

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

Alexandre Augusto Schlesner

**MODELAGEM DA PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS EM BACIA
HIDROGRÁFICA RURAL SOB DIFERENTES EQUAÇÕES DE
EFICIÊNCIA DE DESAGREGAÇÃO DO MODELO EROSIVO LISEM**

Santa Maria, RS
2017

PPGCS/UFSM, RS

SCHLESNER Alexandre A. Mestre 2017

Alexandre Augusto Schlesner

**MODELAGEM DA PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS EM BACIA
HIDROGRÁFICA RURAL SOB DIFERENTES EQUAÇÕES DE
EFICIÊNCIA DE DESAGREGAÇÃO DO MODELO EROSIVO LISEM**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Área de Concentração Biodinâmica e Manejo do Solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM/RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Ciência do Solo**.

Orientador: Prof. Dr. Jean Paolo Gomes Minella

Santa Maria, RS
2017

Schlesner, Alexandre Augusto
MODELAGEM DA PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS EM BACIA
HIDROGRÁFICA RURAL SOB DIFERENTES EQUAÇÕES DE EFICIÊNCIA
DE DESAGREGAÇÃO DO MODELO EROSIVO LISEM / Alexandre
Augusto Schlesner.- 2017.
80 p.; 30 cm

Orientador: Jean P. G. Minella
Coorientadores: Gustavo H. Merten, Paulo I. Gubiani
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós
Graduação em Ciência do Solo, RS, 2017

1. Erosão hídrica do solo 2. Equações de desagregação
pelo escoamento superficial 3. Modelagem da produção de
sedimentos 4. LISEM I. Minella, Jean P. G. II. Merten,
Gustavo H. III. Gubiani. Paulo I. IV. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

© 2017

Todos os direitos autorais reservados a Alexandre Augusto Schlesner. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte. E-mail: alex.geo@mail.ufsm.br

Alexandre Augusto Schlesner

**MODELAGEM DA PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS EM BACIA
HIDROGRÁFICA RURAL SOB DIFERENTES EQUAÇÕES DE
EFICIÊNCIA DE DESAGREGAÇÃO DO MODELO EROSIVO LISEM**

Dissertação apresentada ao curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Área de Concentração Biodinâmica e Manejo do Solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM/RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Ciência do Solo**.

Aprovado em 31 de outubro de 2017.

Jean Paolo Gomes Minella, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Gustavo Henrique Merten

Gustavo Henrique Merten, Dr. (UMN - EUA)

Paulo Ivonir Gubiani

Paulo Ivonir Gubiani, Dr. (UFSM)

Santa Maria, RS
2017

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Criador, que nos presenteou com o Universo, e nos oportunizou viver em irmandade neste maravilhoso e cheio de vida, planeta Terra.

Agradeço à minha esposa Sandra, e aos meus filhos Ricardo e Yuri, aos meus pais Augusto e Helma e meu irmão Paulo, que dedicaram sua vida para minha formação, motivos de orgulho e razão de existir da minha vida. Amo-os eternamente e incondicionalmente.

Agradeço à Universidade Federal de Santa Maria pelo ensino público e gratuito, que com seu aporte estrutural permitiu um ambiente saudável de convívio e evolução no conhecimento. Agradeço aos funcionários, técnicos administrativos e de laboratórios do Departamento de Solos do Centro de Ciências Rurais.

Agradeço ao quadro de funcionários e amigos do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, pela sua inestimável ajuda e orientações.

Agradeço aos colegas e professores do programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, pelos ensinamentos e amizade, e pelo elevado nível de condução das aulas e troca de experiências enriquecedoras ao qual presenciei, corroborando com o alto nível de conhecimentos abordados nos planos de estudos desenvolvidos pelo programa.

Agradeço aos colegas de aula, de pesquisa, de trabalhos a campo, bolsistas de iniciação científica, colegas participantes de projetos, colegas de mestrado, pelos momentos de convívio e superação de dificuldades e avanços obtidos na execução dos projetos conjuntos.

Agradeço aos componentes da banca, pelas inestimáveis contribuições no aprimoramento do meu trabalho, especialmente a figura do professor Dr. Jean P. G. Minella, que além de orientador didático, provou ser sempre uma pessoa com formação intelectual e humana completa, que busca a formação integral do indivíduo profissional a ser entregue ao mercado com amplo espírito crítico frente aos desafios no estabelecimento de uma sociedade justa e consciente ambientalmente. Obrigado pelo apoio, confiança, crédito e investimento.

Agradeço a CAPES pelo apoio financeiro para a formação e pesquisa.

A estes, e a todos os demais amigos e pessoas importantes na minha vida, meu muito obrigado.

Hydrology is also, however, one of the inexact sciences, and given the limitations of what we can know about subsurface water pathways, it is likely to remain so.

(Keith Beven)

RESUMO

MODELAGEM DA PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS EM BACIA HIDROGRÁFICA RURAL SOB DIFERENTES EQUAÇÕES DE EFICIÊNCIA DE DESAGREGAÇÃO DO MODELO EROSIVO LISEM

AUTOR: Alexandre Augusto Schlesner
ORIENTADOR: Jean Paolo Gomes Minella

O modelo preditivo de erosão Limburg Soil Erosion Model (LISEM), é uma opção de ferramenta de diagnóstico e planejamento ambiental que por intermédio da simulação dos processos de desagregação, transporte e deposição de sedimentos proporcionados pelo escoamento superficial, calcula a erosão e a produção de sedimentos (PS) em bacias hidrográficas em escala de eventos. Atualmente o modelo apresenta opções de ajuste do processo de desagregação através do uso de coeficientes de eficiência na forma de equações que atuam como redutores da desagregação proporcionados pela equação principal de desagregação do modelo, que obedece ao princípio da capacidade de transporte pela potência do escoamento adaptado por Govers (1990). Em simulações para bacias com solos de características coesivas e relevos acidentados, estes coeficientes podem ser limitantes para a boa estimativa da PS na modelagem da erosão. Nesse trabalho testamos diferentes equações de eficiência de desagregação pelo fluxo em um conjunto de 20 eventos sobre uma pequena bacia hidrográfica rural intensivamente monitorada, caracterizada por solos rasos e coesivos, relevo acentuado e intensa atividade agrícola. Das três equações testadas, a que é utilizada no modelo EUROSEM (MORGAN et al., 1998) representada por $y = 0,79 * \exp(-0,85 * COH)$ simulou satisfatoriamente a PS para 17 dos 20 eventos simulados, em relação à originalmente usada no modelo LISEM que foi desenvolvida para materiais não coesivos, e também em relação à utilizada no modelo MMF (MORGAN et al., 1984), mantendo durante a calibração os valores de coesão do solo mensurados a campo. Para três eventos simulados o ajuste não foi satisfatório devido às características particulares da PS destes eventos, que não seguem a lógica de previsão do processo erosivo proposta pelo modelo. Assim, a disponibilidade de melhores equações para representar as condições da desagregação para solos coesivos abrem novas perspectivas para o uso do modelo em estudos dos processos erosivos em escala de bacia, e da estimativa da PS como reflexo das práticas de manejo conservacionistas adotadas nas encostas.

Palavras-chave: Erosão hídrica. Desagregação do solo. Produção de sedimentos. LISEM.

ABSTRACT

SEDIMENT YIELD MODELLING IN RURAL WATERSHED UNDER DIFFERENT EROSION EFFICIENCY EQUATIONS OF THE MODEL LISEM

**AUTHOR: ALEXANDRE AUGUSTO SCHLESNER
ADVISOR: JEAN PAOLO GOMES MINELLA**

The Limburg Soil Erosion Model (LISEM) erosion prediction model is an environmental planning and diagnostic tool that, through the simulation of the processes of sediment detachment, transport and deposition provided by runoff, calculates erosion and sediment yield (SY) in watersheds on an event scale. Currently the model presents options for adjusting the detachment process through the use of efficiency coefficients in the form of equations that act as reducers of the detachment level provided by the main disaggregation equation of the model, which obeys the principle of the capacity of transport by the power of the flow adapted by Govers (1990). In simulations for catchments with cohesive soils and rough reliefs, these coefficients may be limiting for the good estimation of SY in erosion modeling. In this work, we tested different efficiency equations by the water flow in a set of 20 events on a small, intensively monitored rural catchment, characterized by shallow and cohesive soils, marked relief and intense agricultural activity. From the three equations tested, one which is used in the EUROSEM model (Morgan et al., 1998) represented by $y = 0.79 * \exp(-0.85 * COH)$ satisfactorily simulated SY for 17 of the 20 rainfall-runoff events, compared to the one originally used in the LISEM model that was developed for non-cohesive materials, and also in relation to that used in the MMF model (Morgan et al., 1984), maintaining during the calibration the soil cohesion values measured in the field. For three simulated events the adjustment was not satisfactory due to the particular characteristics of the SY of these events, which do not follow the predictive logic of the erosive process proposed by the model. Thus, the availability of better equations to represent the conditions of the disaggregation for cohesive soils opens up new perspectives for the use of the model in studies of the erosive processes in catchment scale, and the estimation of the SY as a reflection of the conservation management practices adopted in the slopes.

