

# **SIMULAÇÃO DO ESCOAMENTO E DA PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS EM UMA PEQUENA BACIA HIDROGRÁFICA RURAL UTILIZANDO O MODELO LISEM (LIMBURG SOIL EROSION MODEL)**

Michele Moro - [michelemoro@gmail.com](mailto:michelemoro@gmail.com)

Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), P.O. Box 15029, 91501-970, Porto Alegre, RS, Brasil.

Jean Paolo Gomes Minella - [jminella@gmail.com](mailto:jminella@gmail.com)

Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), P.O. Box 15029, 91501-970, Porto Alegre, RS, Brasil.

Gustavo Henrique Merten - [merten@iph.ufrgs.br](mailto:merten@iph.ufrgs.br)

Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), P.O. Box 15029, 91501-970, Porto Alegre, RS, Brasil.

## **RESUMO**

Os modelos matemáticos de predição de erosão estão sendo cada vez mais utilizados em estudos ambientais, pois ajudam a entender os impactos hidrossedimentológicos devido ao uso e manejo do solo. Este trabalho tem o propósito de descrever o modelo LISEM (Limburg Soil Erosion Model), que é um modelo de base física desenvolvido para avaliar o efeito da utilização de práticas de manejo do solo sobre o processo de erosão e produção de sedimentos na escala de pequenas bacias rurais. O modelo é apresentado utilizando-se dados de uma pequena bacia rural localizada na encosta superior do nordeste do Rio Grande do Sul, cujo solo vem sendo utilizado de forma intensiva com a cultura do fumo. Resultados são apresentados na forma de gráficos com representações de hidrogramas e sedimentogramas, enquanto que a distribuição espacial dos processos de erosão são apresentados na forma de mapas.

**PALAVRAS-CHAVE:** MODELO DE EROSIÃO; LISEM; BACIA HIDROGRÁFICA

## **ABSTRACT**

Soil erosion prediction models are increasingly being used to simulate hydrosedimentological impacts due to land use and management. This study describes the LISEM (Limburg Soil Erosion Model), a physical model developed to evaluate the effect of soil management practices on erosion and sediment production in small rural watersheds. The model is presented using data generated in a small rural watershed in

the northeast slope of Rio Grande do Sul, under intensive tobacco cultivation. Results are presented in the form of hydrographs and sedigraphs, with maps showing the spatial distribution of the erosive processes.

**KEYWORDS:** EROSION MODEL; LISEM; WATERSHED

## **INTRODUÇÃO**

O processo de erosão do solo e da produção de sedimentos tem sido acelerado ao longo da história humana, devido à pressão contínua e crescente sobre o uso dos recursos naturais (solo e água). Isto ocorre principalmente em áreas onde há conversão da vegetação nativa por cultivo agrícola e manejo inadequado. O cultivo intensivo e inadequado promove uma alteração na estrutura do solo, tornando-o mais suscetível aos processos erosivos e à produção de sedimentos. Os sedimentos além de causarem assoreamento dos rios, reservatórios e canais de navegação, são considerados uma importante fonte de poluição aos corpos d'água devido à presença de nutrientes e poluentes que se encontram adsorvidos aos sedimentos (Borah et al., 2007). Para compreender a dinâmica dos processos erosivos é necessário combinar a profunda observação dos processos que ocorrem no campo com a modelagem matemática. Desta forma os modelos matemáticos de predição de erosão e da produção de sedimentos são considerados importantes ferramentas para auxiliar no entendimento desses processos, pois permitem simular de forma simultânea os complexos processos que estão relacionados com a erosão e a produção de sedimentos.

Modelos matemáticos são muito utilizados em estudos ambientais, pois permitem compreender e descrever o impacto das mudanças no uso e no manejo do solo, além de serem capazes prever alterações futuras em ecossistemas profundamente alterados pela ação antrópica como as áreas agrícolas (De Roo e Jetten, 1999; Hessel et al., 2003; Hessel et al., 2006; Takken et al., 2001).

