

# XXX CLH

CONGRESO LATINOAMERICANO  
DE HIDRAULICA | BRASIL | 2022

## ANALES

- VOLÚMEN 2 -  
HIDROLOGÍA SUPERFICIAL  
Y SUBTERRÁNEA



International Association  
for Hydro-Environment  
Engineering and Research

Hosted by  
Spain Water and IWHR, China

***Organizadores***

Dr. Cristiano Poletto - UFRGS (Presidente)  
Dr. José Gilberto Dalfré Filho - UNICAMP  
Dr. André Luís Sotero Salustiano Martim - UNICAMP

**ANALES DEL  
XXX CONGRESO LATINOAMERICANO DE  
HIDRÁULICA 2022**

**- VOLÚMEN 2 -  
HIDROLOGÍA SUPERFICIAL  
Y SUBTERRÁNEA**



Madrid – España  
2023

**Copyright © 2023, by IAHR Publishing.**

Derechos Reservados en 2023 por **IAHR Publishing.**

**Montaje:** Cristiano Poletto

**Organización General de la Obra:** Cristiano Poletto; José Gilberto Dalfré Filho;  
André Luís Sotero Salustiano Martim

**Maquetación:** Juliane Fagotti; Cícero Manz Fagotti

**Relectura General:** Elissandro Voigt Beier

**Portada:** Juliane Fagotti

---

Cristiano Poletto; José Gilberto Dalfré Filho; André Luís Sotero Salustiano Martim  
(Organizadores)

ANALES del XXX Congreso Latinoamericano de Hidráulica – VOLÚMEN 2 –  
HIDROLOGÍA SUPERFICIAL Y SUBTERRÁNEA / Organizadores: Cristiano Poletto; José  
Gilberto Dalfré Filho; André Luís Sotero Salustiano Martim – MADRI, España: IAHR  
Publishing, 2023.

958p.: il.;

ISBN • 978-90-832612-3-2

*ES AUTORIZADA la libre reproducción, total o parcial, por cualquier medio, sin  
autorización escrita del Editor o de los Organizadores.*

---

## **ANÁLISE DE EQUAÇÕES DE EFICIÊNCIA DE DESAGREGAÇÃO NO MODELO LISEM POR MEIO DE MODELAGEM EM PEQUENA BACIA RURAL.**

<sup>a1</sup>Alexandre Schlesner, <sup>a2</sup>Felipe Bernardi, <sup>a3</sup>Alice Dambroz, <sup>a4</sup>Fabio Schneider <sup>a5</sup>Larissa Werle, <sup>a6</sup>Gabriel Pereira, <sup>a7</sup>Jean Minella, <sup>b8</sup>Claudia Barros

<sup>a</sup> Universidade Federal de Santa Maria, Brasil; <sup>b</sup> Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.

<sup>1</sup>arroz.ale@gmail.com, <sup>2</sup>felipekbernardi@gmail.com, <sup>3</sup>alice.pbd@outlook.com, <sup>4</sup>fjas.schneider@gmail.com, <sup>5</sup>larissawerle@hotmail.com, <sup>6</sup>gabrielpereirars@gmail.com, <sup>7</sup>jminella@gmail.com, <sup>8</sup>claudia.barros@ufrgs.br

### **RESUMO:**

O Limburg Soil Erosion Model (LISEM) é um modelo matemático erosivo que, através da simulação dos processos de desagregação, transporte e deposição de sedimentos gerados pelo escoamento superficial sobre o solo, calcula a erosão e a produção de sedimentos (SY) pela chuva na escala de eventos. Autores relatam uma boa capacidade do modelo em simular a componente hidrológica dos eventos, mas de apresentar uma superestimativa da produção de sedimentos. Atualmente, o modelo apresenta opções para ajustar a intensidade do processo de desagregação utilizando equações de eficiência (RAUWS & GOVERS, EUROSEM e MMF) acopladas à equação principal do modelo, que atuam como moderadores do processo de desagregação. Em simulações para bacias com solos coesos e relevos acentuados, estas equações precisam ser adequadamente selecionadas para a boa estimativa de SY na modelagem de erosão. Por meio do monitoramento ambiental de uma bacia hidrográfica com atividade agrícola de 1,2 km<sup>2</sup>, variáveis hidrológicas de vazão, concentração de sedimentos em suspensão e intensidade de precipitação foram obtidas, bem como a caracterização física do relevo, uso e manejo do solo, para compor uma base de dados monitorados de 20 eventos de precipitação, que foram então calibrados utilizando as três equações de eficiência de desagregação para avaliar o desempenho da modelagem do modelo LISEM para condições de solos coesos. A equação do modelo EUROSEM apresentou a melhor previsão para produção de sedimentos em 17 dos 20 eventos simulados, respeitando os valores de coesão do solo lidos a campo. Para três eventos simulados o ajuste não foi satisfatório devido à característica de exaurimento das fontes de sedimentos nesses eventos.

### **ABSTRACT:**

The Limburg Soil Erosion Model (LISEM) is a mathematical erosive model that, by simulating the processes of disaggregation, transport and deposition of sediments generated by surface runoff on the soil, calculates erosion and sediment yield (SY) by rainfall in the event scale. Authors report a good ability to simulate the hydrological component of events, but to present an overestimation of sediment production. Currently, the model presents options to adjust the intensity of the disaggregation process using efficiency equations (RAUWS & GOVERS, EUROSEM and MMF) coupled to the main equation of the model, which act as moderators of the disaggregation process. These equations need to be properly selected for a good estimation of SY in erosion modeling. By environmental monitoring of a catchment with agricultural activity of 1.2 km<sup>2</sup>, hydrological variables of flow, suspended sediments concentration and intensity of precipitation were obtained, as well as the physical characterization of the relief, use and management of the soil, to compose a monitored database of 20 precipitation events, which were then calibrated using the three disaggregation efficiency equations to evaluate the performance of modeling for cohesive soil conditions. The EUROSEM model equation presented the best prediction for sediment production in 17 of the 20 simulated events, respecting the soil cohesion values read in the field. For three simulated events the adjustment was not satisfactory due to the depletion characteristic of the sediment sources in these events.

**PALAVRAS-CHAVE:** LISEM. Soil detachment. Sediment yield.

## INTRODUÇÃO

A produção de sedimentos em bacias hidrográficas, é uma importante variável quantitativa para dimensionar o impacto das práticas de uso e manejo sobre os solos agrícolas, a qualidade ambiental e os recursos hídricos. A produção de sedimentos (SY) integra a dinâmica dos processos erosivos gerados pelo escoamento superficial, onde fatores controladores como o relevo, rugosidade do solo, cobertura vegetal e rede de drenagem, aceleram ou atenuam a velocidade do fluxo e promovem maior ou menor desagregação e deposição de sedimentos (Hessel e Jetten, 2007; López-Vicente et al., 2013). A modelagem matemática de base física e distribuída em bacias de escala intermediária, visa aprimorar o conhecimento mais detalhado desses processos e sobre a dinâmica do SY, sujeito a grande variabilidade espacial e temporal (Cuomo et al., 2015; Lin et al., 2010; Zhang et al., 2014). A calibração e validação de modelos erosivos de base física são ferramentas de investigação e análise de como os fatores controladores atuam na magnitude dos processos erosivos (Sommerlot et al., 2013; Wirtz et al., 2012). Modelos de erosão mais recentes evoluíram com o crescimento da capacidade de processamento computacional, novas linguagens de programação e o acoplamento dos modelos aos sistemas de informação geográfica (Hessel, 2005; Jetten et al., 2003; Starkloff et al., 2018). Como representante desta classe temos o LISEM (Limburg Soil Erosion Model) que foi desenvolvido com base no modelo EUROSEM (Morgan, R.P.C. et al., 1998) ao qual o conjunto de equações matemáticas e a representação virtual de pequenas e médias bacias tem como objetivo simular os principais componentes envolvidos no processo erosivo durante um evento chuvavazão (Jetten, 2002). O processo de desagregação no LISEM é calculado obedecendo ao princípio da capacidade de transporte (TC) do fluxo (RAUWS e COVERS, 1988). O TC calculado em cada célula representa a concentração máxima de sedimentos permitida pelas características hidráulicas do fluxo, os sedimentos e em função de uma concentração que já está no fluxo. O TC é calculado por:

$$TC = \rho_s * c(\omega - \omega_{cr})^d \quad [1]$$

onde: TC é a capacidade de transporte expressa na concentração de sedimentos ( $\text{kg m}^{-3}$ );  $\rho_s$  é a densidade do sedimento ( $\text{kg m}^{-3}$ );  $\omega$  representa o poder de fluxo ( $\text{m s}^{-1}$ );  $\omega_{cr}$  é o poder de fluxo crítico ( $\text{m s}^{-1}$ ); c e d são coeficientes em função da granulometria de sedimentos.

A equação de TC (1) utiliza parâmetros (c e d) ligados à granulometria de sedimentos. É uma formulação que busca representar a dinâmica da massa dos sedimentos transportados (como concentração de sedimentos suspensos (SSC) em função das condições hidráulicas do fluxo em termos de velocidade e declividade. Expressa, portanto, o máximo de SSC permitido pelo fluxo para certos tamanhos de sedimentos transportados. Se há a possibilidade de aumentar a carga de sedimentos, sugere que a desagregação do solo ocorra até os níveis suportados indicados pelo TC. Se for o caso, a desagregação do solo por processo de escoamento no modelo LISEM é calculado por:

$$det = y * B * \max(0,0, (TC - C)) \quad [2]$$

onde o det é a taxa de desagregação ( $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ); y é o coeficiente de eficiência do processo de desagregação, B é o raio hidráulico do fluxo (m); TC é a capacidade de transporte por fluxo ( $\text{kg m}^{-3}$ ); C é a concentração de sedimentos presente no fluxo ( $\text{kg m}^{-3}$ ).

Para controlar a intensidade do processo de desagregação de acordo com a resistência oferecida pelos diferentes tipos de solo, um coeficiente multiplicador y foi adicionado à eq. [2], que tomou a forma de uma equação de ajuste vinculada a um parâmetro representativo da resistência do solo e das raízes das plantas (coesão do solo em kPa). Atualmente, três opções de equações de eficiência (y) estão disponíveis para uso no modelo LISEM em versões 3.96 e seguintes (Hong et al., 2017):

$$E1: y = \min (1.0, 1/(0.89 + 0.56(coh + coveg))) \quad [3]$$

$$E2: y = 0.79 * \exp(-0.85 * coh) \quad [4]$$

$$E3: y = 1.0/(2.0 * coh) \quad [5]$$

onde *coh* é a coesão do solo (kPa) e *coveg* a coesão do solo adicional pelas raízes de plantas (kPa).

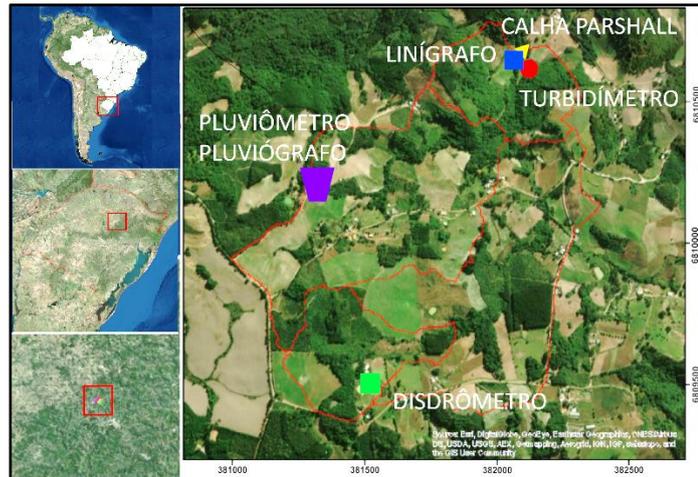
A eq. E1 é uma função matemática não linear originalmente fornecida pelo modelo LISEM com habilidade de descrever o processo de desagregação de pequenos sulcos em testes com solos da região de concepção do modelo. A eq. E2 é uma função exponencial negativa obtida a partir de uma ampla gama de solos testados para compor o modelo EUROSEM (Morgan, R.P.C. et al., 1998). Finalmente, a eq. E3 é uma função inversa não linear usada no modelo Morgan-Morgan-Finney (MMF) (Morgan, 2001). De acordo com o manual operacional do LISEM, a eq. E1 produz desagregação intermediária, a eq. E2 produz menores taxas de desagregação e a E3 produz as mais altas taxas de desagregação. No entanto, estudos comparativos para avaliar a resposta da produção de sedimentos em pequenas bacias hidrográficas rurais são praticamente desconhecidos com o uso dessas novas opções de equações de eficiência de desagregação no modelo LISEM.

Para investigar a resposta do modelo em simular o SY em eventos chuva-vazão para esta bacia, um estudo comparativo para avaliar o uso de alternativas de equações de eficiência pode contribuir para uma melhor representação dos níveis de desagregação por escoamento superficial e melhor caracterização da erosão e estimativa do SY. O objetivo deste estudo é comparar essas diferentes equações em simular a produção de sedimentos quando aplicadas no âmbito de uma pequena bacia hidrográfica rural no sul do Brasil, com presença de condições de solo coesivo e fortes declividades que proporcionam alta potência de escoamento, apoiadas pela caracterização do ambiente físico com alta resolução espacial e monitoramento hidrológico de eventos pluvionêtricos na escala intradiária.

## MATERIAL E MÉTODOS

A bacia hidrográfica do Arroio Lajeado Ferreira, com 1,26 km<sup>2</sup>, está localizada no município de Arvorezinha, no sul do Brasil, com exutório nas coordenadas 28° 49'33" S e 52° 12'30" W (Figura.1). O clima da região é Cfb segundo a escala de Köppen, com 1.650 mm de chuvas médias anuais bem distribuídas. O relevo é acentuado com vales encaixados, altitude entre 583 e 728 m, sendo plano a ondulado no terço superior com inclinação média de 8%. A bacia apresenta solos jovens e rasos (Neossolos e Cambissolos), e solos mais profundos (Argissolos) com horizonte B textural. Devido a diferentes comportamentos hidrológicos, no mapa de solos duas regiões também foram caracterizadas como unidades de solo distintas: solos de várzea e solos de estradas. Em relação ao uso da terra e manejo da superfície de cobertura, a bacia é composta por pequenas propriedades onde são cultivados fumo, milho, soja, erva-mate e reflorestamento (Figura 2).

O monitoramento de longo prazo da bacia foi realizado por equipamentos automáticos e por campanhas de amostragem manual. Os dados pluviométricos foram obtidos através de pluviômetros para volume acumulado em 24 horas, e por pluviógrafos para obtenção da intensidade pluviométrica (mm h<sup>-1</sup>). A descarga líquida de água foi determinada por um transdutor de pressão e datalogger instalado em uma calha Parshall no exutório da bacia. Os dados de concentração de sedimentos em suspensão foram obtidos a partir de um turbidímetro eletrônico marca Solar e datalogger instalado junto ao exutório em intervalos de 10 minutos, calibrado com soluções com concentrações padrão, conforme metodologia descrita em (Merten et al., 2014). Amostras da concentração de sedimento em suspensão foram coletadas manualmente com amostrador USDH-48 e analisadas no laboratório de sedimentologia (UFSM) pelo método de evaporação (Shreve e Downs, 2005), para posterior calibração do turbidímetro.