Keywords: Water erosion. Soil detachment. Sediment yield. LISEM.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Visão metodológica de modelagem (Fonte: Elaborado pelo autor).....	24
Figura 2 - Fluxograma de processos simulados pelo LISEM.	33
Figura 3 - Localização da bacia hidrográfica de Arvorezinha.	43
Figura 4 - Precipitação mensal incidente sobre a bacia entre 2010 e 2016.	43
Figura 5 - Mapa de relevo e de solos	44
Figura 6 - Mapas de uso	45
Figura 7 - Relação entre precipitação e descarga total anual sobre a bacia.....	53
Figura 8 - Relação entre descarga líquida anual e produção de sedimentos específica na bacia.....	53
Figura 9 - Eventos selecionados para modelagem	54
Figura 10 - Coeficiente Y em função da coesão do solo segundo as equações de eficiência de desagregação.....	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores de referência de parâmetros de cobertura do solo	46
Tabela 2 - Características dos eventos e resultados da separação do escoamento segundo o filtro.	49
Tabela 3 - Resultados do procedimento de calibração do volume de escoamento superficial dos eventos.	57
Tabela 4 - Resultados da produção de sedimentos obtida com valores padrões de referência para coesão do solo.	62
Tabela 5 - Valores de coesão do solo ajustados e resultados de eficiência das simulações para a equação 2 (Baseada no EUROSEM).	66

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	PROBLEMA.....	12
1.2	HIPÓTESE.....	14
1.3	OBJETIVO GERAL.....	14
1.4	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	EROSÃO HÍDRICA.....	15
2.2	MONITORAMENTO DE BACIAS HIDROGRÁFICAS PARA A MODELAGEM DE BASE FÍSICA E DISTRIBUÍDA.....	21
2.3	MODELAGEM DOS PROCESSOS EROSIVOS EM BACIAS HIDROGRÁFICAS.....	24
2.4	MODELO LISEM COMO FERRAMENTA DE ESTUDOS EROSIVOS	26
2.5	EVOLUÇÃO DA MODELAGEM DE BACIAS COM LISEM.....	28
2.6	BASE CONCEITUAL DO MODELO LISEM E PRINCIPAIS PROCESSOS EROSIVOS OPERADOS.....	31
2.6.1	Desagregação pelo impacto da gota da chuva no solo.	33
2.6.2	Roteamento do escoamento superficial.....	35
2.6.3	Equações de desagregação pelo escoamento superficial do LISEM	37
3	MATERIAL E MÉTODOS	42
3.1	CARACTERIZAÇÃO FISIAGRÁFICA DA BACIA	42
3.2	DEFINIÇÃO DE PARÂMETROS DE ENTRADA NO MODELO.....	45
3.3	MONITORAMENTO HIDROLÓGICO E SELEÇÃO DOS EVENTOS	46
3.4	CALIBRAÇÃO DOS EVENTOS.....	48
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
4.1	CARACTERÍSTICAS DOS EVENTOS	52
4.2	CALIBRAÇÃO DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL.....	55
4.3	CONSIDERAÇÕES SOBRE A DINÂMICA DA PS NA BACIA.....	60
5	CONCLUSÕES	67
	REFERÊNCIAS	68
	ANEXO A	76
	ANEXO B	78

1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas em nível global têm preocupado os pesquisadores e a sociedade, pois elas remetem a um quadro de alterações da temperatura atmosférica e dos oceanos, que provocam alterações do regime de chuvas, incluindo precipitações intensas e também estiagens cada vez mais freqüentes. A incidência cada vez maior de eventos extremos de chuvas associadas com a ação da acentuada declividade, baixa rugosidade da superfície, manejo deficiente da cobertura do solo e a falta de adoção de práticas conservacionistas com vistas ao controle do excesso de escoamento, aceleram o processo natural da erosão em áreas agrícolas. Condutas de manejo que levem em consideração maximizar a sustentabilidade produtiva das lavouras, devem também considerar práticas de manejo conservacionistas para maximizar a infiltração de água no solo, controlar o excesso de escoamento de água na superfície e diminuir a exposição do solo ao impacto da gota de chuva, como ações importantes para garantir a sustentabilidade do sistema agrícola e do meio ambiente em longo prazo.

Os estudos desenvolvidos em escala de parcelas e encostas auxiliam o processo de avaliação das perdas de água e solo pela erosão, contribuindo para o conhecimento dos processos erosivos frente a diferentes cenários de mudanças climáticas ou de uso e manejo do solo. Mas no contexto de bacias hidrográficas, outras variáveis atuam sobre estes processos, as quais ainda não são totalmente conhecidas para identificar os efeitos cumulativos do processo erosivo que acontecem nesta escala. O estudo para o planejamento e avaliação do impacto da adoção de práticas de conservação do solo, alterações do uso e manejo e cenários de impacto de eventos intensos de precipitação nesta escala, onde predominam a variabilidade espacial do meio físico e a interação entre os diferentes mecanismos envolvidos na erosão hídrica, passa necessariamente por observar o comportamento destas variáveis na unidade de bacias hidrográficas. Para uma avaliação ampla das perdas e seus impactos, são necessários investimentos em estudos dos processos erosivos em diferentes escalas, iniciando pelo perfil de solo, passando por pequenas parcelas e estudos sobre encostas, até o monitoramento de pequenas e grandes bacias hidrográficas, todos com elevados custos operacionais. O desenvolvimento de modelos matemáticos e computacionais que auxiliem no processo de quantificação e qualificação das perdas

de água e solo no contexto de bacias hidrográficas é uma estratégia que tem vários objetivos comuns para o estudo do problema do impacto da erosão para a sustentabilidade produtiva dos sistemas agrícolas. No ambiente de benefícios para a sociedade, obter bons modelos preditivos da erosão como ferramenta de apoio, auxilia na tomada de decisão para o poder público em ações de conservação do solo e prever cenários futuros de impacto de alterações nos sistemas climáticos e de uso e manejo agrícola. No ambiente do conhecimento científico intenciona servir de ferramenta de entendimento dos processos erosivos, servir de meio de desenvolvimento de meios matemáticos de expressar fenômenos físicos, representar e simplificar a complexidade do ambiente em um número reduzido de variáveis, servir de caracterização da variabilidade espacial do meio e servir também de ferramenta de estudo da conexão dos processos erosivos entre as diferentes escalas de avaliação.

Mas, na escala de bacia hidrográfica, ainda persiste a fraca habilidade que temos em detalhadamente representar os fenômenos da natureza em modelos matemáticos preditivos de erosão. Embora o monitoramento esteja concentrado predominantemente na escala de grandes rios, ainda mensuramos e conhecemos pouco sobre a dinâmica ambiental na escala de pequenas e médias bacias hidrográficas, incluindo bacias de cabeceiras, sendo que a representação da complexidade física e dos processos erosivos em e entre estas escalas representa um grande desafio para a modelagem da produção de sedimentos, uma variável importante a ser quantificada em bacias no estudo da erosão.

Uma destas ferramentas de modelagem no contexto de bacia hidrográfica é o modelo de base física e distribuído LISEM, Limburg Soil Erosion Model (DE ROO; WESSELING; RITSEMA, 1996a), com foco direcionado aos processos físicos envolvidos no processo erosivo pelo impacto da gota de chuva e pelo escoamento superficial da água. Este modelo, por sua concepção direcionada para a simulação em escala temporal de eventos, o remete a ser uma importante ferramenta de estudo de processos erosivos relacionados com a atividade climática e do efeito do manejo específico das áreas sobre a intensidade do processo erosivo. No entanto, aplicações anteriores com o modelo LISEM para as condições ambientais no sul do Brasil apresentaram boa resposta na simulação hidrológica dos eventos, mas geralmente apontam para uma superestimativa da produção de sedimentos. Isto pode ter origem em diferentes níveis de informação na modelagem, desde a representatividade dos parâmetros de entrada dos processos no modelo, incapacidade das equações em

representar os processos envolvidos, procedimentos de calibração, uso do modelo fora de seu escopo de atuação, entre outros fatores. Parte do modelo LISEM, especialmente o sistema de cálculo da componente erosiva, foi concebido a partir de um conjunto específico de solos e de clima, que divergem dos locais de aplicação do mesmo na modelagem da erosão. Uma suspeita dos pesquisadores para esta superestimativa da PS obtida nas simulações quando aplicado para as algumas condições ambientais, era de que o modelo apresenta restrições em sua base de equações erosivas, que pode alterar o desempenho de suas estimativas quando utilizado para simulações em condições topográficas, de clima e de solos diferentes daqueles para o qual foi originalmente formulado.

Neste trabalho procuramos melhorar a eficiência dos resultados obtidos com a modelagem matemática da erosão de base física e distribuída, utilizando o monitoramento efetivo de variáveis do ambiente na escala específica de pequena bacia hidrográfica, atuando em seu conjunto de equações de desagregação.

1.1 PROBLEMA

O modelo LISEM pode apresentar diferenças significativas nas estimativas da produção de sedimentos (PS) quando aplicado em bacias com características diferentes de coesão dos solos daqueles para o qual foram formulados.

A desagregação pelo escoamento superficial (*flow detachment*) considera a tensão de cisalhamento da água atuando sobre os agregados do solo, ocasionando a desagregação de uma quantidade de sedimentos que é carregada pelo volume de água, junto ao sedimento gerado pelo impacto da gota da chuva (*splash detachment*). Esta massa de sedimentos desagregados evolui na paisagem de forma contínua pelos processos de transporte e deposição, até serem exportados da bacia considerada, quantificada na forma da produção de sedimentos.

O processo da desagregação do solo pelo escoamento superficial no modelo LISEM é regido pela equação de desagregação proposta por Rauws e Govers (1988), que é dado por $det = y * B * \max(0.0, (T-C))$, onde B é o raio hidráulico do fluxo (m); T é a capacidade de transporte pelo fluxo ($\text{Kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$); C é a concentração de sedimentos no fluxo ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$); *det*, a taxa de desagregação ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$). O parâmetro *y* na equação é um coeficiente adimensional de eficiência adicionado na equação geral de desagregação que serve para calibrar matematicamente a sensibilidade da

desagregação pelo escoamento superficial em relação às características de erodibilidade das partículas para os diferentes solos. A resistência que o solo oferece à desagregação pelo fluxo é representada pelo valor de coesão do solo acoplado na estrutura da equação de eficiência y . Dessa forma, solos mais resistentes à desagregação, representados por valores de coesão de solo mais altos, geram fisicamente menor desagregação, efeito que deve ser traduzido matematicamente pela equação de eficiência usada. Originalmente o modelo LISEM até as versões anteriores à 3.95, apresentava apenas uma única opção de equação de eficiência de desagregação pelo fluxo superficial disponível para ser selecionada no programa e atender toda a gama de diferentes características coesivas dos solos: $y = \min(1.0, 1/(0.89 + 0.56 (co + coveg)))$, onde co é a coesão do solo (KPa) e $coveg$ a coesão adicional das raízes (KPa). Esta equação foi utilizada nos estudos de modelagem anteriores com o LISEM onde se observou a superestimativa da PS em simulações de eventos para as condições de solos de natureza mais coesiva. Para alguns eventos simulados com esta equação, os valores de coesão dos solos mensurados a campo geraram PS acima do observado nos eventos. Assim, era necessário elevar os valores de coesão do solo para patamares fora de seu significado físico real ou mesmo atuar sobre outros parâmetros não diretamente relacionados ao processo de desagregação para atingir um melhor ajuste no processo de calibração dos sedimentos.