Dentre os inúmeros modelos que tem sido utilizado para estimar a erosão e a produção de sedimentos, destaca-se o modelo LISEM (Jetten, 2002). Esse modelo foi originalmente desenvolvido para a Província de Limburg, Holanda, com a finalidade de simular o processo de erosão e produção de sedimentos em pequenas bacias rurais. O modelo LISEM é um modelo de base física e distribuído capaz de simular de forma discreta a erosão hídrica baseada nos processos de erosão em entresssulcos, em sulcos e no canal.

Com o objetivo de contribuir para os estudos de modelagem de erosão em bacias, este trabalho faz uma descrição breve do modelo LISEM, bem como apresenta um exemplo de aplicação mostrando algumas potencialidades de uso para auxiliar no planejamento de ações conservacionistas na escala de pequenas bacias rurais.

## **MÉTODO E PROCEDIMENTOS TÉCNICOS**

### **Modelo LISEM (LIMBURG SOIL EROSION MODEL)**

O modelo LISEM é um modelo distribuído de base física, que simula a desagregação, transporte e deposição de sedimento no canal fluvial e na bacia vertente, durante e imediatamente após um único evento. O mesmo tem sido utilizado para bacias entre 10 e 300 ha. O modelo foi originalmente desenvolvido para a Província de Limburg – Holanda, pelo Department of Physical Geography da Utrecht University e pelo Soil Physics do Winard Staring Centre em Wadeningen (Holanda), para testar os efeitos de faixas de vegetação e outras práticas de conservação do solo na escala de pequenas bacias rurais (De Roo et al., 1996). O modelo LISEM é integrado a um Sistema de Informação Geográfica, o PCRaster para possibilitar a entrada e saída de dados espacializados.

Os processos hidrológicos simulados pelo modelo consistem na precipitação, interceptação, superfície de armazenagem em micro-depressões, infiltração, movimento vertical de água no solo, escoamento difuso e escoamento no canal. Para a erosão o modelo simula os processos de desagregação pela precipitação direta pelo escoamento difuso e concentrado no canal sendo simulado também a deposição de sedimentos.

Para simular de forma distribuída o modelo divide a área em uma grade de células onde para cada célula são simulados os processos hidrossedimentológicos. Primeiramente é calculada a precipitação que é interceptada pelas plantas de forma a possibilitar os processos hidrológicos como a infiltração, superfície de armazenamento e escoamento superficial. Subseqüentemente o modelo estima a desagregação do solo pela gota da chuva e pelo escoamento e finalmente é calculada a deposição. O escoamento superficial e os sedimentos são propagados a partir de cada célula para o exutório através do método de onda cinemática e utilização da equação de Manning.

O LISEM permite a simulação de vários tipos de superfícies do solo sendo essas definidas como solo normal, com crosta, compactada, estrada impermeável e com

faixas de vegetação. Em apenas uma célula podem existir mais de um tipo de superfície, então uma altura média da lâmina d'água é calculada, resultando em um raio hidráulico médio, e a partir deste a velocidade é calculada, por meio da equação de Manning. O escoamento superficial e no canal são propagados através do método da onda cinética junto com a equação de Manning.

A simulação da desagregação é baseada em processo de erosão-deposição generalizada, onde é assumido que a capacidade de transporte do escoamento reflete um balanço entre os processos contínuos de erosão e deposição. Erosão é a soma de desagregação pelo impacto das gotas da chuva, e desagregação pelo escoamento. O valor da descarga sólida em suspensão é calculado de acordo com a seguinte equação:

$$e = D_s + D_f - D_p \quad (1)$$

Onde:  $e$  representa sedimentos em suspensão ( $g\ s^{-1}$ );  $D_s$  representa a desagregação pelo impacto da gota da chuva ( $g\ s^{-1}$ );  $D_f$  representa a desagregação pelo escoamento ( $g\ s^{-1}$ ), e  $D_p$  representa a deposição de sedimentos ( $g\ s^{-1}$ ).