**Figura 1** – Localização e instrumentos na bacia de Arvorezinha

O LISEM requer um conjunto de mapas base em formato raster para atribuir espacialmente os parâmetros de entrada atribuídos nas tabelas utilizadas em cada simulação de eventos, mapas de elevação do relevo, solos, uso da terra, estradas, canais e distribuição de chuvas. O mapa de uso do solo foi demarcado com auxílio de um GPS-RTK para formar um banco de dados espacial com informações de uso, manejo e características da vegetação e compor a tabela de parâmetros para geração dos mapas de entrada no LISEM. Os parâmetros de entrada relacionados com a cobertura do uso da terra, incluindo  $n$  de Manning ( $n$ ), cobertura foliar ( $sc$ ), altura da planta ( $ch$ ), índice de área foliar ( $lai$ ), coesão radicular adicional ( $cor$ ), fração de cobertura por pedras ( $sf$ ), rugosidade superficial ( $rr$ ) e coesão do solo ( $co$ ), foram tabulados em um arquivo de texto e submetidos ao script especialmente programado no software Nutshell (Jetten e van den Bout, 2017), que executa os comandos do PcRaster (Karssenberget al., 2010), para a montagem dos mapas finais de entrada do LISEM, relacionando o parâmetro de entrada tabelado com o mapa de classes de uso da terra de cada evento considerando o calendário agrícola, conforme metodologia apresentada no manual do usuário. Estes valores, com exceção da coesão do solo, foram mantidos fixos na calibração. Tanto os mapas de uso da terra quanto os do solo incluíram características da estrada devido à sua importante contribuição para a produção de sedimentos sobre o sistema de bacia (Minella et al., 2014, 2007).

O modelo digital de elevação (DEM) e o mapa de canais foram obtidos em campo a partir de um levantamento topográfico de cerca de 12.000 pontos com GPS-RTK, com posterior interpolação dos pontos citados para um raster com resolução de 5 m através da ferramenta topo to raster presente no software ArcGIS (versão 10.1). Com o DEM, o mapa de direção de fluxo foi preparado automaticamente pelo algoritmo PcRaster e depois modificado manualmente para representar as direções de fluxo observadas em campo, obedecendo às características do terreno que proporcionam um comportamento peculiar ao fluxo, como estradas, canais e obstáculos que não podem ser detectados automaticamente com esta resolução de modelo de terreno. Os mapas de relevo e de direção de fluxo foram os mesmos para todo o conjunto de eventos.

O mapa de solos existente foi aprimorado (de Barros et al., 2014) com novas coordenadas geográficas dos limites a partir dos dados do GPS. Os parâmetros dos solos, condutividade hidráulica saturada ( $K_{sat}$ ), porosidade do solo ( $\theta_{sat}$ ), potencial de tensão da água do solo ( $\psi$ ), teor inicial de água do solo ( $\theta_{tai}$ ) e estabilidade de agregados ( $ea$ ) foram estimados a partir dos estudos de Barros (2012) e Dalbianco (2013b) e configurado em tabelas para cada evento e atribuído de acordo com o mapa de classes de solos pelo programa Nutshell. O  $\psi$  é dependente do  $\theta_{tai}$ , mas foi considerado com um valor fixo de 30 kPa para todos os eventos para simplificar o processo de calibração.

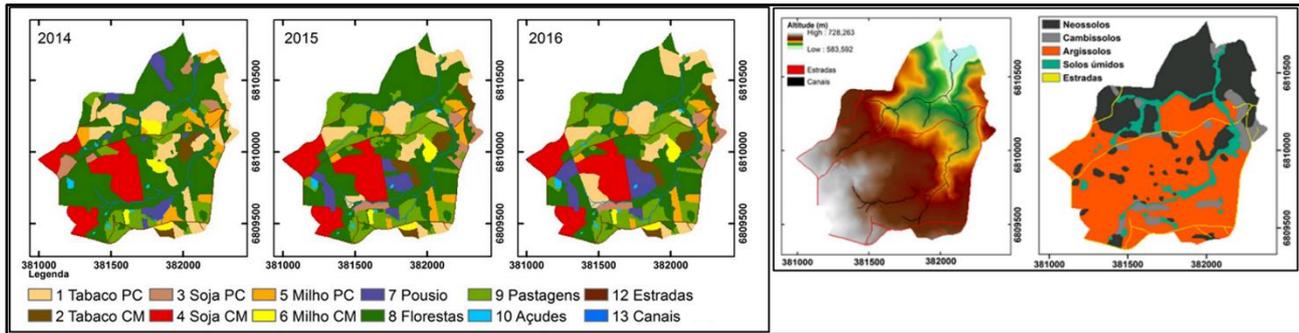


Figura 2 - Mapas de uso do solo, relevo e solos da bacia de Arvorezinha

Os parâmetros que sofrem a maior variação de valores em função do calendário agrícola são os valores de  $ch$  e  $lai$ , que foram tabulados individualmente para cada evento. O mapa de canais que representa a rede de drenagem do canal principal, formado predominantemente por leito de rochas basálticas, os parâmetros de  $n$  de Manning de 0.01 e altura das paredes do canal de 1 metro foram usadas, bem como valores elevados de coesão das paredes de 10,000 kPa para evitar possíveis desagregações excessivas no canal, que não são observadas. Outros parâmetros de configuração do modelo incluem o uso de 20 segundos de timestep, uso de camada simples no modelo de infiltração do Green & Ampt e 0.05 de taxa de transporte das partículas pelo impacto da gota de chuva sobre os agregados da superfície. A equação de energia cinética da chuva utilizada foi a  $KE = 15.204 * (I)^{1.126}$ , elaborada pelo monitoramento das características da precipitação sobre a bacia a partir de um disdrômetro da marca Parsivel<sup>2</sup> da OTT (Ramon et al. 2017).

Vinte eventos pluviométricos ocorridos no período de 2014 a 2016 foram selecionados para compor as simulações, com baixa, média e alta magnitude de descarga líquida (Figura 3). A estratégia de calibração utilizada neste estudo compreende três etapas: (I) calibração do escoamento superficial dos eventos, (II) a simulação com as três equações de eficiência de desagregação do solo utilizando os valores iniciais propostos de coesão do solo como medidos no campo, e (III) a calibração dos sedimentos com alterações nos valores iniciais de coesão do solo com a equação que melhor simula o SY.

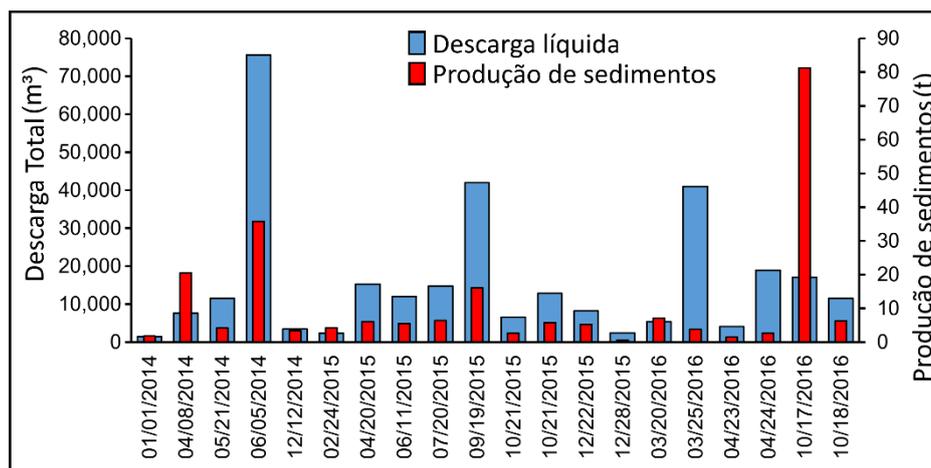


Figura 3 - Características dos eventos monitorados.