Recentemente, com o lançamento de uma nova versão do programa, foram disponibilizadas outras duas opções de equações de eficiência de desagregação para uso no modelo. Estas novas equações de eficiência de desagregação serão avaliadas quanto à sua contribuição como meio de melhorar a capacidade representativa dos processos de desagregação para solos com nossas características regionais. Este trabalho tem o objetivo de comparar o desempenho de três equações de eficiência de desagregação disponíveis pela nova versão do modelo LISEM e seu impacto na produção de sedimentos de um conjunto de eventos simulados e calibrados representativos de uma bacia hidrográfica rural no sul do Brasil.

1.2 HIPÓTESE

O presente estudo fundamenta-se na possibilidade de melhoria dos níveis de simulação da produção de sedimentos pela modelagem utilizando o LISEM para um conjunto de eventos incidentes sobre uma bacia onde existem condições de solos coesivos e com forte potência de fluxo do escoamento, através do uso de formulações matemáticas de cálculo do coeficiente de eficiência de desagregação aplicado à fórmula geral de desagregação do modelo já existentes, porém ainda não testadas para estas condições. Desta forma, este trabalho se configura em um trabalho de caracterização e estudo de caso.

1.3 OBJETIVO GERAL

Avaliar a produção de sedimentos gerada pelo modelo LISEM para um conjunto de eventos monitorados utilizando três equações de eficiência de desagregação parametrizadas com valores de coesão representativos dos solos de uma bacia hidrográfica rural.

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Analisar os eventos de precipitação ocorridos sobre a bacia quanto à relação entre a descarga líquida total e a produção de sedimentos e os fatores que afetam esta relação;
- b) Analisar a configuração de equações erosivas do modelo LISEM para simular a produção de sedimentos em bacias hidrográficas;
- c) Entender a importância e eleger a equação de eficiência de desagregação disponível no modelo LISEM que melhor represente a PS observada em um conjunto de eventos calibrados para uma bacia rural com solos coesivos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A modelagem matemática é o estágio mais avançado de análise da erosão em bacias hidrográficas, devendo ser precedido por um conjunto de observações, dados, metodologias, monitoramento ambiental, instrumentação, conhecimento em diferentes áreas das ciências físicas e matemáticas e computacional. A calibração de modelos de erosão está aliada com níveis de incertezas sobre as fontes de informações dos processos e da eficiência dos sistemas matemáticos para representá-los.

Esta pequena revisão bibliográfica busca resgatar os temas considerados importantes para a modelagem de erosão em bacias hidrográficas em base física, orientando o leitor sobre a importância no processo de modelagem de se buscar informações precisas das variáveis ambientais através do monitoramento como forma de diminuir estas incertezas. Na seqüência, ela trata de como os diferentes fatores interferem nos resultados da calibração, servindo de preparação para o objetivo principal do trabalho que é o comparativo de diferentes equações de eficiência da desagregação no modelo LISEM.

2.1 EROSÃO HÍDRICA

A erosão hídrica é um importante agente de degradação dos solos, com impactos físicos, químicos, biológicos e econômicos sobre as áreas de cultivo agrícolas. Anualmente, milhões de toneladas de solo são perdidas em função da condução inadequada dos cultivos sem a preocupação com fins conservacionistas (CHARTIN et al., 2013; GUERRA, et al., 2014). Isto leva a uma condição propícia para perdas de água e solo nas glebas agrícolas (DIDONÉ; MINELLA; MERTEN, 2015; LONDERO, 2015; MERTEN et al., 2015), com impactos locais e regionais em termos produtivos para agricultura e poluidores para o ambiente, e também remotos com a poluição dos mananciais de água que abastecem a população, enchentes e estiagens mais freqüentes nas bacias hidrográficas. Quantificar estas perdas a nível local e regional é um importante subsídio para o desenvolvimento de políticas de conservação do solo e água, onde serve de base para o cálculo do impacto produtivo e econômico da erosão, e para o desenvolvimento e direcionamento de práticas

conservacionistas específicas para o contexto ambiental de cada região (MERTEN; MINELLA, 2013).

Uma das primeiras tentativas de modelagem da erosão utilizando uma abordagem conceitual sobre os processos físicos da erosão foram realizadas pelos pioneiros trabalhos de Meyer e Wischmeier (1969), que definiram a erosão como sendo composto de duas etapas principais: a desagregação e o transporte das partículas de solo. A erosão seria resultado da (a) desagregação do solo pela chuva, (b) desagregação do solo pelo escoamento superficial, (c) transporte do solo pela chuva; e (d) transporte do solo pelo escoamento. Estes conceitos foram empregados no desenvolvimento da Equação Universal de Perdas de Solo (USLE), um modelo matemático que considera a ação de alguns fatores do meio, como a declividade e a erosividade da chuva, na intensidade destes processos. A USLE, que posteriormente evoluiu para o modelo MUSLE (WILLIAMS, 1972) e RUSLE (Renard et al., 1997) é clássico representante de modelos classificados como “caixa cinza”, que são modelos onde se podem entender os processos pelas relações entre sinais de entrada e os sinais de saída do modelo. Este modelo é amplamente usado como ferramenta preditiva de perdas por erosão em nível mundial (CHANDRAMOHAN; VENKATESH; BALCHAND, 2015). No entanto, por ser um modelo empírico e concentrado que essencialmente prevê o processo de desagregação que acontece em escala de parcela homogênea ou de encosta sem considerar a dinâmica dos processos hidráulicos existentes em escalas maiores, sua aplicação na modelagem de bacias hidrográficas apresenta limitações, pois nesta escala atuam consideravelmente outros fatores de controle nos processos de transporte e deposição de sedimentos regidos pelo relevo, variabilidade espacial de solos e de superfície, que não são considerados na escala de estudo e desenvolvimento do modelo.

Segundo Morgan (2005) os processos físicos envolvidos na erosão do solo de natureza hídrica compreendem três principais etapas: desagregação, transporte e deposição. Para Merten (2000) é fundamental para a modelagem matemática destes processos erosivos, entender e determinar como a capacidade do escoamento atua na desagregação e transporte de sedimentos, visto serem de natureza complexa de que pouco se sabe de forma detalhada dos mecanismos envolvidos no processo erosivo. Ainda segundo o autor, foi na década de 80 que os primeiros modelos de base física surgiram, sendo o WEPP (Water Erosion Prediction Project), GUESS (Griffith University Erosion Sedimentation System) e EUROSEM (European Soil Erosion

Model) alguns dos modelos que passaram a incluir em sua estrutura, conhecimentos sobre a mecânica envolvida na erosão, separando os processos de erosão em entre sulcos, erosão pelo impacto das gotas de chuva, e em sulcos causada pelo escoamento superficial. Ele investigou como a carga de sedimentos transportada afetava as taxas de desagregação de solo e deposição de sedimentos, concluindo que o aumento da adição de sedimentos resultou em menores taxas de desagregação e maiores taxas de deposição, validando a base conceitual de alguns modelos de transporte, como o de Foster & Meyer e Hairsine & Rose.

Os fatores ligados à precipitação, interceptação pela cobertura vegetal, infiltração de água no solo, declividade do terreno, comprimento e conformação das encostas e vertentes, características de conectividade entre rede de drenagem com canais e do canal principal atuam sobre o processo de formação do escoamento superficial.

A primeira componente do processo erosivo importante de ser determinado em bacias hidrográficas é a precipitação incidente sobre o solo. Suas características de volume, intensidade, duração, distribuição e frequência influenciam fortemente o comportamento erosivo de bacias hidrográficas. Tamanho da gota (massa) e velocidade de queda confere energia mecânica de impacto pela gota com potencial de desagregar e transportar as partículas na superfície do solo e causar o selamento superficial em alguns tipos de solo. Parte da capacidade de absorver a energia do impacto da gota de chuva sobre a superfície do solo é regida pelas características de sua cobertura vegetal, que com sua arquitetura de folhas intercepta a gota, atenua a energia de impacto reduzindo sua velocidade, armazenando volume de água e evitando o seu contato direto com a superfície do solo nu.

Em função das características de solo que influenciam na sua capacidade de infiltração de água, a intensidade e o volume de precipitação são co-responsáveis pela geração do escoamento superficial, quando uma intensidade muito elevada de chuva excede a capacidade de infiltração em eventos de maior magnitude. As características do regime de chuvas no local são, portanto, fundamentais de serem identificadas e mensuradas para a modelagem do processo erosivo de natureza hídrica, tanto pelo impacto direto, como também são indissociáveis dos processos de erosão pelo escoamento superficial, que desagregam e transportam partículas de solo de ambas as componentes.

Nearing et al. (2005) avaliou a resposta de modelos erosivos frente a precipitação e cobertura do solo, discutindo sobre as relações da ação climática e dos usos do solo com a produção de sedimentos. Constatou que a dinâmica da intensidade da precipitação teve maior influência do que da cobertura vegetal para a geração do escoamento e exportação de sedimentos. A interação entre usos e manejo na superfície e a variabilidade espacial das características das chuvas é importante na modelagem, entretanto, a obtenção de dados precisos destas variáveis é difícil em termos práticos, devido a falta de informação precisa da distribuição espacial da chuva.

A energia cinética da chuva é utilizada como parâmetro de entrada em modelos físicos através de estudos pontuais realizados para determinar as equações que identificam a energia da chuva a partir, por exemplo, de sua intensidade, e que podem ser consideradas representativas para uma certa região quando não se tem dados locais. Ramon et al. (2017) determinou através de dados obtidos de um disdrômetro instalado sobre a bacia, a equação de energia cinética válida a partir do ano de 2017.

A cobertura vegetal atua sobre diversos processos envolvidos na erosão hídrica. Tanto intercepta, protege contra o impacto direto da gota da chuva, como atua no processo de ciclagem da água no sistema, favorecendo processos de evaporação, retenção, absorção e armazenamento da água. Uma vez atingida a capacidade máxima de taxa de infiltração de água no perfil do solo, com chuvas intensas passa a ocorrer a formação do escoamento superficial, onde as características da superfície do solo como a rugosidade devido à depressões no solo, a presença de resíduos vegetais sobre a superfície do solo e outras estruturas que condicionam o trajeto da água sobre as encostas passam a oferecer resistência ao escoamento da água, diminuindo sua velocidade e favorecendo a sua dispersão e retenção no terreno por maiores períodos de tempo, favorecendo a infiltração. Evrard et al. (2010) realizaram importante estudo sobre as características da cobertura dos solos e sua influência nos processos hidrológicos e erosivos para a formulação do modelo STREAM, onde identificaram grandes variações nos níveis de erosão anuais em função das características erosivas da chuva e da cobertura do solo entre os eventos.