A desagregação pelo impacto das gotas da chuva é simulada em função da estabilidade dos agregados do solo, energia cinética da chuva e a altura da lâmina de água superficial sobre o solo conforme a equação 2.

$$D_s = \left( \frac{2,82}{A_s \cdot K_e \cdot \exp(-1,48h) + 2,96} \right) \cdot P \cdot A \quad (2)$$

Onde:  $D_s$  representa a desagregação pelo impacto da gota da chuva ( $g\ s^{-1}$ );  $A_s$  representa a estabilidade de agregados (adimensional);  $K_e$  representa a energia cinética ( $J\ m^{-2}$ );  $h$  representa a altura da lâmina de água (mm);  $P$  representa a precipitação ou "throughfall" (mm) e,  $A$  representa a superfície sobre a qual ocorre o impacto da gota da chuva ( $m^2$ ). A energia cinética da precipitação ou "throughfall" das plantas são respectivamente:

$$K_{ep} = 8,95 + 44 \cdot \log(I) \quad (3)$$

$$K_{et} = 15,8 \cdot (h^{0,5}) - 5,87 \quad (4)$$

Onde:  $I$  representa a intensidade da chuva ( $mm\ h^{-1}$ ) e,  $h$  representa a altura da planta (m).

A capacidade do escoamento em erodir o leito do canal é assumida independente da quantidade de material carregado e é apenas uma função da energia consumida pelo escoamento. A desagregação pelo escoamento na bacia e no canal e a deposição é dada pela seguinte equação:

$$D = Y(Tc - C) \cdot Vs \cdot w \cdot dx \quad (5)$$

Onde: D representa Df ou Dp ( $g s^{-1}$ ); Tc representa a capacidade de transporte ( $g m^{-3}$ ); C representa a concentração de sedimentos ( $g m^{-3}$ ); Vs representa a velocidade de queda das partículas ( $m s^{-1}$ ); w representa a largura do escoamento (m); dx representa a largura de célula (m) e, Y representa um fator de eficiência (adimensional), representado pela seguinte equação:

$$Y = \frac{u_{min}}{u_c} = \frac{1}{(0,89 + 0,56 \cdot Coh)} \quad (6)$$

Onde:  $u_c$  representa a velocidade de cisalhamento crítica para dar início a formação de um sulco ( $cm s^{-1}$ );  $u_{min}$  representa o valor mínimo requerido para a velocidade de cisalhamento crítica ( $cm s^{-1}$ ) e, Coh representa a coesão do solo úmido (KPa).

O modelo LISEM considera que erosão e deposição ocorrem ao mesmo tempo, ou seja, estão em equilíbrio. Por esse motivo a equação que determina a desagregação pelo fluxo e deposição (equação 5), leva em consideração a capacidade de transporte e a velocidade de queda das partículas.

O coeficiente de eficiência Y definirá qual processo, erosão ou deposição, que ocorrerá, e este é função da coesividade do solo. Por definição quando Y é igual a 1 está ocorrendo deposição, e quando  $Y < 1$  erosão está ocorrendo, ou seja o  $TC > C$  (Rauws e Govers, 1988).

A capacidade de transporte do escoamento é calculada com base na potência do escoamento (Govers, 1990):

$$Tc = \delta s \cdot c \cdot (w - wc)^d \quad (7)$$

Onde: Tc representa a capacidade de transporte ( $g m^{-3}$ );  $\delta s$  representa massa específica ( $2650 kg m^{-3}$ ); w representa a potência do escoamento (calculado como o produto entre a velocidade do escoamento e a declividade do terreno); wc representa a potência do escoamento crítico definido por Govers (1990) para uma ampla serie de materiais, com valor estabelecido de  $0,4 cm \cdot s^{-1}$  e, c e d são coeficiente experimentais

que dependem do diâmetro médio ( $D_{50}$ ) do material (equações 9 e 10). Esta equação descreve a capacidade de transporte do escoamento em sulcos, no LISEM a equação 7 é descrita da seguinte forma:

$$T_c = 2650 \cdot c \cdot (V \cdot S \cdot 10 - 0,4)^d \quad (8)$$

Onde:  $V$  representa velocidade do escoamento ( $m \cdot s^{-1}$ ) e  $S$  representa a declividade (fração).