Sobre os dados de descarga líquida total, um filtro matemático proposto por Lyne e Hollick (Lyne e Hollick, 1979; Nathan e McMahon, 1990) foram aplicados para estimar a participação do componente de escoamento de superfície na descarga. Este procedimento foi realizado devido à descarga total medida possuir uma mistura de fluxos superficiais e subsuperficial, e o LISEM tem apenas a capacidade de simular o componente de fluxo de escoamento superficial. Este filtro está disponível no software BFI 3.0+ de uso livre com calibração de apenas um único parâmetro ( $\alpha$ ) que

depende das características ambientais da bacia (Nathan e McMahon, 1990; Zhang et al., 2017). A calibração do escoamento no LISEM foi ajustada pela umidade do solo para equalizar a descarga líquida total simulada pelo modelo com o componente de fluxo de superfície calculado com o filtro matemático. Nesta calibração, os valores de condutividade hidráulica saturada, porosidade e potencial matricial atribuídos ao solo, e os demais parâmetros atribuídos à cobertura que influenciam o escoamento, como *n* de Manning e declividade, foram mantidos constantes nos valores iniciais estimados para a condição de cada evento. As regiões de várzea, geralmente armazenam mais umidade devido ao acúmulo de água por gravidade e declividade mais baixa, foram ajustadas com menor amplitude de variação no teor de água do solo em proporção aos outros solos, que foram ajustados de forma mais acentuada, seguindo a ordem Estradas > Cambissolos > Argissolos > Neossolos > Terras Baixas.

Na segunda etapa, os dados de SY foram obtidos com a aplicação de diferentes equações de eficiência de desagregação sobre os eventos calibrados hidrológicamente. Nesta etapa, os dados de coesão do solo propostos como os valores iniciais utilizados nas simulações foram: 7 kPa para Tabaco/Soja/Milho sob lavoura convencional (TC); 8 kPa para Tabaco/Soja/Milho sob cultivo mínimo (MT) e Pastagem/Casas/Estradas; 10 kPa para Pousio/Floresta/Pastagens e 20 kPa para células cobertas por canais e outros usos da terra. Estes valores foram obtidos adaptados de (Dalbianco, 2013a) que os determinou com o equipamento Torvane, coesão do solo para 71 locais amostrados na bacia. Foram feitas três rodadas consecutivas de simulações, uma com cada uma das equações de eficiência disponíveis no LISEM. A equação com os resultados mais promissores em termos de SY simulado em relação ao observado nesta etapa foi utilizada para calibração mais precisa do SY com mudança na coesão do solo. Neste terceira etapa de análise, começamos a calibrar o SY com a eq. E2, esperada para ser a equação mais promissora a ser usada, agindo proporcionalmente sobre os parâmetros de coesão dos diferentes grupos de uso da terra/solos. A intenção é distribuir a ação de calibração proporcionalmente aos dados de coesão medidos para toda a superfície que está sujeita a desagregação pelo escoamento. Após esta etapa, foi realizada uma ajuste fino sobre um uso específico (estradas) como o procedimento final de calibração. Após o ajuste satisfatório do SY com a equação que melhor simulou os dados observados, utilizamos os valores de coesão calibrados com esta equação com as outras duas equações para identificar as diferenças no SY entre eles. Nesse processo, todos os outros parâmetros foram mantidos constantes entre os testes com as diferentes equações.

Simulados os eventos no LISEM, os valores de escoamento e SY simulados pelas diferentes equações foram comparados estatisticamente com os observados pelo monitoramento de acordo com os coeficientes de eficiência NSE (Nash e Sutcliffe, 1970), dados por:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Em - Es)^2}{\sum_{i=1}^n (Em - E)^2} \quad [6]$$

onde: *Em* é a variável medida em um intervalo de tempo, *Es* é a variável simulada no intervalo de tempo; *E* é a média dos valores observados e *n* é o número de observações. Os valores NSE variam de -∞ a 1, onde 1 indica um ajuste perfeito entre os dados calculados e observados. As simulações também foram analisadas em função dos *Pbias*, o que representa o desvio dos dados simulados em relação aos observados, dado por:

$$Pbias(\%) = \frac{Es - Em}{Em} * 100 \quad [7]$$

onde: *Es* é a variável simulada e *Em* a variável observada. O PBIAS mede a tendência média dos valores simulados de ser maior ou menor do que os observados. O valor ideal do PBIAS é 0,00, com valores de baixa magnitude indicando simulação precisa do modelo. Valores positivos indicam vieses de superestimativa, enquanto valores negativos indicam vieses de subestimação do modelo.

## RESULTADOS

A separação do fluxo total, nas suas componentes de escoamento superficial e subsuperficial é apresentada na Tabela 1. O escoamento superficial observado passa a ser considerado aquele resultante da aplicação do filtro matemático sobre a descarga total do evento. A calibração do escoamento superficial simulado pelo modelo foi obtida aplicando alterações nos valores de umidade inicial do solo, expressando a condição de umidade do solo imediatamente antes do início das chuvas de cada evento, também apresentado na Tabela 2. A Tabela 3 contém o SY observado dos eventos, e os respectivos valores SY obtidos pelas simulações com as três equações de eficiência propostas pelo LISEM (E1, E3 e E2), obtidos para o conjunto dos 20 eventos monitorados. Neste momento, foram utilizados os valores iniciais de coesão do solo propostos, sem qualquer calibração adicional entre as rodadas. Pelo destaque preditivo da eq. E2 em relação às demais, foi realizada calibração específica dos eventos utilizando esta equação, buscando ajustar o SY considerando o parâmetro  $\text{coh}$  o único parâmetro de calibração do ajuste final do SY, e após com as demais equações.

## DISCUSSÃO

Para o melhor desempenho de predição do escoamento e do processo erosivo, modelos de erosão física e distribuída requerem representação detalhada do ambiente físico e das características dos eventos (de Vente et al., 2008; Pandey et al., 2016; Van Oost et al., 2005; Zi et al., 2016). Para atendermos esta demanda elaboramos um DEM com melhoria significativa na qualidade da representação da declividade entre células que impacta no cálculo hidráulico de escoamento, e no caminho da direção de fluxo com uma resolução do DEM satisfatória para desempenho na execução do programa.

Apesar da pequena área de captação ocupada com estradas (cerca de 2,4%), a representação destas melhora a conectividade entre encostas, estradas e canais, pois é bastante direta e favorece o escoamento e aumenta o transporte e conectividade dos sedimentos com o sistema de drenagem (Minella et al., 2007; Pechenick et al., 2014). Sua representação como unidade de uso e um tipo específico de solo em escala de bacia com parâmetros específicos, visam aumentar a representação do processo de erosão e a resposta sobre o SY (Croke et al., 2013).