Boer e Puigdefábregas (2005) realizaram trabalho de investigação sobre a atuação da vegetação sobre a resposta hidrológica utilizando o modelo LISEM. O nível de resíduos culturais sobre o solo tais como caules de plantas cultivadas, palhas e

resíduos de safras anteriores mantidos sobre o solo, aumentam a rugosidade e armazenamento de água que afeta a velocidade de escoamento, sendo representada pelo valor de n na equação de cálculo da velocidade do escoamento de Manning. Conjuntamente com os aspectos de declividade e raio hidráulico do escoamento, o valor de n como representante da rugosidade oferecida pela cobertura afeta a velocidade do escoamento e conseqüentemente o poder de desagregação oferecido pelo escoamento laminar e concentrado. Como são difíceis as determinações deste parâmetro em condições de encostas em bacias hidrográficas, pouco se sabe sobre a real atuação destes níveis de rugosidade pela cobertura numa condição heterogênea de usos sobre uma bacia, sendo utilizados dados tabelados obtidos em experimentos controlados em parcelas como forma de representá-lo. A arbitragem dos valores de n para cálculo da velocidade do escoamento por valores tabelados gera incertezas sobre a intensidade do processo erosivo resultante, exigindo do modelador cuidados no processo de calibração dos eventos. Estas hipóteses foram também levantadas pelos autores, onde concluíram que obstáculos de granulometria ou padrão geométrico maior afetam mais o padrão de escoamento do que partículas finas. Ao contrário, o transporte de sedimentos foi mais afetado por estruturas menores do que as maiores, considerando aspectos de vegetação.

Além disso Govers, Giménez e Van Oost (2007) citam que através de uma análise de dados coletados empiricamente sobre a hidráulica de encostas, de forma conclusiva mostra que a equação empírica de Manning não é válida para o fluxo concentrado, forma de escoamento predominante nas encostas para algumas bacias, portanto, não deveria ser usada em modelos de erosão. Uma relação de lei de potência empírica relacionando velocidade e descarga é muito melhor de acordo com dados experimentais disponíveis, tanto para solos com e sem fragmentos de rocha. Na ausência de resíduos de vegetação ou outros elementos macroscópicos, imóveis, como fragmentos de rocha, tensão de cisalhamento total e força de cisalhamento unitário podem ser usados para prever o descolamento do solo, onde o uso deste parâmetro tem a vantagem de que nenhuma informação sobre a geometria de sulcos é necessária.

Outra atuação da vegetação nos processos erosivos se faz pelas raízes das plantas, favorecendo a estruturação do solo e a geração de macro poros, melhorando as condições de infiltração de água no perfil. Também oferecem aumento da coesão pelo volume do sistema radicular no solo, especialmente de gramíneas. Associações

entre raízes de plantas e fungos formando micorrizas também têm papel importante na retenção de água no solo (AUGÉ et al., 2001).

A espacialização das propriedades físicas do solo no modelo é fundamental para o processamento da geração e da evolução do escoamento superficial ao longo da paisagem, que associado com o mapa de relevo e declividade, propicia a representação da dinâmica do escoamento superficial sobre uma bacia hidrográfica e a identificação dos locais de acúmulo de volume e de aceleração da velocidade do escoamento, potencial gerador de desagregação de solo pelo fluxo concentrado.

A declividade das encostas atua como fator de aceleração da velocidade da água do escoamento superficial. Representar com precisão os valores de declividade é também um fator importante para o cálculo matemático da velocidade de escoamento, componente associado com a potência de escoamento, variável utilizada por modelos físicos como o LISEM para o cálculo dos processos de desagregação do solo pelo escoamento superficial.

Baartman et al. (2013), investigou através da modelagem matemática, a ação da geomorfologia da superfície de encostas em bacias e sua relação com a conectividade de sedimentos. Identificou que existe uma relação não linear entre a precipitação e o transporte de sedimentos por conta de diferentes configurações de formatos do terreno. A forma da superfície, considerando a escala espacial das encostas de uma bacia, apresenta forte influência nos processos de formação de escoamento superficial concentrado e de vertentes. A curvatura longitudinal no sentido do escoamento pode ser convexa, plana ou côncava, ou uma combinação destas três possibilidades. Formas convexas a planas aceleram ou mantêm a velocidade no sentido do escoamento; já formas côncava e plana, tendem a diminuir ou manter a velocidade. A curvatura no sentido horizontal ou do plano, sendo côncava tende a concentrar os fluxos e as convexas tendem a dispersar o fluxo. A ótima representação destas formas é obtida por um modelo digital de terreno de boa qualidade e com adequada resolução espacial.

Estudo de Di Lazzaro (2008) sobre canais e a resposta hidrológica em bacias, comenta que as características dos canais também afetam a PS, pois grande parte dos processos de transporte e deposição, bem como de eventual desagregação nas margens dos canais, afetam e são afetados pela hidráulica do escoamento nos canais. O material de construção, a rugosidade, as dimensões e formato afetam as propriedades do regime de escoamento, como atrito, velocidade, turbulência,

transporte de sedimentos de maiores dimensões e superfície de atrito e pela maior energia do fluxo.

Segundo Walling (2005), as condições da interface entre as encostas e os canais em termos de vegetação, relevo e deposição de sedimentos, afetam a conectividade e facilidade com que os sedimentos chegam ao canal pluvial, sendo um sistema complexo que muitas vezes precisa ser simplificado para ser compatível com a resolução da representação espacial no modelo.

Bracken et al. (2013), avalia aspectos sobre conectividade e sua importância no contexto da modelagem, conclui que o padrão da dinâmica hidrológica da umidade do solo é complexo e que não basta apenas determinar bem a infiltração de água de forma pontual, mas também é importante representar espacialmente os pontos de conexão dos escoamentos na superfície do solo

2.2 MONITORAMENTO DE BACIAS HIDROGRÁFICAS PARA A MODELAGEM DE BASE FÍSICA E DISTRIBUIDA.

Uma das principais limitações dos modelos de base física é a precisa representação da variabilidade espacial das suas características, como porosidade, textura, estrutura, presença de camadas compactadas ou restritivas para a infiltração de água no solo, profundidade, permeabilidade, composição mineralógica. A modelagem em grande escala depende da qualidade de mapeamento dos solos disponível pelas fontes oficiais, sendo que grandes investimentos estão sendo realizados no sentido de obter mapas de melhor qualidade no Brasil (referencia). Para efeitos de modelagem em pequenas bacias com objetivos de calibrar modelos são necessários dados mais precisos sobre as características de solos, obtidos por sondagens em densidade suficientes para a elaboração de um mapa de qualidade razoável. Instrumentação e técnicas para o fim de conhecer o comportamento hidrológico do perfil de solo como o uso de sensores de umidade do solo como a reflectância no domínio do tempo - TDR (NOH et al., 2015; VAN DEN ELSEN et al., 2003), resistência elétrica do solo e indutância eletro magnética (ROBINET et al., 2018) tem contribuído para uma melhor representação física do perfil do solo e de encostas e para a geração de modelos matemáticos de infiltração de água no solo mais avançados (PEREIRA, 2017; SOMAVILLA, 2017).

Para avaliar o desempenho dos resultados de um modelo de predição de erosão, seja de forma distribuída ou na forma concentrada, é imprescindível que se tenha dados observados de qualidade e de longa série contínua das principais variáveis envolvidas, como descarga líquida total, vazão e concentração de sedimentos em suspensão, que permitem integralizar a exportação total das perdas de solo de uma bacia que é a produção de sedimentos. O que acontece na escala de encosta, onde os processos erosivos iniciam-se, é melhor explicado do que os fenômenos em escala de bacia hidrográfica, onde os aspectos de conectividade interferem na propagação da água e dos sedimentos. Conhecer as diferentes escalas dos processos erosivos ali operantes é passo fundamental para a escolha, calibração ou o desenvolvimento de modelos de predição de erosão.

Para o monitoramento da precipitação, a densidade de pontos de observação através de estações meteorológicas no Brasil é muito baixa, sendo que generalizações são utilizadas através de métodos de interpolação como os polígonos de Thiessen. Recentemente dados de sensoriamento remoto estão disponíveis de forma mais efetiva, mas ainda é pouca a confiabilidade destes dados para utilização em escalas menores de bacias hidrográficas. A distribuição da incidência da chuva é ainda um importante desafio e fonte de incertezas na modelagem de base física e distribuída, considerando a sua grande importância no processo de modelagem de erosão quando se pretende expandir a aplicação de um modelo para outras escalas e áreas geográficas (LANGHANS et al., 2014).

A boa representação da declividade do terreno está dependente de sua resolução espacial no eixo horizontal e vertical. Para modelagem de grandes bacias, em função do volume de dados necessários e restrições de processamento, é comum o uso de dados de sensoriamento remoto de cotas de terreno em baixas resoluções horizontais, comumente na ordem de 12.5 m (obtidos do ALOS PALSAR) a 90 m (obtidos do SRTM), com resolução vertical de 1 m. Mapas gerados com estas fontes apresentam valores compatíveis para grandes e médias escalas (acima de 10 km²), mas são precárias para escalas menores onde a resolução vertical e horizontal não permite uma fiel representação do formato das encostas. Para esta escala, levantamentos topográficos considerando alta densidade de pontos de leitura de cotas, como os obtidos por GPS em sistema RTK, ou mesmo imagens compostas obtidas por veículos aéreos não tripulados podem obter modelos de terreno com ótima resolução horizontal e vertical (na casa da dezena de centímetros), excelentes para

representar bacias de menos de um km² com grande detalhamento (LIN; ZHANG; CHEN, 2010).

Modelos de terreno baseados em raster, com células quadradas com alta resolução hoje disponíveis podem representar satisfatoriamente características de relevo como declividade, comprimento de rampa e formato das encostas, podendo inclusive representar alguns acidentes topográficos importantes para a modelagem do escoamento superficial, como estradas, canais, edificações, obras de contenção, barragens, entre outros. Considerada anteriormente uma fonte de incertezas sobre sua ação sobre o cálculo dos processos erosivos, hoje é possível contornar esta situação, obtendo dados confiáveis da representação física do relevo da bacia (ARIZA-VILLAVÉRDE; JIMÉNEZ-HORNERO; GUTIÉRREZ DE RAVÉ, 2015).