$$c = \left[ \frac{(D_{50} + 5)}{0,32} \right]^{-0,6} \quad (9)$$

$$d = \left[ \frac{(D_{50} + 5)}{300} \right]^{-0,25} \quad (10)$$

A entrada de dados no LISEM (planos de informação cartográficos – PI's e dados numéricos) é realizada via uma interface com o sistema de informações geográficas PCRaster. Os PI's necessários para esse modelo são: Modelo Numérico do Terreno (MNT), tipos de solos, uso do solo, localização da drenagem e estradas. Os dados numéricos necessários são: (i) intensidade a chuva; (ii) características físicas do solo (condutividade hidráulica saturada - sendo este parâmetro de grande sensibilidade -, porosidade do solo, tensão de água no solo, umidade antecedente, diâmetro médio, estabilidade de agregados e coesão do solo), que foram determinadas em laboratório; (iii) características da vegetação (coesão por raízes, coeficiente de Manning, rugosidade da superfície, porcentagem de área coberta, altura da vegetação, índice de área foliar) que foram obtidos com base na literatura, e (iv) tipo de superfície. Os parâmetros relacionados com a vegetação variaram de acordo com o tipo de cobertura presente na bacia, e os parâmetros relacionados com o solo de acordo com o tipo de solo. A interface permite que as saídas do modelo sejam apresentadas em mapas, gráficos e tabelas.

### **Bacia experimental de Arvorezinha**

O modelo LISEM tem sido testado utilizando-se dados da bacia de Arvorezinha, que vem sendo monitorada desde 2002, para fins de estudos dos impactos do uso e manejo do solo sobre a produção de sedimentos. A bacia de Arvorezinha é uma pequena bacia rural de cabeceira com uma área de 119 ha, localizada no município de

Arvorezinha/RS. A geologia da área é caracterizada por derrame basáltico, onde o relevo na parte superior da bacia é ondulado (declividade média de 7%) e no terço médio e inferior forte ondulado, com vertentes curtas e vales encaixados. Riachos e rios com grande energia e pouca sinuosidade, do tipo “step and pool”, ou seja, um canal que se constitui em um arranjo sucessivo de degraus e depressões sendo típico de condições de canais fluviais de cabeceiras de bacia. As águas dessa bacia drenam para o sistema fluvial Taquari-Antas. A hierarquia da bacia, segundo Strahler, é de segunda ordem, a densidade de drenagem é de 2,395 km km<sup>-2</sup> e a declividade média do canal principal é de 8,2%. Os solos presentes na bacia hidrográficas são classificados como Argissolos (57%), Cambissolos (33%) e Neossolos (10%) (EMBRAPA, 2006). Esses solos favorecem as condições da formação do escoamento superficial devido à presença de fatores como horizonte B textural (mudança abrupta no teor de argila na subsuperfície), pequena profundidade (média de 0,5 m), pedregosidade e contato lítico (rocha pouco intemperizada) entre o solo e a rocha matriz. A produção de fumo (*Nicotina tabacum* L) é a principal atividade econômica das propriedades encontradas nessa bacia. Esa cultura abrange 52% da área da bacia. O sistema produtivo utilizado pelos agricultores, até o ano de 2003, era baseado no alto uso de insumos e no intenso revolvimento de solo, realizado entre os meses de agosto e outubro. Além das áreas de cultivo são encontradas na bacia áreas com milho (4%), pastagem (10%) e floresta secundária (34%). A partir do ano de 2003, vem sendo implementando um programa de conservação de solo, onde as práticas de adubação verde de inverno e o sistema de cultivo mínimo têm sido adotados em quase 70% da área cultivada com fumo na bacia hidrográfica. Nesta bacia vem sendo monitorado aspectos hidrossedimentológicos e climáticos além da evolução do uso do solo.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com o objetivo de avaliar a aplicabilidade e eficácia do modelo, foi utilizado o banco de dados da bacia de Arvorezinha que apresenta intensa degradação do solo e água pela erosão do solo. Na tabela 1 são apresentadas algumas características do evento que foi simulado. Neste evento, a cultura do fumo encontrava-se na fase final da colheita.