**Tabela 1** - Dados dos eventos selecionados após a separação dos escoamentos pelo filtro.

Data	PPt	Qt (m <sup>3</sup> )	Q/P	ES (m <sup>3</sup> )	ES/Qt	ESS (m <sup>3</sup> )	ESS/Qt
01/01/2014	8.98	1462.06	12.95%	1173.75	80.28%	288.31	19.72%
04/08/2014	37.95	7691.11	16.12%	4174.52	54.28%	3516.59	45.72%
05/21/2014	53.36	11543.17	17.21%	7700.26	66.71%	3842.90	33.29%
06/05/2014	67.80	75604.85	88.71%	27586.91	36.49%	48017.94	63.51%
12/12/2014	32.10	3473.45	76.48%	1778.38	51.20%	2763.32	79.56%
02/24/2015	25.95	2384.31	7.31%	1484.36	62.26%	899.95	37.74%
04/20/2015	59.53	15270.62	20.41%	9686.47	63.43%	5584.15	36.57%
06/11/2015	57.82	12040.18	16.57%	7255.84	60.26%	4784.34	39.74%
07/20/2015	54.99	14733.17	21.32%	9188.22	62.36%	5544.95	37.64%
09/19/2015	96.57	41998.65	34.60%	19611.91	46.70%	22386.75	53.30%
10/21/2015	23.80	6588.59	22.03%	2175.72	33.02%	4412.87	66.98%
10/21/2015	15.79	12836.00	64.69%	5159.03	40.19%	7676.97	59.81%
12/22/2015	32.46	8266.57	20.26%	4421.41	53.49%	3845.16	46.51%
12/28/2015	18.79	2461.62	11.64%	1287.25	52.29%	1174.37	47.71%
03/20/2016	50.08	5427.38	8.62%	3699.86	68.17%	1727.52	31.83%
03/25/2016	100.98	41021.97	32.32%	27815.36	67.81%	13206.60	32.19%
04/23/2016	32.10	4081.53	10.12%	2729.21	66.87%	1352.33	33.13%
04/24/2016	57.91	18985.10	26.08%	10072.06	53.05%	8913.04	46.95%
10/17/2016	64.06	17119.04	21.26%	12047.88	70.38%	5071.16	29.62%
10/18/2016	24.34	11515.75	37.65%	7575.14	65.78%	3940.62	34.22%

PPt – Precipitação (mm), QT – Descarga líquida total (m<sup>3</sup>), Q/P – Taxa escoamento (%), ES – Escoamento superficial (m<sup>3</sup>), ES/Qt – Taxa de escoamento superficial (%), ESS – Escoamento subsuperficial, ESS/Qt – Taxa de escoamento subsuperficial (%).

**Tabela 2 - Calibração inicial dos eventos atuando apenas sobre os valores de umidade do solo**

Data evento	Calibração umidade (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )					ES Obs [m <sup>3</sup> ]	ES Sim [m <sup>3</sup> ]	NSE	PBias
	Neossolos	Cambissolos	Argissolos	Áreas úmidas	Estradas				
01/01/2014	0.314	0.471	0.490	0.315	0.393	1174	1088	1.000	-7.90
04/08/2014	0.166	0.250	0.260	0.186	0.232	4175	4043	1.000	-3.26
05/21/2014	0.241	0.361	0.376	0.251	0.313	7700	7914	0.999	2.70
06/05/2014	0.282	0.422	0.440	0.286	0.358	27587	26528	0.992	-3.99
12/12/2014	0.270	0.405	0.422	0.276	0.345	1778	1816	1.000	2.09
02/24/2015	0.273	0.410	0.427	0.279	0.349	1848	1389	0.999	-33.05
04/20/2015	0.236	0.353	0.368	0.246	0.308	9686	9781	1.000	0.97
06/11/2015	0.225	0.338	0.352	0.237	0.296	7256	7274	1.000	0.25
07/20/2015	0.241	0.361	0.376	0.251	0.313	9188	8917	0.998	-3.04
09/19/2015	0.174	0.261	0.272	0.192	0.240	19612	19749	0.999	0.69
10/21/2015	0.284	0.426	0.444	0.289	0.361	2176	2199	1.000	1.05
10/21/2015	0.314	0.470	0.490	0.313	0.393	5159	5141	1.000	-0.35
12/22/2015	0.266	0.399	0.416	0.273	0.341	4421	4511	1.000	2.00
12/28/2015	0.293	0.440	0.458	0.296	0.371	1287	1281	1.000	-0.47
03/20/2016	0.136	0.204	0.212	0.159	0.198	3699	3735	1.000	0.96
03/25/2016	0.225	0.338	0.352	0.237	0.296	27815	27960	1.000	0.52
04/23/2016	0.264	0.396	0.412	0.271	0.338	2729	2730	1.000	0.04
04/24/2016	0.241	0.361	0.376	0.251	0.313	10072	10319	0.998	2.39
10/17/2016	0.214	0.321	0.334	0.227	0.284	12048	11858	0.998	-1.60
10/18/2016	0.307	0.461	0.480	0.309	0.386	7575	7494	1.000	-1.08

ES Obs Escoamento superficial observado; ES Sim – Escoamento superficial simulado; NSE - Nash Sutcliffe; Pbias – Índice Pbias

As diferentes equações de eficiência puderam ser comparadas a partir de uma gama diversa de condições de eventos pluviométricos. O escoamento é uma componente de importante determinação pois impacta no resultado da produção de sedimentos pelo modelo em decorrência de sua ação energética na desagregação. A correta medição, mapeamento e calibração das variáveis de solo que afetam a infiltração da água, entre elas, a porosidade total, o conteúdo de umidade, a condutividade hidráulica saturada e a tensão matricial da água, parâmetros de ajuste exigidos pelo método de equação Green & Ampt, utilizados neste estudo é básico para uma boa modelagem do escoamento (Hu et al., 2015). De modo geral, umidade e condutividade hidráulica saturada são os parâmetros mais sensíveis do modelo, no entanto, existem interpretações diferentes sobre a importância relativa que cada parâmetro apresenta para a formação do escoamento, dependendo das condições dos eventos (Sheikh et al., 2010). A calibração do mesmo processo, atuando em mais de uma variável, caracteriza um exemplo de sobreposição do desempenho dos parâmetros (Beven, 2011), tornando a sensibilidade do parâmetro mais complexa e laboriosa (Dalbianco, 2013b; de Barros et al., 2014). A variabilidade espacial da umidade dos solos pode ser determinada no campo com instrumentos ou por modelos físicos ou empíricos específicos (Gomes et al., 2008; Robinet et al., 2018), como índices topográficos,

por ex. Como podemos ver na Tabela 1, a calibração dos valores finais de umidade do solo nos eventos não apresentou valores fora dos limites fisicamente plausíveis. Isso implica em admitir que o uso do  $K_{sat}$ ,  $\theta$  e  $\psi$  propostos para calibrar o escoamento foi adequado para condição geral dos eventos, mas esses valores podem ser outros, e de qualquer maneira ser ajustado agindo suavemente no nível de conteúdo de água.