O monitoramento de bacias hidrográficas quanto às perdas de solo e água são fundamentais para o desenvolvimento e calibração de modelos matemáticos da erosão, em um primeiro momento com objetivo de melhor representar os processos físicos, para em um segundo momento ser evoluído para um modelo preditivo mais completo que possa ser aplicado sobre bacias não monitoradas. Embora um estudo extensivo sobre a PS de bacias hidrográficas sob diversas condições fosse desejável, isto ainda é pouco fomentado pelo poder público e pela ciência no Brasil, o que limita a geração de modelos preditivos de erosão genuinamente nacionais, desenvolvidos e adaptados para as condições de solo e clima brasileiros.

A avaliação do perfil erosivo de uma bacia hidrográfica é dada pela quantificação da produção de sedimentos (PS), que é a quantia total de massa exportada de sedimentos associada ao escoamento total de eventos que se apresenta no exutório de uma bacia considerada. A PS é o resultado final da expressão da dinâmica dos processos erosivos e de transporte de sedimentos sob influência do relevo e das condições oferecidas pelo uso e manejo sobre a superfície do solo ao longo de seu trajeto até o exutório (CHEN; MA; ZHANG, 2016). Mesmo sendo a PS uma variável de relativamente fácil obtenção através do monitoramento, sendo um reflexo integrado das condições da atuação do relevo e do manejo sobre a bacia, é difícil realizar a engenharia reversa, ou seja, a partir tão somente da PS identificar a origem dos sedimentos e que influência eles sofreram no percurso ao longo do processo de transporte pelo meio natural. Como a PS é afetada pelo relevo e rugosidade do solo, atuando como fatores controladores da energia do escoamento que provocam a desagregação, como o manejo da superfície atenua ou acelera este

processo, e como o solo oferece resistência natural ao processo de desagregação e transporte dos sedimentos, ainda são processos pouco entendidos em escala de bacia. Neste sentido, a modelagem matemática atua como uma ferramenta auxiliar na quantificação das perdas de solo e água e na simulação dos processos erosivos em escala de perfil, encosta e de bacia hidrográfica.

2.3 MODELAGEM DOS PROCESSOS EROSIVOS EM BACIAS HIDROGRÁFICAS

A modelagem de base física e distribuída é um processo de desenvolvimento com caráter interativo e evolucionário contínuo, onde à medida que melhor se conhece e se mensura o ambiente, melhor se alimenta os modelos. Quando um resultado na modelagem não é satisfatório, a habilidade do modelador em investigar sobre quais pontos atuar é crucial para os resultados, considerando as limitações em obter dados extremamente detalhados sobre o meio físico em escala de bacia (Figura 1).

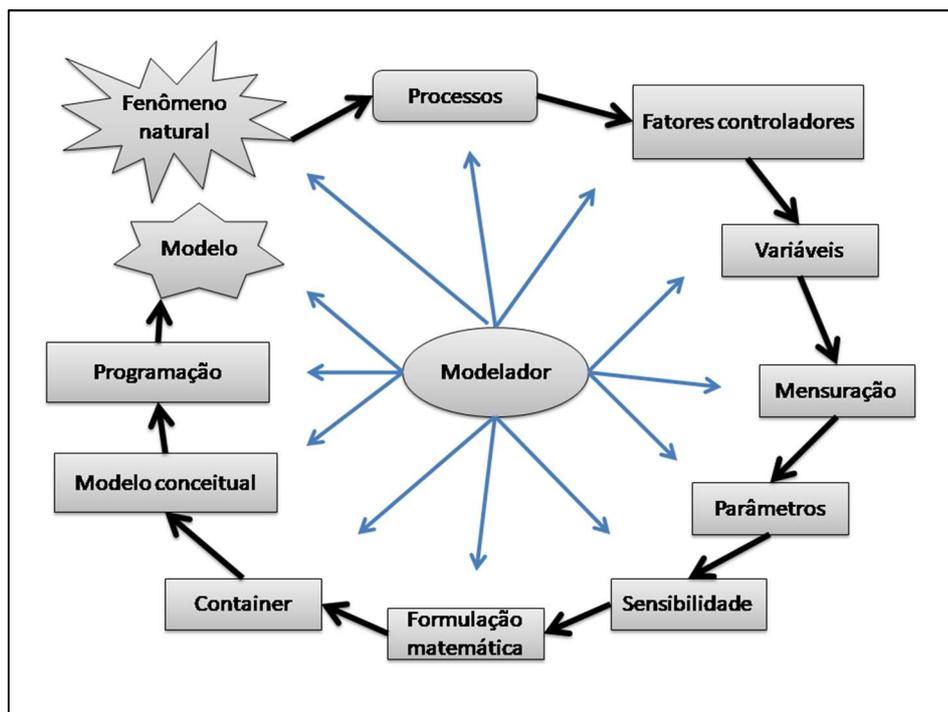


Figura 1 - Visão metodológica de modelagem.

Fonte: Elaborado pelo autor.

São, portanto, múltiplas as frentes em que podemos atuar para obter melhores calibrações e resultados em modelos físicos providos de muita complexidade. Atuar sobre parâmetros de entrada que representem a variabilidade de condições apresentadas nos eventos deve também ser acompanhado pela adequada estrutura

das equações do modelo para se obter níveis de resposta satisfatórios para simular a PS em bacias hidrográficas.

Ao contrário das abordagens empíricas e concentradas, a modelagem da erosão em bacias hidrográficas em base física e distribuída é contemplada através de modelos que reproduzem matematicamente os processos físicos envolvidos na erosão considerando as leis físicas de conservação de massa, energia e velocidade, bem como consideram a variabilidade espacial dos fatores controladores dos processos erosivos. Ela passa em um primeiro momento por um processo de caracterização do meio geomorfológico da bacia e de reproduzir a distribuição espacial dos fatores controladores dos processos erosivos, e em um segundo momento, representa matematicamente o comportamento da dissipação de energia e transporte de massa promovida pelo movimento da água e dos sedimentos sobre este sistema. Modelos de base física e distribuídos com habilidade em simular todas as características dos eventos são também os mais promissores para representar a ação climática da chuva (intensidade e duração) sobre a superfície e representar como o relevo e a cobertura vegetal atuam sobre o escoamento superficial na escala de bacias hidrográficas.

Modelos desta natureza equiparam-se ao tipo “caixa branca”, onde estudos sobre erosão em bacias procuram representar os processos através da simulação de um sistema com entradas, processamento e saídas, onde as entradas consideram a caracterização do evento pluviométrico e parâmetros que traduzam a ação do meio sobre os processos erosivos; um sistema de equações matemáticas que tenham capacidade de representar e calcular os processos erosivos com base nos valores de entrada; e saídas compostas de variáveis que possam ser comparadas com os sistemas reais.

Da mesma forma, a maioria dos modelos utilizados no Brasil para fins de modelagem da erosão são essencialmente empíricos como a RUSLE (Renard, 1997), ou fortemente desenvolvidos ou ligados a bases empíricas como WEEP (OLIVEIRA, 2010) e WATEM/SEDEM (BEZAK et al., 2015; DE VENTE et al., 2013; DIDONÉ; MINELLA; EVRARD, 2017). Modelos físicos puros, ou predominantemente de base física, além de serem em número limitado, são concebidos e preparados a partir das pesquisas realizadas com solos e locais específicos para sua concepção, muitas vezes diferentes daqueles locais de efetiva aplicação em simulações pelos usuários, a exemplo do SWAT (BONUMÁ et al., 2014) e LISEM (DE ROO; OFFERMANS;

CREMERS, 1996). A base de desenvolvimento destes modelos foi obtida através de estudos em parcelas de laboratório com materiais não coesivos, e testados para condições específicas em termos climáticos, de solos, tipos de cultivos locais utilizados em sua concepção. Porém, sendo justamente este o propósito geral de um modelo, o de poder ser aplicado em diferentes configurações ambientais, a representação da variabilidade espacial do meio físico, dos diferentes processos hidrológicos no tempo, os parâmetros representativos de atuação dos fatores controladores no meio e as equações que representam estes processos físicos, formam um conjunto que precisa ser bem planejado, aliando simplicidade de parametrização, equacionamento focado nos processos predominantes, consumo de recursos computacionais, eficiência nos resultados e facilidade de uso por parte dos pesquisadores e usuários (BEVEN, 2008, 2011).

Frente à deficiência de modelos preditivos adaptados para as condições de solos locais, a adoção e calibração de modelos pelos usuários demandam um cuidado especial, tanto no momento de sua seleção como ferramenta em função de suas habilidades e objetivos, como na exigência de avaliar as incertezas obtidas nos resultados associadas ao desafio de adaptar, calibrar, validar e utilizar estes modelos com boa eficiência para as nossas condições específicas. Em *Rainfall Runoff Modelling* (BEVEN, 2011) o autor contextualiza que todos os modelos matemáticos empíricos ou físicos herdam a característica de apresentarem estreita relação com o meio para o qual foram desenvolvidos e calibrados. Assim, segundo esta afirmativa, se estima que para serem adequadamente utilizados para finalidades preditivas ou mesmo de estudo de processos em condições diferentes das utilizadas em sua concepção, é necessário reavaliar a representatividade de seus parâmetros de entrada, de seu equacionamento, de sua metodologia de calibração e de seus limites de resposta, em função das limitações impostas pelo seu equacionamento pré-programado.

2.4 MODELO LISEM COMO FERRAMENTA DE ESTUDOS EROSIVOS

O modelo LISEM foi concebido a partir de um programa de monitoramento de algumas encostas e bacias na região de Limburg na Holanda, por conta de um programa governamental promovido por 14 municipalidades da região e desenvolvido pelas universidades de Utrecht, de Amsterdam e pelo Winand Satring Centre de

Wageningen (DE ROO; OFFERMANS; CREMERS, 1996). O modelo tem como base a experiência no desenvolvimento dos modelos ANSWERS e SWATRE, mas com alterações na descrição dos processos. Os idealizadores apontam como vantagens de uso do modelo compreendem a sua capacidade associada com sistemas de informação geográficos, que permitem manipular as informações espaciais de mapas de uso e de variáveis de solo a fim de estudar cenários e desenvolver práticas conservacionistas (DE ROO; WESSELING; RITSEMA, 1996a). Por ser direcionado para eventos e lidar de forma distribuída com os fatores do meio, qualifica-o para ser usado como ferramenta de estudos erosivos onde se pode avaliar a relação entre a intensidade dos eventos e cenários de uso da terra com as produções de sedimentos e perdas de água. Sua aptidão em apenas simular processos erosivos em superfície, possuindo rotinas simples de cálculo da infiltração de água no solo no perfil, dificulta o processo de calibração dos eventos, uma vez que não possui rotinas de modelagem de água subsuperficial acopladas.