Tabela 1. Características do evento simulado.

Data	Dur. (h)	Prec. (mm)	Qmax (l.s <sup>-1</sup> )	Qmedio (l.s <sup>-1</sup> )	Esc. Sup. (m <sup>3</sup> )	Vol. Tot. (m <sup>3</sup> )
20/1/2003	3,8	26	154	66	628	951

Na Figura 1 são apresentados os hidrogramas e sedimentogramas de saída do modelo. É importante ressaltar que esses valores se referem a seção do canal localizada no exutório da bacia hidrográfica e que o hidrograma corresponde apenas ao escoamento superficial. A primeira evidência é que o modelo é capaz de representar adequadamente o hidrograma e com menor eficiência o sedimentograma. É justificável que a representação da concentração de sedimentos em suspensão apresente um erro maior, pelo fato que processo de geração e transporte de sedimentos numa bacia ser, em geral, mais complexo que o escoamento superficial. Considerando toda a dificuldade associada na representação dos processos hidrossedimentológicos, o modelo LISEM se mostrou eficaz na descrição de um evento numa bacia complexa.

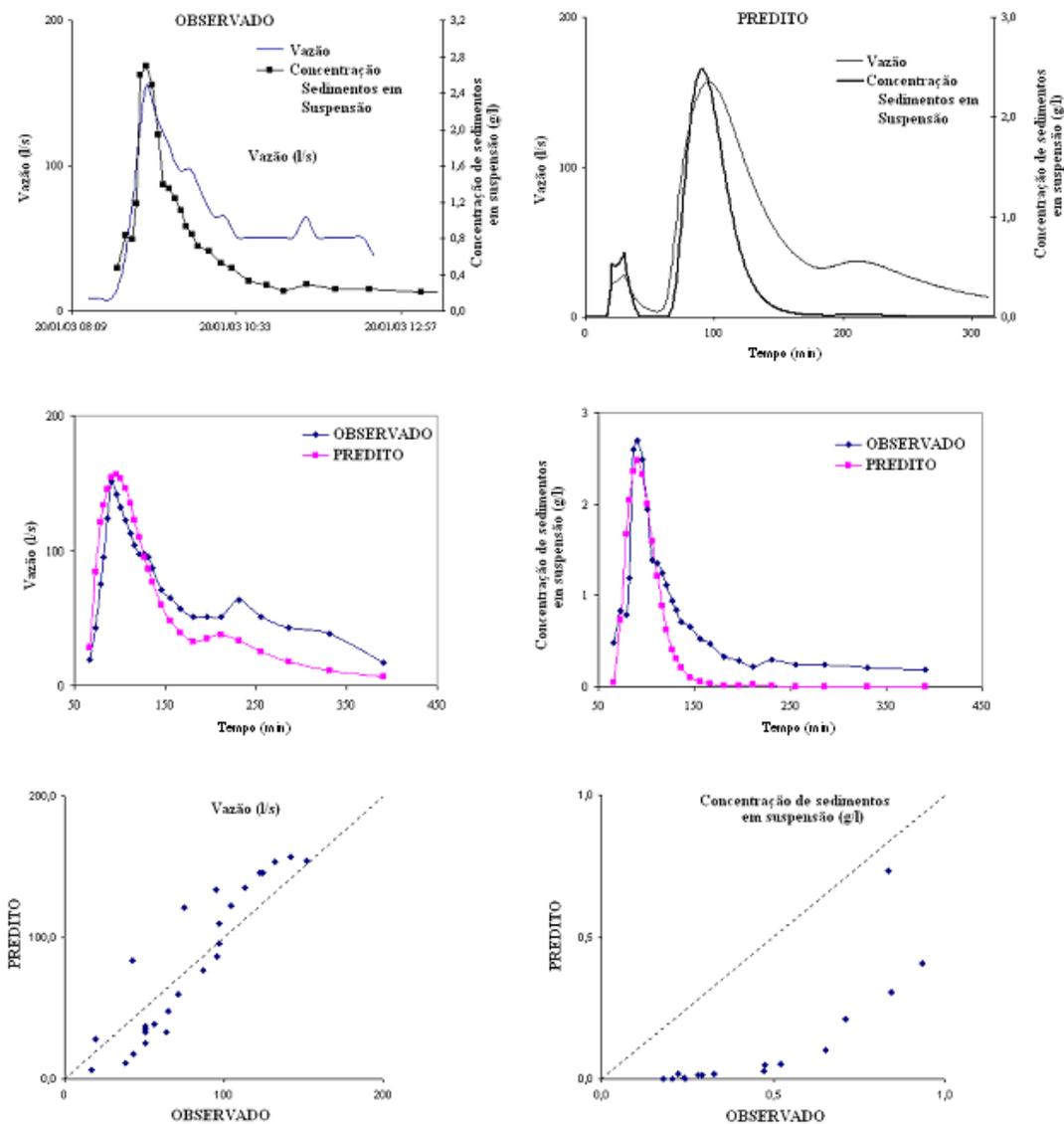


