www.inpe.br)). É importante ressaltar que todas as imagens foram registradas com base nas Cartas do IGC (Instituto Geográfico Cartográfico de São Paulo)

utilizadas para a pesquisa. O Datum utilizado foi o SIRGAS 2000, fuso 22 sul. As imagens utilizadas foram as seguintes: Landsat 5 TM, órbita: 220, ponto: 076, resolução de 30 m, datas e fontes: 15 de julho de 1987, 08 de junho de 1997 e 20 de junho de 2007 .

### 3. Resultados e discussões

Foram realizadas as validações do modelo no período de simulação 1997 – 2007, por meio do método de similaridade fuzzy (Figura 4), para apoiar os cenários prospectivos (2007 – 2017). O valor de similaridade obtido a partir da calibração e simulação numa janela de  $5 \times 5$  pixels foi de aproximadamente 60 %, para os mapas de uso e cobertura da terra na área de estudo os quais compuseram os valores de Curva Número, explicados anteriormente, e que geraram, a partir da equação 1, os mapas de escoamento superficial (*runoff*).

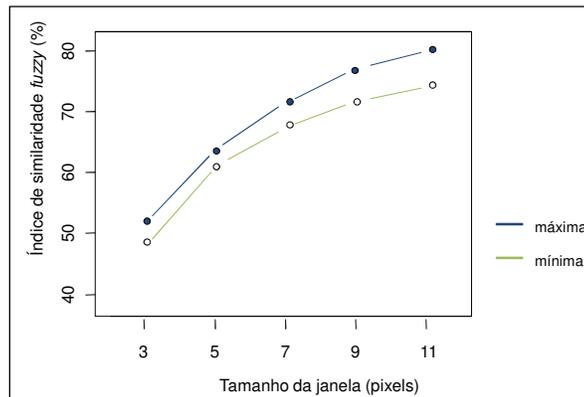


Figura 4. Validação do modelo obtida pelo índice de similaridade fuzzy.

Com a calibração do modelo, realizada com as variáveis contínuas e categóricas, foram gerados os cenários prospectivos de uso e cobertura da terra e de escoamento superficial da área estudada. A Figura 5 ilustra os mapas em questão.

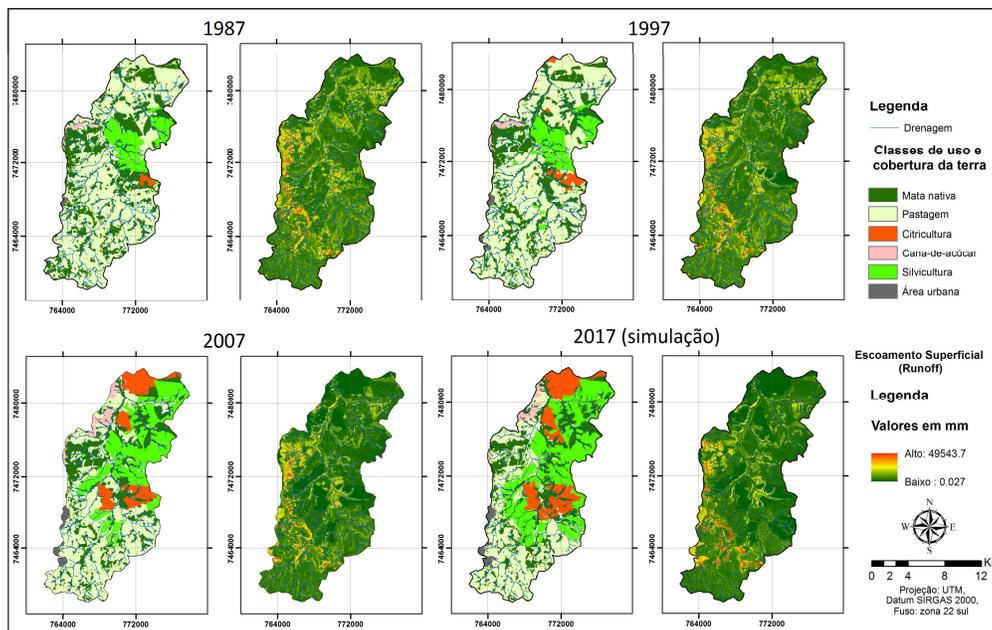


Figura 5. Mapas prospectivos de uso e cobertura da terra e escoamento superficial (*Runoff*) de 1987, 1997, 2007 e simulação para 2017.