**Tabela 3** - Resultados das simulações e calibração dos eventos pelas diferentes equações.

Data evento	SY Obs	SY E1	PBIAS (%)	NSE	SY E3	PBIAS (%)	NSE	SY E2	PBIAS (%)	NSE
01/01/2014	1.79	17.35	-8.69	-1.82	12.49	-5.98	-0.33	0.46	0.74	0.98
04/08/2014	20.54	126.27	-5.15	-123.46	62.76	-2.06	-18.85	1.19	0.94	-3.17
05/21/2014	4.17	450.77	-107.10	-4196.83	271.19	-64.03	-1499.59	5.24	-0.26	0.98
06/05/2014	35.78	1581.00	-43.19	-3907.33	972.74	-26.19	-1435.99	21.96	0.39	0.69
12/12/2014	3.47	35.63	-9.27	-16.94	21.10	-5.08	-4.39	0.46	0.87	0.84
02/24/2015	4.26	10.32	-1.42	0.21	7.34	-0.72	0.79	0.16	0.96	0.64
04/20/2015	6.09	507.54	-82.34	-10166.68	327.63	-52.80	-4179.62	7.64	-0.25	0.90
06/11/2015	5.52	386.30	-68.98	-4718.12	238.44	-42.20	-1764.76	5.42	0.02	1.00
07/20/2015	6.36	569.82	-88.59	-14353.11	342.12	-52.79	-5096.04	7.11	-0.12	0.97
09/19/2015	16.10	1197.95	-73.41	-55051.98	718.22	-43.61	-19429.38	16.31	-0.01	1.00
10/21/2015	2.71	51.45	-17.98	-33.04	35.30	-12.03	-14.22	0.90	0.67	0.95
10/21/2015	5.79	214.09	-35.97	-1559.42	137.56	-22.76	-623.48	3.60	0.38	0.83
12/22/2015	5.32	147.36	-26.70	-610.68	79.88	-14.02	-167.55	1.54	0.71	0.57
12/28/2015	0.58	15.82	-26.28	-1.11	12.07	-19.80	-0.20	0.29	0.50	1.00
03/20/2016	7.16	113.23	-14.81	-737.49	54.06	-6.55	-143.41	0.93	0.87	-1.54
03/25/2016	3.83	1766.21	-460.15	-59368.20	1151.03	-299.53	-25155.12	31.33	-7.18	-13.45
04/23/2016	1.49	81.68	-53.82	-69.17	50.98	-33.22	-25.73	1.05	0.30	1.00
04/24/2016	2.69	563.90	-208.63	-4491.55	359.77	-132.74	-1817.69	8.36	-2.11	0.54
10/17/2016	81.26	605.75	-6.45	-54.83	334.14	-3.11	-11.98	6.43	0.92	-0.14
10/18/2016	6.35	428.52	-66.48	-8022.76	267.64	-41.15	-3072.60	6.60	-0.04	1.00

SY Obs: Produção sedimentos observado; SYE1: Produção sedimentos simulado da Eq. 1; SYE3: Produção sedimentos simulado da Eq. 3; SYE2: Produção sedimentos simulado da Eq. 2.

As equações de desagregação de solo do LISEM pelo escoamento e sua formulação matemática foram inicialmente desenvolvidas sob parcelas laboratoriais e experimentais usando materiais uniformes e não coesos facilmente transportáveis (Govers, 1992, 1990). O desagregação do solo é essencialmente um processo distinto do processo de transporte, embora ambos sejam interdependentes pela teoria TC. No entanto, o TC calculado pode indicar altos níveis de desagregação que o modelo considera como possível ocorrer, independentemente das condições de erodibilidade do solo, o que pode causar maior desagregação do que realmente ocorre em solos mais coesos. Os testes iniciais com dados em condições de campo para gerar a equação de eficiência original para o modelo, foram realizados sob condições de eventos de menor intensidade pluviométrica, simulações em encostas com inclinação suave e maior erosão dos solos (De Roo et al., 1996a, 1996b; De Roo e Offermans, 1995; Govers, 1990; Hessel, 2002b), muito menos coesos em relação àqueles que desejamos calibrar neste estudo. Além disso, na versão testada, era incapaz de considerar o possível esgotamento das fontes de sedimentos durante os eventos. Essa limitação pode explicar a melhor resposta do modelo a solos mais profundos e de baixa coesão em relação aos solos rasos e mais coesos. Isso poderia ser uma explicação de por que as equações definidas para solos arenosos fornecem uma superestimativa da desagregação, e conseqüentemente da produção de sedimentos, quando aplicados em solos de argila, onde em termos físicos, a desagregação real é limitada pela maior coesão do solo. A equação de eficiência tem a função de ajustar o nível de desagregação nas células refletindo o comportamento médio da erosão do solo e a função matemática inserida nesta equação modifica o padrão de erosão de acordo com a coesão do solo. Solos de argila, devido à sua constituição física e propriedades químicas apresentam maior estabilidade agregada do que em solos arenosos. Esta propriedade do solo apresenta alterações devido à umidade do solo que atua em forças de atração entre as partículas do solo, promovendo a coesão ou dispersão. Devido a essas variáveis, os níveis de desagregação dependem das características coesivas das partículas do solo dependentes das condições de umidade do solo, que por sua vez apresentam caracterização difícil durante um evento pela modelagem. Portanto, os

valores de coesão estão sujeitos a grandes incertezas à medida que a umidade do solo muda dentro do amplo espectro de condições que ocorre dentro de um único evento e entre diferentes eventos. Além disso, outra variável importante é a diversidade de condições de disponibilidade de fontes de sedimentos que podem mudar rapidamente inter e intra eventos. Portanto, o uso de uma equação única de eficiência de desagregação como representante de diferentes solos de uma bacia é uma generalização da resposta dos solos em termos de comportamento de desagregação. Podemos ver que é grande a variação em SY em sua relação com o volume de descarga total nos eventos. Diante desse complexo sistema, o LISEM utiliza o fator de eficiência para controlar o desempenho do processo de desagregação. Atuar somente sobre a qualidade dos parâmetros de entrada com o uso de uma só equação de eficiência pode ser insuficiente para calibrar alguns eventos que apontaram uma superestimativa da SY (de Barros et al., 2014; Rodrigues et al., 2014; Starkloff e Stolte, 2014). Neste estudo, foram testadas diferentes estruturas matemáticas da equação de eficiência de desagregação para simulação de SY, com a premissa de manter valores de coesão do solo semelhantes aos obtidos medindo em condições de campo pelo método Torvane. O PBIAS obtido na primeira rodada de simulações com eq. E1, resultou em desvios percentuais negativos extremamente elevados, que representam uma superestimativa do SY nas simulações, considerados inadequados. Estes baixo desempenho com a eq. E1 são relatados em outros estudos com o LISEM usando a mesma equação que apontam para dificuldade em simular SY, mesmo com uma boa caracterização da bacia, mas ajustando valores de coesão do solo necessariamente acima dos valores medidos (Barros, 2012; Dalbianco, 2013b; de Barros et al., 2014). Utilizando a eq. E3 (do modelo MMF) houve também uma superestimativa do SY para os valores de coesão aplicada, mas com menor magnitude do que com a eq. E1, com uma redução entre 52% a 28% na superestimativa SY com o uso desta eq. E2. Comparando as funções matemáticas das três equações disponíveis, para as mesmas condições de escoamento na simulação de evento, os mesmos valores de coesão do solo aplicados e considerando as mesmas condições de limitação discutidas anteriormente, a eq. E2 em valores de coesão acima de sete kPa já é muito restritiva, sendo um multiplicador que reduz consideravelmente o nível de desagregação. A eq. E1 é cerca de 100 vezes menos restritiva que a eq. E2. Por fim, utilizando-se o E2 com os valores iniciais de coesão do solo propostos como medidos no campo, obtivemos uma melhor equalização da SY dos eventos entre simulados e observados. Depois, no ajuste fino da coesão do solo, os resultados apontam para um desempenho de estimativa muito bom do modelo com E2. Esses resultados apontam para uma melhora nos valores da NSE alcançados em relação aos obtidos por (Grum et al., 2017) e diminuíram a superestimativa do SY pelo modelo. Os ajustes residuais dos valores de coesão ocorreram assumindo a incerteza das leituras da variável no campo e o controle final responsável pelo ajuste SY (Figura 4).