Figura 1. Comparações dos hidrogramas e sedimentogramas observado e predito na bacia experimental de Arvorezinha.

Além dos resultados gerados no exutório da bacia, vazão e concentração de sedimentos, o modelo também gera o resultado da variabilidade espacial dos fenômenos erosivos e deposicionais. Na Figura 2 são apresentados os mapas distribuídos de perda de solo e deposição. Pela Figura 2a, verifica-se então que os valores mais elevados da escala da perda de solo estão ocorrendo nas áreas mais declivosas e, também, próximo à calha fluvial, especialmente no terço inferior da bacia. Os principais fatores que determinam a maior erosão em algumas áreas da bacia é a coincidência das áreas de lavoura em pendentes declivosas. Os pontos salientados em verde e amarelo mostram valores de perda de solo extremamente altos que podem significar de fato grande erosão, ou então erros gerados pelo modelo. Uma investigação é necessária para avaliar as razões de resultados em células com valores muito altos.

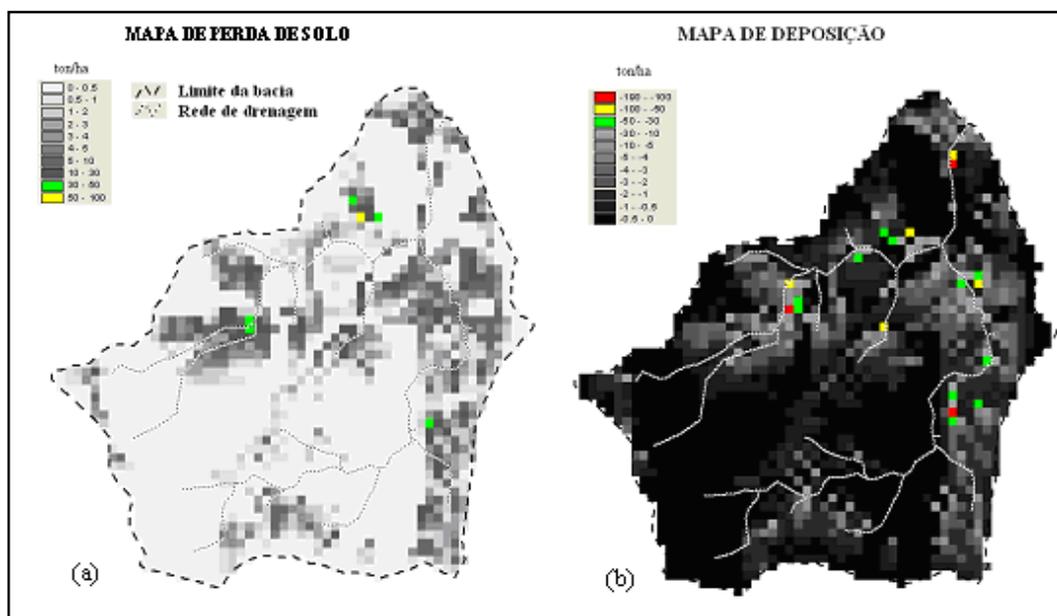


Figura 2. Estimativa da distribuição espacial da erosão (a) e deposição (b) na microbacia durante o evento analisado.