O modelo LISEM foi desenvolvido com foco na possibilidade da caracterização espacial do meio e dos fatores controladores, equacionamento robusto atendendo os princípios físicos de conservação de massa, e com interfaces amigáveis tanto na sua alimentação dos dados quanto na apresentação dos resultados. Também para obter simulações direcionadas para eventos pluviométricos individuais de curta duração, contemplando minutos ou horas. Isto é um diferencial, pois potencialmente permite estudar os processos erosivos em escala de eventos e o impacto da intensidade dos eventos de forma mais detalhada. Sobre esta base inicial bem estruturada de interface de uso, ele apresentou uma constante evolução no tempo, agregando funcionalidades que lhe permitem uma maior amplitude de opções de calibração e de resposta frente à aplicação sobre outros tipos de condições de solo e processos inicialmente abrangidos pela sua estrutura de concepção. Em sua versão mais recente, novas opções de equações de eficiência de desagregação dos solos foram incluídas, que podem aproximar agora os resultados da simulação de sedimentos aos de uma boa calibração hidrológica obtida em versões anteriores, expandindo suas potencialidades de aplicação. Também a possibilidade de simular a desagregação e transporte de diferentes classes de tamanho de sedimentos, o que alcançaria uma representação dos processos erosivos.

Em contraponto, apresenta um elevado número de parâmetros a serem calibrados para representação do ambiente e a inexistência de rotinas de calibração

automática, o que expõe a eficiência dos resultados simulados à capacidade estrutural do modelo, do bom desempenho de seu equacionamento e à habilidade do usuário em ajustá-lo de forma manual. O alto grau de subjetividade nesta calibração, aliado à sobreposição da ação dos parâmetros na calibração, pode conduzir a resultados semelhantes a partir de várias combinações de ajuste de parâmetros, aumentando a incerteza sobre o conjunto calibrado. Tão importante quanto um bom ajuste dos parâmetros hidrológicos e erosivos, é também conhecer a sensibilidade dos parâmetros e das equações do modelo e o grau de amplitude das incertezas associadas a elas para o resultado.

2.5 EVOLUÇÃO DA MODELAGEM DE BACIAS COM LISEM

Estudos com várias versões do modelo LISEM utilizadas desde seu lançamento em 1996 procuraram entender o comportamento da sensibilidade dos parâmetros de entrada e da descrição da variabilidade espacial dos fatores controladores e como eles afetam o resultado hidrológico e a distribuição espacial do processo erosivo em bacias. Estes estudos envolveram a identificação e alteração dos parâmetros mais importantes no processo de calibração dos eventos, como no processo de calibração hidrológico com a condutividade hidráulica saturada e a umidade inicial do solo.

Neste contexto, Takken et al. (1999) concluiu que não é prudente avaliar o padrão espacial da erosão com base em apenas o ajuste hidrológico com referência no exutório, muito embora a obtenção de um ajuste de sedimentos no exutório seja satisfatória. De De Roo e Jetten (1999) em estudos iniciais de calibração do modelo, concluíram que o desempenho de um modelo físico e distribuído depende da concordância entre a capacidade de simular processos superficiais como os operados pelo LISEM e os processos existentes no ambiente, pois no caso, o LISEM não simula processos subsuperficiais. Também que é muito dependente da qualidade e resolução dos mapas de entrada, e que diferenças nos resultados simulados podem ser devidas a incertezas geradas pelas informações de entrada para o modelo e pela alta sensibilidade do modelo para alguns desses parâmetros. Neste trabalho também ficou evidente que em função da alta sensibilidade aos fatores que geram escoamento superficial, como umidade inicial do solo e condutividade hidráulica saturada, a resposta do modelo em termos da produção de sedimentos também é altamente

afetada pelo volume de escoamento gerado neste processo de calibração. Em função disso, para que uma boa calibração da produção de sedimentos seja obtida é fundamental que a calibração hidrológica apresente um bom ajuste nos parâmetros. Hessel (2005) avaliou o efeito de diferentes tamanhos de célula e *timesteps* nas simulações, concluindo que os parâmetros afetam mais a dinâmica hidrológica, mas é inconclusivo sobre a ação sobre a PS devido à complexidade das condições do meio que afetam o transporte dos sedimentos. Nearing et al. (2005) estudaram o comportamento da dinâmica erosiva em função da intensidade e volume dos eventos e da alteração da cobertura do solo, identificando que a desagregação era mais afetada que o escoamento em função destas alterações. Hengsdijk et al. (2005), Hessel e Tenge (2008) e Sheikh et al. (2010) também realizaram contribuições para o estudo do modelo. Diversos trabalhos discutem o potencial de aplicação do modelo em função de sua estrutura e teorias dos processos erosivos.

Aksoy e Kavvas (2005), em trabalho de revisão sobre modelos de erosão, apresentam o modelo LISEM como um modelo considerado de base física, mas que tem sua base de equações muito fundamentada em estudos empíricos. Em mais recente revisão sobre modelos, De Vente et al. (2013) atribui ao modelo LISEM a necessidade de intensivas campanhas de coleta de dados a campo para determinar parâmetros de cobertura e superfície do solo. Em estudo de Kvaerno e Stolte (2012), com o objetivo de quantificar as incertezas dos valores de escoamento superficial e predição de erosão pelo LISEM, quando influenciados por textura e conteúdo de matéria orgânica, curva de retenção de água, condutividade hidráulica, estabilidade de agregados e coesão, concluíram que observações errôneas dessas variáveis podem trazer interpretações equivocadas sobre as perdas de solo e da efetividade das práticas conservacionistas.

As simulações com fins preditivos concluem de forma geral sobre uma boa habilidade do modelo em simular o comportamento hidrológico dos eventos, mas menor eficiência na predição da componente erosiva, quando aplicada sobre cenários ambientais em diversos estudos em diferentes países, inclusive para as condições de solo e precipitação ocorrentes nas condições brasileiras (HESSEL; BOSCH; VIGIAK, 2006; SHEIKH et al., 2010; MORO; MERTEN, 2011; BARROS, 2012).

Pandey et al. (2016) em trabalho de revisão de modelos erosivos preditivos de produção de sedimentos, onde comparou 50 diferentes modelos de base física de diferentes concepções estruturais, qualifica o LISEM como pertencente a um grupo

de modelos com capacidade de simular a hidrologia e a erosão em escala de bacia hidrográfica, com potencial integração com um sistema de informações geográfica, mantendo a relação de uma célula no espaço com as células vizinhas, permitindo a sua utilização de forma espacializada. Com isso, e por ser um modelo destinado a eventos individuais, permite o estudo de práticas de manejo sobre a bacia e simular eventos de alto impacto sobre as perdas por erosão, ocorridos ou futuros. Uma aplicação do LISEM realizado por Hessel et al. (2003) com três eventos em uma bacia de 3.500 hectares na região Loess Plateau na China, apresentou resultados considerados insatisfatórios para a predição de sedimentos. Em função destes resultados, ele não foi apontado como um modelo de largo uso, a exemplo de outros citados no trabalho, como SWAT, WEPP, AGNPS, ANSWER e SHETRAN.

Em função de que modelos físicos e distribuídos precisam lidar com grande variabilidade espacial dos fatores controladores da erosão, o equacionamento do modelo deve ser flexível para permitir reproduzir os processos de erosão em função destes parâmetros. Hessel et al. (2003) apontaram que em bacias sujeitas a alta complexidade em termos de relevo, os resultados de predição pelo modelo podem ser insatisfatórios. Isto porque a rigidez do sistema de equações e processos não contempla captar as nuances que o terreno propicia às formas de escoamento, calculadas pelo sistema de roteamento pela onda cinemática célula à célula. Em função desta complexidade, a predição de sedimentos em bacias hidrográficas está sujeita a incertezas. No entanto, evidenciam a aptidão do modelo para estudos de cenários de alterações de uso e manejo sob condições de eventos particulares, aonde a calibração específica conduz a um bom conjunto de condições de modelagem.

Em nível de aplicação do modelo para as condições brasileiras, mais especificamente no sul do Brasil, estudos de monitoramento hidrológico de longo prazo sobre uma bacia hidrográfica experimental localizada no município de Arvorezinha (RS), serviram de base para o uso e calibração do modelo para eventos de diferentes magnitudes e dinâmica de usos e manejo desde 2003. Como destaque dos trabalhos realizados, podemos citar os de Dalbianco (2009, 2010 e 2013) e os de Barros (2012 e 2016).

Dalbianco et al. (2009), realizou estudo preparatório de diagnóstico das variáveis para uso como entrada no modelo LISEM. Com objetivo de caracterizar as propriedades físico-hídricas da camada superficial do solo em função dos sistemas de uso e manejo aplicados na microbacia de Arvorezinha, entre os sistemas campo

nativo, mata nativa, preparo convencional, plantio direto e preparo mínimo, avaliou por meio de contrastes ortogonais entre grupos de maneira a avaliar o comportamento físico-hídrico do solo em função do cultivo, do tipo de vegetação natural e pisoteio animal, das práticas conservacionistas e da cobertura permanente do solo. A verificação dos efeitos foi baseada nos valores de densidade do solo, porosidade, carbono orgânico, grau de flocculação, condutividade hidráulica do solo saturado, permeabilidade ao ar, e retenção e disponibilidade de água. Os solos submetidos ao cultivo apresentaram estrutura degradada e menor teor de matéria orgânica. O uso com campo nativo reduziu a macro porosidade, a condutividade hidráulica e a permeabilidade ao ar em relação aos outros sistemas de manejo do solo. As práticas conservacionistas foram eficientes em aumentar a retenção e a disponibilidade de água no solo em relação ao preparo convencional.

Dalbiano et al. (2010) em estudo para identificar as variáveis de solo que controlam e explicam o processo de infiltração de água no solo em Arvorezinha, conduziu ensaios de infiltração em cinco encostas, procurando representar áreas próximas e distantes da rede de drenagem. Concluiu que, a infiltração da água no solo é fortemente dependente das suas propriedades físico-hídricas nas camadas subsuperficiais; e que o teor de areia tem grande importância na estimativa da velocidade de infiltração básica de água no solo.