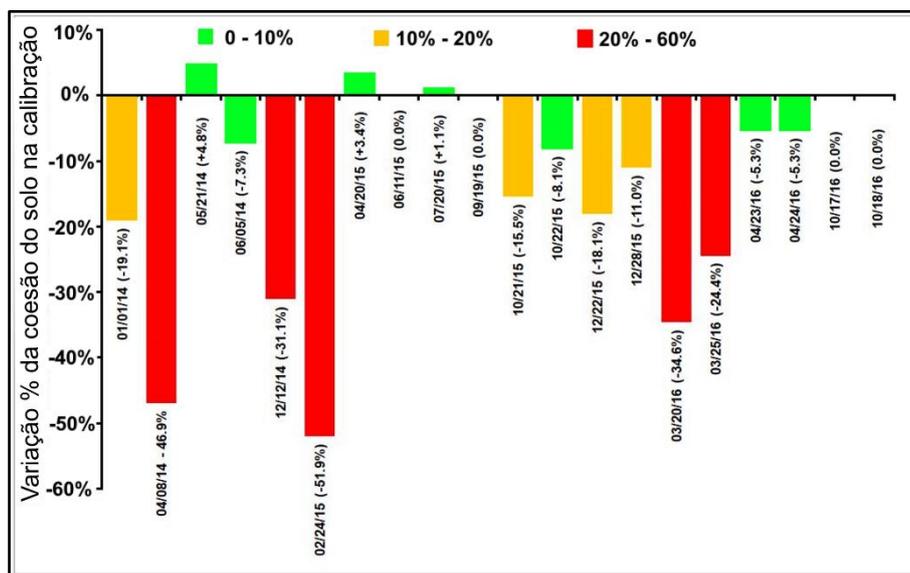


Figura 4 - Ajustes finais nos valores de coesão do solo nos eventos simulados.

Esses valores indicam uma capacidade preditiva utilizando a eq. E2 considerada muito boa, com ajuste numérico de variação de coesão de até 5% para seis eventos, entre 5% e 10% para três eventos, entre 10% e 20% para quatro eventos entre os vinte testados. Diante o comportamento irregular de alguns eventos, onde o possível exaurimento ou renovação de sedimentos prontamente disponíveis eram particulares ao evento, a ação sobre a coesão foi mais intensa, comprometendo o desempenho geral. Foi o caso dos eventos: 20/03/2016 e 25/03/2016, 23/04/2016 e 24/04/2016, 17/10/2016 e 18/10/2016, devido à proximidade temporal dos eventos espaçados por poucas horas, onde utilizamos valores semelhantes de coesão para o par consecutivo de eventos na hipótese de que as condições ambientais do solo não mudaram em poucas horas. O modelo LISEM, além de sua boa qualidade na simulação do escoamento, agora permite conciliar a representação dos processos erosivos em diferentes contextos de coesão do solo através de equações específicas da eficiência do processo de desagregação pela teoria TC. Isso indica o potencial que o modelo apresenta em sua estrutura matemática de representar os processos de desagregação, transporte e deposição, previamente evidenciados com sucesso para solos menos coesos, e agora também para solos mais coesos. No entanto, será uma melhoria desejável nas habilidades do modelo se pudermos configurar equações específicas de eficiência individualmente para cada tipo de solos presentes na captação.

## CONCLUSÕES

O monitoramento contínuo em uma bacia rural do sul do Brasil, que apresentam solos coesivos e relevo acentuado, apoiado por instrumentos calibrados e em análises laboratoriais, a caracterização física detalhada para definir os parâmetros de entrada e a adoção de uma rotina estratégica de calibração do modelo, permitiram condições para avaliar o comportamento das diferentes equações de eficiência e seu impacto na estimativa da produção de sedimentos nos eventos. Sobre um conjunto de eventos monitorados com diferentes condições de disponibilidade de sedimentos e submetidos à calibração hidrológica, testamos o desempenho de diferentes equações de eficiência de desagregação na estimativa da produção de sedimentos, mantendo valores de coesão próximos aos medidos no campo. Em um conjunto de 20 eventos pluviométricos simulados, 17 deles apresentaram uma resposta muito boa de produção de sedimentos simulado pelo modelo LISEM, com o uso da equação de eficiência utilizada no modelo EUROSEM, a mais restritiva entre as três equações testadas no controle do processo de desagregação. Em três dos eventos simulados, que mostraram comportamento diferenciado em termos de SY e escoamento observado, houve uma menor eficiência preditiva com todas as equações testadas. A melhoria dos níveis de eficiência preditiva obtidos com esta equação aumenta a aplicabilidade do LISEM como ferramenta para diagnosticar a relação entre o SY e os processos de erosão em escala de bacia, e abre possibilidades para melhor identificar a atuação de cada parâmetro envolvido nos processos de erosão na estimativa de SY monitorada, diminuindo o efeito de equifinalidade dos parâmetros. Entretanto, a dinâmica dos sedimentos depende do comportamento e localização do escoamento superficial e da disponibilidade de fontes de sedimentos prontamente disponíveis para desagregação, sendo que cada situação de manejo pode requerer outras opções de equações.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio institucional e financeiro promovido pela UFSM, CAPES e CNPQ.

## REFERÊNCIAS

- Barros, C.A.P.**, 2012. Comportamento hidrossedimentológico de uma bacia hidrográfica rural utilizando técnicas de monitoramento e modelagem. UNiversidade Federal de Santa Maria.
- Beven, K.**, 2011. Rainfall-runoff modelling: the primer.
- Croke, J., Fryirs, K., Thompson, C.**, 2013. Channel-floodplain connectivity during an extreme flood event: Implications for sediment erosion, deposition, and delivery. *Earth Surf. Process. Landf.* 38, 1444–1456. <https://doi.org/10.1002/esp.3430>
- Cuomo, S., Della Sala, M., Novità, A.**, 2015. Physically based modelling of soil erosion induced by rainfall in small mountain basins. *Geomorphology* 243, 106–115. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.04.019>
- Dalbiano, L.**, 2013. Simulação hidrossedimentológica com o Modelo LISEM em uma pequena bacia hidrográfica rural 91.
- de Barros, C.A.P., Minella, J.P.G., Dalbiano, L., Ramon, R.**, 2014. Description of hydrological and erosion processes determined by applying the LISEM model in a rural catchment in southern Brazil. *J. Soils Sediments* 14, 1298–1310. <https://doi.org/10.1007/s11368-014-0903-7>
- De Roo, A.P.J., Offermans, R.**, 1995. LISEM: a physically-based hydrological and soil erosion model for basin-scale water and sediment management. *Model. Manag. Sustain. Basin-Scale Water Resour. Syst.* 399–407.
- De Roo, A.P.J., Offermans, R.J.E., Cremers, N.H.D.T.**, 1996. LISEM: a single-event, physically based hydrological and soil erosion model for drainage basins. II: sensitivity analysis, validation and application. *Hydrol. Process.* 10, 1119–1126. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(199608\)10:8<1119::AID-HYP416>3.0.CO;2-V](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(199608)10:8<1119::AID-HYP416>3.0.CO;2-V)
- de Vente, J., Poesen, J., Verstraeten, G., Van Rompaey, A., Govers, G.**, 2008. Spatially distributed modelling of soil erosion and sediment yield at regional scales in Spain. *Glob. Planet. Change* 60, 393–415. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.05.002>
- Gomes, N.M., Mello, C.R.D., Silva, A.M.D., Beskow, S.**, 2008. Aplicabilidade do LISEM (Limberg Soil Erosion) para simulação hidrológica tropical. *Rev. Bras. Ciencias Solo* 32, 2483–2492. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000600025>
- Govers, G.**, 1992. Evaluation of transporting capacity formulae for overland flow. *Overl. Flow Hydraul. Eros. Mech.* 243–273 ST – Evaluation of transporting capacity.
- Govers, G.**, 1990. Empirical relationships for the transporting capacity of overland flow.
- Grum, B. et al.**, 2017. Assessing the effect of water harvesting techniques on event-based hydrological responses and sediment yield at a catchment scale in northern Ethiopia using the Limburg Soil Erosion Model (LISEM). *Catena* 159, 20–34. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.07.018>
- Hessel, R.**, 2005. Effects of grid cell size and time step length on simulation results of the Limburg soil erosion model (LISEM). *Hydrol. Process.* 19, 3037–3049. <https://doi.org/10.1002/hyp.5815>
- Hessel, R., Jetten, V.**, 2007. Suitability of transport equations in modelling soil erosion for a small Loess Plateau catchment. *Eng. Geol.* 91, 56–71. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2006.12.013>
- Hong, Y., Bonhomme, C., Bout, B., Van den, Jetten, V., Chebbo, G.**, 2017. Integrating atmospheric deposition, soil erosion and sewer transport models to assess the transfer of traffic-related pollutants in urban areas. *Environ. Model. Softw.* 96, 158–171. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.06.047>
- Hu, W., She, D., Shao, M., Chun, K.P., Si, B.**, 2015. Effects of initial soil water content and saturated hydraulic conductivity variability on small watershed runoff simulation using LISEM. *Hydrol. Sci. J.* 60, 1137–1154. <https://doi.org/10.1080/02626667.2014.903332>
- Jetten, V.**, 2002. Lisem. Database 1–64.
- Jetten, V., Govers, G., Hessel, R.**, 2003. Erosion models: Quality of spatial predictions. *Hydrol. Process.* 17, 887–900. <https://doi.org/10.1002/hyp.1168>
- Jetten, V., van den Bout, B.**, 2017. LISEM Limburg Soil Erosion model v 3.9x: Documentation & User Manual.
- Karsenberg, D., Schmitz, O., Salamon, P., de Jong, K., Bierkens, M.F.P.**, 2010. A software framework for construction of process-based stochastic spatio-temporal models and data assimilation. *Environ. Model. Softw.* 25, 489–502. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2009.10.004>
- Knapen, A., Poesen, J., Govers, G., Gyssels, G., Nachtergaele, J.**, 2007. Resistance of soils to concentrated flow erosion: A review. *Earth-Sci. Rev.* 80, 75–109. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2006.08.001>
- Lenhart, T., Rompaey, A. Van, Steegen, A., Fohrer, N., Frede, H., Govers, G.**, 2005. Considering spatial distribution and deposition of sediment in lumped and semi-distributed models 794, 785–794. <https://doi.org/10.1002/hyp.5616>