O modelo LISEM gera um mapa de deposição (Figura 2b). Esta é uma das maiores vantagens deste modelo, já que a grande parte dos modelos não é capaz de simular a deposição distribuída no espaço. Da mesma forma, o modelo gera para algumas poucas células valores extremamente altos de deposição que possivelmente são erros de cálculo que precisam ser investigados pelo modelador. Algumas das possibilidades que podem ser testadas são erros do modelo numérico de elevação que afeta os

mapas de direção de fluxo, declividade e área acumulada, a resolução do modelo numérico e o intervalo temporal de simulação.

A condição do modelo em representar de forma distribuída os valores de erosão e deposição é de grande importância no planejamento conservacionista do solo, pois possibilita orientar aos extensionistas as posições mais críticas de uma bacia que necessitam intervenções.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Um modelo de base física e espacialmente distribuído foi apresentado com o intuito de demonstrar a possibilidade de estimar a erosão e a deposição distribuída numa bacia, bem como estimar o hidrograma e o sedimentograma que permitem o cálculo da produção de sedimentos devido a um evento de chuva. O modelo LISEM (Limburg Soil Erosion Model) é adequado para pequenas e médias bacias rurais permitindo representar a dinâmica da variabilidade espacial e temporal do uso e do manejo do solo. Além disso, o modelo apresenta uma forte componente de física do solo e as equações de transporte e desagregação são similares ao modelo EUROSEM.

A utilização deste modelo é adequada estudos de processos hidrossedimentológicos em bacias, principalmente, em áreas com intensa atividade agrícola e com grande dinâmica no uso e manejo do solo. Os resultados são úteis para um grande número de aplicações, principalmente aqueles relacionados com o manejo e preservação de recursos naturais como o solo e água.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BORAH, D.K.; KRUG, E.C.; YODER, D. Watershed sediment yield. In: GARCIA, M.H. (ed). **Sedimentation engineering: processes, measurements, modeling, and practice**. ASCE Task Committee for the Preparation of the Manual on Sedimentation of the Sedimentation Committee of the Hydraulics Division. (ASCE manuals and reports on engineering practice; nº 110). p. 827-858. 2007.

DE ROO, A.P.J.; WESSELING, C.G.; RITSEMA, C.J. LISEM: a single-event physically based hydrological and soil erosion model for drainage basins. I: theory, input and output. **Hydrological Processes**, v. 10, p.1107-1117, 1996.

DE ROO, A.P.J.; JETTEN, V. Calibrating and validating the LISEM model for data sets from the Netherlands and South Africa. **CATENA**, v. 37, p.477-493, 1999.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. 2 ed. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos. 306p. 2006.

GOVERS, G. Empirical relationships on the transporting capacity of overland flow. **IAHS**, publication 189, p. 45-63. 1990.

HESSEL, R.; JETTEN, V; BAOYUAN, L.; YAN, Z.; STOLTE, J. Calibration of the LISEM model for a small Loess Plateau catchment. **CATENA**, v. 54, p.235-254, 2003.

HESSEL, R.; BOSCH, R. van den; VIGIAK, O. Evaluation of the LISEM soil erosion model in two catchments in the East African Highlands. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 31, p. 469-486. 2006.

JETTEN, V. **LISEM user manual, version 2.x**. Utrecht Centre for Environment and Landscape Dynamics, Utrecht university, The Netherlands, 2002. 48p.

RAUWS, G.; GOVERS, G. Hydraulic and soil mechanical aspects of rill generation on agricultural soils. **Journal Soil Science**, v. 39, p.111-124. 1988.

TAKKEN, I.; JETTEN, V.; GOVERS, G.; NACHTERGAELE, J.; STEEGEN, A. The effect of tillage-induced roughness on runoff and erosion patterns. **Geomorphology**, v. 37, p.1-14, 2001.