Barros et al. (2014) usando o modelo LISEM para descrever o escoamento superficial e a produção de sedimentos durante eventos de precipitação em pequena bacia rural no sul do Brasil, concluiu que o modelo desempenha bem em representar os processos de diferentes magnitudes. A caracterização das propriedades físico-hídricas das camadas de solo permitiu a identificação de camadas impeditivas para a infiltração de água no solo. Mas o resultado foi menos preciso na simulação da CSS no canal, indicando a necessidade de estudos para identificar outras fontes de atuação sobre estes processos alheios ao que o modelo prevê ou a adequação dos parâmetros físicos, especialmente a coesão do solo e a estabilidade de agregados.

2.6 BASE CONCEITUAL DO MODELO LISEM E PRINCIPAIS PROCESSOS EROSIVOS OPERADOS

Uma breve descrição da funcionalidade do modelo LISEM se faz necessária para contextualizar o atual estágio de desenvolvimento do modelo em relação às

versões anteriormente utilizadas para a modelagem da PS no contexto da bacia em estudo. Em função deste nível de desenvolvimento, os resultados obtidos em trabalhos anteriores onde a qualidade preditiva nos ensaios de modelagem não foi tão satisfatória, podem ser agora ponderados segundo uma nova perspectiva de qualidade conceitual e técnica do modelo, tanto pelo ponto de vista da estrutura de equações, quanto pela eliminação de erros de programação.

Os processos hidrológicos contemplados pelo modelo compreendem: interceptação pelo dossel de plantas, infiltração de água no solo, armazenamento em superfície, desagregação pelo *splash*, desagregação, transporte e deposição pelo fluxo superficial, desagregação, transporte e deposição em canais (Figura 2). Uma descrição completa dos processos pode ser obtida em De Roo et al. (1996) e nos trabalhos realizados anteriormente nesta mesma bacia por Barros (2012) e Dalbianco, (2013).

O modelo foi construído a partir de um código fonte escrito em linguagem C++ de código aberto, sendo possível realizar alterações em sua estrutura e até mesmo em sua base de equações. Diversas versões foram desenvolvidas desde sua criação, com evolução em termos de processos operados, dados de entrada sobre fatores de controle, opções de ajustes à escolha do usuário entre unidades, apresentações de saída, etc.

A capacidade de representar graficamente o hidrograma de saída dos eventos e uma série de mapas de saída de distribuição espacial dos fenômenos simulados na superfície é um destaque em relação a modelos mais analíticos, propondo uma interação visual importante no processo de modelagem, permitindo a configuração e o controle das variáveis de ambiente. Com as novas versões lançadas, erros de programação foram sendo depurados e novas funcionalidades foram sendo adicionadas.

Uma recente versão lançada em 2017 apresenta algumas inovações na representação de processos. A proposta de duas novas equações de cálculo do índice de eficiência de desagregação (y) aplicadas para cálculo da componente de desagregação na equação de erosão do modelo abre possibilidades de uma melhor aplicação em simulações para ser utilizado em solos diferentes daqueles da concepção original, menos coeso (HONG et al., 2017).

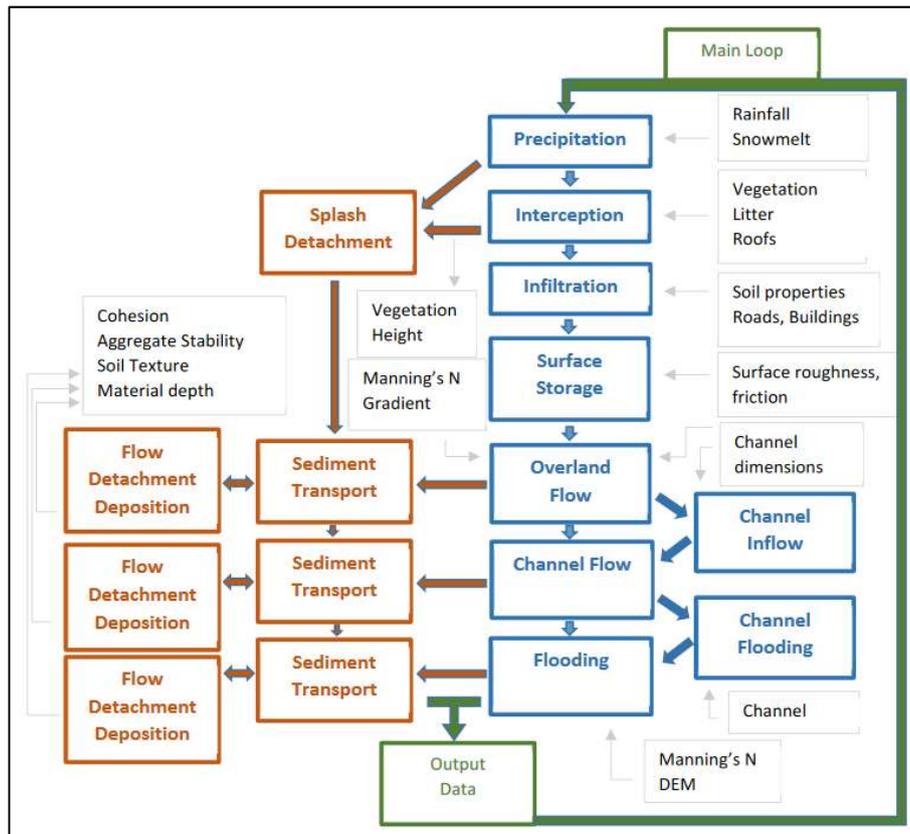


Figura 2 - Fluxograma de processos simulados pelo LISEM.
 Fonte: <http://blogs.itc.nl/lisem/>

2.6.1 Desagregação pelo impacto da gota da chuva no solo.

A precipitação, em função de sua intensidade, duração, frequência e comportamento sazonal, atuam como agente de desagregação na fase inicial do processo erosivo, com o impacto da gota da chuva sobre o solo. Para simular a erosão pelo impacto da gota da chuva, o modelo LISEM se utiliza de dados de intensidade e volume da chuva durante eventos, sendo que o valor da energia cinética é aplicado em equações para traduzir esta energia em poder de desagregação das partículas do solo, sendo esta responsável pela componente de erosão pelo *splash*. (WANG et al., 2014). Esta componente pode ser de menor importância quantitativa em termos de produção de sedimentos, em função das características de cobertura do solo que oferecem proteção contra o impacto. Mas para determinadas regiões os processos erosivos pelo impacto da chuva assumem importância relativa maior quando associada ao processo de erosão por fluxo concentrado, como em terrenos mais

planos e sujeitos a exposição em épocas críticas de seu ciclo de cultura ou de manejo (FOUCHER et al., 2014; LE GALL et al., 2017).

O modelo LISEM tem a capacidade de utilizar diferentes tipos de equações e valores de energia cinética da chuva como variável conjugada à equação de desagregação pelo *splash*. Isto permite um ajuste local para esta fase do processo erosivo, permitindo quantificar o efeito da intensidade dos eventos nas simulações, em vez de assumir valores fixos para diferentes eventos de chuva. As diferentes formas matemáticas de equações disponíveis no programa são:

- ✓ $Ke = a (1 - b \exp(-c * I))$;
- ✓ $Ke = a + b * \log(I)$;
- ✓ $Ke = a * I^b$

Onde a, b e c são coeficientes empíricos e I é a intensidade da chuva (mm h⁻¹).

O manual teórico do LISEM indica o uso da equação na segunda forma para o cálculo da energia cinética da chuva direta e indireta:

$$Ker = 8.95 + 8.44(\log(I)) \quad (1)$$

$$Ket = 15.8 * \sqrt{h} - 5.87 \quad (2)$$

Onde I é a intensidade da chuva (mm.h⁻¹) e h é a altura das plantas.

No entanto, os principais estudos realizados na bacia até 2015 com o LISEM se utilizaram da equação (3), e por isso foi utilizada neste estudo.

$$Ke = 15.204 * I^{1.126} \quad (3)$$

De posse dos valores de energia cinética da chuva, a equação (4) apresenta o cálculo do processo de erosão pela gota:

$$Ds = \left(\frac{2.82}{As} Ke \exp(-1.48WH) + 2.96 \right) P A / dt \quad (4)$$

Onde D_s é a desagregação pelo impacto da chuva (g s^{-1}), A_s é a estabilidade dos agregados (adimensional), K_e é a energia cinética da chuva ($\text{J.m}^2.\text{mm}^{-1}$), WH é a profundidade da lâmina de água na superfície (mm), P é o total de precipitação incidente dentro e entre copa das plantas no *timestep* (mm), A é a área onde o *splash* ocorre (m^2) e dt o *timestep* (s).

Estas equações de desagregação pelo impacto da chuva foram obtidas experimentalmente em ensaios com diversos tipos de fontes de dados e estudos de cobertura de solo, mas em condições de solos europeus, em essência, menos coesos. Um fator de transferência das partículas desagregadas entre a área seca e a área molhada da célula (sujeita ao transporte), é aplicado como controle do processo de desagregação nesta fase, controlando a quantidade de sedimentos transportados pelo salpico, permitindo uma calibração final deste processo.

2.6.2 Roteamento do escoamento superficial

A nova versão traz a possibilidade de escoamento através do método difusivo 2D ou pelo método da onda cinética 1D. O método difusivo contempla a distribuição proporcional do escoamento entre as células vizinhas a jusante no espaço e no tempo pela resolução de equações por interpolação bi-linear, computando entradas das células a montante e saídas de escoamento para células a jusante.

O método de onda cinética utiliza o roteamento através do mapa de direção de fluxo (LDD) promovido pelo modelo digital de elevação, conjugado com a equação de Manning para controle da velocidade de escoamento entre as células. Um volume de escoamento através de um raio hidráulico calculado na célula traduz o balanço entre entradas e saídas na célula (precipitação e infiltração):

$$\frac{dA}{dt} + \frac{dQ}{dx} = q - i \quad (5)$$

Onde A é a área da seção transversal do fluxo (m^2); Q é a descarga líquida na célula ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$); q são outras fontes de entrada de água ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$); i é a infiltração ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$).

$$v = R^{\frac{3}{2}} * \frac{\sqrt{S}}{n} \quad (6)$$

Onde v é a velocidade do escoamento (m s^{-1}); R é o raio hidráulico (m); S é a declividade (m m^{-1}); n é o coeficiente de Manning (-).

$$A = \alpha Q^\beta \quad (7)$$

Onde β é 0.6 e α é dado por:

$$\alpha = \left(\left(\frac{n}{S^{0.5} R} \right)^3 \right)^\beta \quad (8)$$

O cálculo em cada célula é realizado substituindo a descarga para a seção de fluxo (7) em (9).

$$\frac{d(\alpha Q^\beta)}{dt} + \frac{dQ}{dx} = q - i \quad (9)$$

$$\frac{\alpha \beta ((Q_x^t)^{\beta-1} - (Q_x^{t-1})^{\beta-1})}{\Delta t} + \frac{Q_x^t - Q_{x-1}^t}{dx} = q_x - I_x \quad (10)$$

A não linearidade desta equação é resolvida por interações pelo método de Newton Raphson para resolver Qx^t . Pela solução implícita, o método é menos sensível ao *timestep*, e o *timestep* de minutos pode ser usado nas simulações para esta versão de resolução, sendo o cálculo pelo LDD realizado a partir das células de contorno em direção ao de descarga final.