- Lin, K., Zhang, Q., Chen, X.**, 2010. An evaluation of impacts of DEM resolution and parameter correlation on TOPMODEL modeling uncertainty. *J. Hydrol.* 394, 370–383. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.09.012>
- López-Vicente, M., Poesen, J., Navas, A., Gaspar, L.**, 2013. Predicting runoff and sediment connectivity and soil erosion by water for different land use scenarios in the Spanish Pre-Pyrenees. *Catena* 102, 62–73. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2011.01.001>
- Lyne, V., Hollick, M.**, 1979. Stochastic time-variable rainfall-runoff modelling, in: Institute of Engineers Australia National Conference. Institute of Engineers Australia Barton, Australia, pp. 89–93.
- Merten, G.H., Capel, P.D., Minella, J.P.G.**, 2014. Effects of suspended sediment concentration and grain size on three optical turbidity sensors. *J. Soils Sediments* 14, 1235–1241. <https://doi.org/10.1007/s11368-013-0813-0>
- Minella, J.P.G., Merten, G.H., Reichert, J.M., Dos Santos, D.R.**, 2007. Identificação e implicações para a conservação do solo das fontes de sedimentos em bacias hidrográficas. *Rev. Bras. Cienc. Solo* 31, 1637–1648. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832007000600039>
- Minella, J.P.G., Walling, D.E., Merten, G.H.**, 2014. Establishing a sediment budget for a small agricultural catchment in southern Brazil, to support the development of effective sediment management strategies. *J. Hydrol.* 519, 2189–2201. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.10.013>
- Morgan, R.P.C.**, 2001. A simple approach to soil loss prediction: a revised Morgan–Morgan–Finney model. *CATENA* 44, 305–322. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(00\)00171-5](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(00)00171-5)
- Morgan, R.P.C. et al.**, 1998. The European soil erosion model (EUROSEM): documentation and user guide. *Earth Surf. Process. Landf.* 3, 1–88. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9837\(199806\)23](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(199806)23)
- Nash, J.E., Sutcliffe, J.**, 1970. River flow forecasting through conceptual models part I: a discussion of principles. *J. Hydrol.* 282–290.
- Nathan, R.J., McMahon, T.A.**, 1990. Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses. *Water Resour. Res.* 26, 1465–1473.
- Pandey, A., Himanshu, S.K., Mishra, S.K., Singh, V.P.**, 2016. Physically based soil erosion and sediment yield models revisited. *Catena* 147, 595–620. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.08.002>
- Pechenick, A. et al.**, 2014. A multi-scale approach to assess the hydrological connectivity of road and stream networks. *Prep 1549*, 1538–1549. <https://doi.org/10.1002/esp.3611>
- RAUWS, G., COVERS, G.**, 1988. Hydraulic and soil mechanical aspects of rill generation on agricultural soils. *J. Soil Sci.* 39, 111–124. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1988.tb01199.x>
- Robinet, J. et al.**, 2018. Spatial variability of soil water content and soil electrical conductivity across scales derived from Electromagnetic Induction and Time Domain Reflectometry. *Geoderma* 314, 160–174. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.10.045>
- Rodrigues, M.F. et al.**, 2014. Hydrosedimentology of nested subtropical watersheds with native and eucalyptus forests. *J. Soils Sediments* 14, 1311–1324. <https://doi.org/10.1007/s11368-014-0885-5>
- Shreve, E.A., Downs, A.C.**, 2005. Quality-Assurance Plan for the Analysis of Fluvial Sediment by the U.S. Geological Survey Kentucky Water Science Center Sediment Laboratory 28 p.
- Sommerlot, A.R., Nejadhashemi, A.P., Woznicki, S.A., Giri, S., Prohaska, M.D.**, 2013. Evaluating the capabilities of watershed-scale models in estimating sediment yield at field-scale. *J. Environ. Manage.* 127, 228–236. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.05.018>
- Starkloff, T., Stolte, J.**, 2014. Applied comparison of the erosion risk models EROSION 3D and LISEM for a small catchment in Norway. *Catena* 118, 154–167. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.02.004>
- Starkloff, T., Stolte, J., Hessel, R., Ritsema, C., Jetten, V.**, 2018. Integrated, spatial distributed modelling of surface runoff and soil erosion during winter and spring. *Catena* 166, 147–157. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.04.001>
- Van Oost, K. et al.**, 2005. Spatially distributed data for erosion model calibration and validation: The Ganspoel and Kinderveld datasets. *Catena* 61, 105–121. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2005.03.001>
- Wirtz, S., Seeger, M., Ries, J.B.**, 2012. Field experiments for understanding and quantification of rill erosion processes. *Catena* 91, 21–34. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2010.12.002>
- Zhang, F.B., Wang, Z.L., Yang, M.Y.**, 2014. Validating and improving interrill erosion equations. *PLoS ONE* 9. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0088275>
- Zhang, J., Zhang, Y., Song, J., Cheng, L.**, 2017. Evaluating relative merits of four baseflow separation methods in Eastern Australia. *J. Hydrol.* 549, 252–263. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.04.004>
- Zi, T., Kumar, M., Kiely, G., Lewis, C., Albertson, J.**, 2016. Simulating the spatio-temporal dynamics of soil erosion, deposition, and yield using a coupled sediment dynamics and 3D distributed hydrologic model. *Environ. Model. Softw.* 83, 310–325. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.06.004>