Foi possível se estabelecer as seguintes considerações: em relação ao uso e cobertura foram notadas, sobretudo substituições de pastagem por silvicultura e citricultura e, com isso, uma diminuição das manchas associadas com altos valores de runoff (manchas vermelhas e amarelas que são substituídas por manchas em tons de verde), ou seja, as mudanças no uso e cobertura influem diretamente nos cenários de escoamento superficial principalmente nas regiões centrais e ao norte (jusante) da sub-bacia e, por consequência, na susceptibilidade dessas áreas a processos de erosão hídrica, dado um período de chuva intensa.

As áreas com manchas mais avermelhadas, que se concentram, sobretudo nas áreas de cuesta da sub-bacia com relevo mais acidentado, sugerem maiores cuidados no que se refere ao uso e manejo dessas áreas por indicar áreas mais suscetíveis a erosão hídrica laminar, em decorrência, entre outros fatores, pela diminuição de vegetação nativa nessas áreas que são compostas por relevos movimentados.

Notou-se também uma expressiva expansão urbana entre os períodos 1987 a 2007 e com mais probabilidade de expansão para 2017. Este cenário implica particularmente num aumento das manchas relacionados de médios a altos valores de escoamento superficial em direção as áreas de cuesta principalmente em função do aumento de superfícies impermeabilizadas típicas de áreas urbanizadas.

#### 4. Conclusões

A partir do método de Pesos de Evidência e Autômatos Celulares, implementado no Dinamica EGO, foi possível realizar a calibração e simulação do modelo de maneira criteriosa, considerando, entre outros fatores, a validação satisfatória do modelo com o índice de similaridade fuzzy, com as comparações dos mapas finais reais e simulados do uso e cobertura da terra e do escoamento superficial, mostrando-se dessa forma como metodologia viável, podendo ser utilizada em outras áreas, como importante subsídio à conservação dos recursos hídricos.

#### Agradecimentos

Ao CNPQ pela concessão da bolsa de estudos e ao programa de Pós Graduação em Geociências e Meio Ambiente, IGCE/UNESP Rio Claro

#### Referências bibliográficas

- ALMEIDA C. M, SOARES-FILHO B. S, RODRIGUES H. O. Evolutionary Computing & CA Models: A Genetic Algorithm Tool to Optimize the Bayesian Calibration of an Urban Land Use Change Model. In: Proceedings of the International Symposium on Cellular Automata Modeling for Urban and Spatial Systems - CAMUSS, **Proceedings...** Coimbra, Portugal: Universidade de Coimbra, v. 1, p. 243-255, 2012.
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 5.ed. São Paulo, Ícone, 2005. 355 p.
- BONHAM-CARTER, G. F. **Geographic information systems for geoscientists: modelling with GIS**. 1. ed. Netherlands, Pergamon. 1994. 398p.
- CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. **Introdução à Modelagem Dinâmica Espacial**. São José dos Campos, INPE, 2003. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/cursos/tutoriais/modelagem/>>. Acesso em: 12 maio 2014.
- CHAVES, H. M. L. Análise Global da sensibilidade dos parâmetros da Equação universal de perda de solo modificada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 15: 345-350, 1991.
- DESMET, P. J. J.; GOVERS, G. Algorithms to route flow over digital landscapes: a comparison and their implications for predicting ephemeral gullies. **Geomorphology**. 2: 41-50, 1996.



- ENVIRONMENTAL SYSTEM RESEARCH INSTITUTE - ESRI. ARC/INFO v.10 Redlands, 2010. Programa de computador. DVD-ROM.
- GUERRA, A. J. T. 1999. Início do Processo Erosivo. In: GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S.; LOMBARDI NETO, F. et al. Nova abordagem para cálculo de espaçamento entre terraços. In: SIMPÓSIO SOBRE TERRACEAMENTO AGRÍCOLA. 1999. **Anais...** Campinas: Fundação Cargill, 1999. p. 99-124.
- RSI - Research Systems Inc..THE ENVIRONMENT FOR VISUALIZING IMAGES ENVI.Boulder, CO, USA, 2009.
- SOARES-FILHO, B.; RODRIGUES, H.O.; COSTA, W.L. **Modelagem de dinâmica ambiental com Dinâmica EGO**. 1. ed.Belo Horizonte, CSR-UFGM, 2009. 115p.
- SOARES-FILHO, B.; RODRIGUES, H.; FOLLADOR, M.A hybrid analytical-heuristic method for calibrating land-use change models. **Environmental Modelling & Software**. v. 43, n.1, p.80-87, 2013.
- U.S.D.A. SOIL CONSERVATION SERVICE. **A Method for Estimating Volume and Rate of Runoff in Small Watersheds**. 1. ed. Washington, USDA, 1973. 20p.
- WILLIAMS, J. R. Sediment yield prediction with universal equation using runoff energy factor. In: Present and perspective technology for predicting sediment yields and sources. **US Dept of Agriculture Publ. ARS-540**, p. 244-252, 1975.