Entre as duas abordagens apresentadas, difusiva e onda cinética, existem vantagens e desvantagens. O uso da onda cinética em 1D pelo LDD, converge os volumes acumulados para uma única célula na direção de fluxo, o que pode causar a acumulação de uma lâmina sobre a área da célula que não aconteceria naturalmente. Isto causa distorções no volume de água e na capacidade de calcular corretamente a infiltração pela menor área superficial atingida pelo escoamento real. Também no

caso, altos volumes de escoamento podem ser gerados com impactos na capacidade de transporte de sedimentos, podendo ser superestimada.

2.6.3 Equações de desagregação pelo escoamento superficial do LISEM

Entre as etapas do processo erosivo de natureza hídrica que acontecem em áreas agrícolas, a desagregação pela energia do escoamento superficial pode ser de duas formas: uma onde a água se propaga transportando as partículas do solo e também proporciona nova desagregação de forma difusa (erosão laminar); e outra na forma concentrada (erosão em sulcos), ambas causadas pela tensão de cisalhamento da água sobre o solo. O processo predominante e responsável pela maior geração de produção de sedimento é o escoamento superficial concentrado em sulcos (GIMÉNEZ; GOVERS, 2002; KNAPEN et al., 2007).

Na época de concepção do modelo LISEM, outros modelos de base física estavam em uso no mercado, como o CREAM (KNISEL, 1980), ANSWER (BEASLEY; HUGGINS; MONKE, 1980), WEPP (LANE, 1992) e EUROSEM (MORGAN; QUINTON; RICKSON, 1994). Mas todos eles apresentam grandes simplificações quanto à integração dos sistemas SIG para representação da variabilidade espacial. De Roo et al. (1996) apontam algumas diferenças importantes entre o LISEM e outros modelos. LISEM se assemelha ao ANSWER quanto ao uso de arquivos raster para representação da bacia, enquanto que EUROSEM E WEPP usam polígonos; LISEM usa uma linguagem de programação afinada com a manipulação geográfica dos elementos; e quanto a consideração de processos se assemelha à EUROSEM e WEPP ao usar equações de infiltração de conceito físico avançados, enquanto ANSWER usa relações empíricas.

As equações de balanço de sedimentos nas células são governadas por uma equação geral de balanço de massa (MORGAN, 2005), dado por $E = D_s + D_r - D_p$, onde E é a erosão bruta, D_s é a desagregação pelo *splash*, D_r a desagregação pelo escoamento superficial e D_p a deposição dos sedimentos, princípio também usada pelo EUROSEM.

No modelo LISEM, o processo de desagregação pelo escoamento superficial é representado a partir de equações desenvolvidas através de estudos promovidos em condições experimentais para um conjunto específico de solos e de clima em ensaios laboratoriais e de campo (DESMET, 1985; GOVERS et al., 1990a, 1994; VAN

WESEMAEL et al., 1996). Estes estudos envolveram os processos contemplados pelo LISEM que foram inicialmente avaliados sobre o monitoramento de três diferentes escalas em bacias localizadas próximas na região de South-Limburg, e em pequenas parcelas experimentais.

O modelo LISEM utiliza a formulação erosiva baseada no princípio da capacidade de transporte pelo fluxo proposta por (GOVERS, 1990b). Neste trabalho foram estabelecidas as relações entre a potência de escoamento e a capacidade de transporte de sedimentos em função da granulometria e em função da potência de fluxo presente no escoamento para sedimentos não coesivos, e de uma potência de fluxo mínima crítica necessária para se iniciar a desagregação. Esta equação de CT no modelo LISEM foi escolhida, segundo Hessel e Jetten (2007), por ser a que apresentou melhor desempenho e menor sensibilidade ao fator declividade e granulometria em sua resposta comparada a oito diferentes equações testadas. Apresenta a seguinte forma:

$$T = \rho_s c (\omega - \omega_{cr})^d \quad (11)$$

Onde: T é a capacidade de transporte expressa em concentração de sedimentos (Kg m^{-3}); ρ_s é a densidade dos sedimentos (kg m^{-3}); ω representa a potência de fluxo (m s^{-1}); ω_{cr} é a potência de fluxo crítica (m s^{-1}); c e d são coeficientes em função da granulometria; e

$$c = \frac{(D_{50}+5)^{-0.6}}{0.32} \quad (12)$$

$$d = \frac{(D_{50}+5)^{0.25}}{300} \quad (13)$$

Onde: D_{50} é a granulometria média dos sedimentos (m).

A desagregação em sulcos e entre sulcos é calculada de acordo com os mesmos princípios utilizados no modelo EUROSEM (MORGAN et al., 1998) considerando a capacidade de transporte (T), sendo esta comparada com a concentração existente na solução, determinando então que para $T < C$ haverá deposição (*dep*), e caso $T > C$ haverá desagregação (*det*):

$$dep = wsBmin(0.0, (T - C)) \quad (14)$$

$$det = Bmax(0.0, (T - C)) \quad (15)$$

Onde dep é a taxa de deposição ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$); ws é a velocidade de deposição das partículas, B é o raio hidráulico do fluxo (m); e C é a concentração de sedimentos presente no fluxo ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$).

Para a versão original do modelo quando de seu lançamento, foi já anexado na equação de desagregação (15) um fator de eficiência (RAUWS; GOVERS, 1988) para ajustar o nível de desagregação para as condições observadas nos experimentos de validação do modelo, ficando na forma:

$$det = y * ws * B * max(0.0, (T - C)) \quad (16)$$

Onde: y é o coeficiente de eficiência da desagregação.

O coeficiente de eficiência é calculado segundo (GOVERS; RAUWS, 1986):

$$y = \frac{Ugmin}{Ugcrit} = min\left(1.0, \frac{1}{0.89+0.56(co+coveg)}\right) \quad (17)$$

Onde: $Ugmin$ é o mínimo requerido de velocidade de cisalhamento de grãos crítica, $Ugcrit$ é a velocidade crítica de cisalhamento das partículas para iniciar a formação do sulco, co é a coesão do solo (KPa) e $coveg$ a coesão adicional das raízes (KPa).

Esta equação (E1), na forma matemática de uma função linear inversa, era a única disponível em versões anteriores do LISEM e que foi utilizada nos estudos hidrológicos sobre a bacia de Arvorezinha. Todos os processos de calibração e validação do modelo nestes trabalhos foram executados a partir do uso desta equação. A versão recente do modelo lançada em fevereiro de 2017 (versão 3.96) apresenta alternativas de equações de eficiência de desagregação de escolha do usuário:

$$y = 0.79exp(-0.85Co) \quad (18)$$

$$y = 1.0/(2.0C_0) \quad (19)$$

As equações (18) e (19), doravante denominadas neste trabalho por “E2” e “E3”, surgem como alternativas de coeficientes multiplicadores a serem utilizadas com a equação de desagregação principal do modelo como controladores do processo de desagregação pelo fluxo em função dos valores de coesão do solo informados para cada célula, sendo a equação (18) ou (E2) uma função matemática exponencial e que é usada no modelo EUROSEM, e a equação (19) ou (E3) também uma função linear inversa como utilizada no modelo MMF (MORGAN; MORGAN; FINNEY, 1984).

A proposição da equação E2 se baseia no coeficiente de eficiência de desagregação utilizada no modelo EUROSEM, aplicadas na modelagem da desagregação pelo escoamento. Isoladamente, a equação geral de desagregação apresentada em (15) não apresenta limite para desagregação do solo, quando existe uma relação entre a desagregação e a coesão do solo. Quando a capacidade de transporte (T) for maior do que a concentração de sedimentos presente no fluxo (C), a taxa de desagregação deve ser controlada através de um coeficiente entre valores entre $y=1$ quando $T < C$ (caso em que acontece deposição) e $y < 1$ quando $T > C$ (caso em que acontece desagregação).

Já a equação E3 apresentada em (19) tem sua origem a partir da aplicação deste mesmo fator de eficiência na equação de cálculo da taxa anual de desagregação de partículas de solo pelo escoamento consideradas no modelo MMF. O modelo MMF tem como base os fundamentos de erosão aplicados por Meyer e Wischmeier (1969) no modelo empírico da Equação Universal de Perda de Solo (USLE). A equação geral deste modelo é dada por:

$$H = Z * Q^{1,5} \sin S (1 - GC) * 10^{-3} \quad (20)$$

Onde: H é a taxa anual de desagregação pelo escoamento (Kg m^{-2}); Z o fator de eficiência da desagregação; Q o volume do escoamento superficial (mm); S a declividade ($^\circ$); GC a cobertura do solo (%),

O fator Z no modelo MMF é dado por:

$$Z = 1.0/(2.0C_0) \quad (21)$$

Onde Z é o fator de eficiência de desagregação do solo e C_0 a coesão do solo medida pelo Torvane (kPa).

As leituras de coesão nos solos a campo utilizadas nestas equações pelos diferentes modelos são realizadas por equipamentos de leitura tipo Torvane sob condições de saturação de umidade. Portanto, as condições de umidade da camada superficial e do perfil do solo abaixo dela influenciam na leitura da coesão do solo. Também variações de estrutura e outros fatores associados à resistência mecânica presentes podem conduzir a leituras com variações bastante significativas desta variável em termos espaciais. Morgan cita autores (Rauws e Govers (1988), Torri e Borselli (1991), Brunori et al. (1989) e Crouch e Novruzi (1989)), que consideram como reconhecidas cientificamente as relações entre a coesão do solo e o fator de erodibilidade que este apresenta quando exposto aos escoamentos. No entanto, o comportamento da desagregação do solo com base em características físicas que possam ser facilmente obtidas de forma simplificada a campo é restrito, sendo o Torvane o equipamento mais utilizado.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Para oferecer as melhores condições de representação do meio físico da bacia e a perfeita caracterização dos eventos para as simulações, foram obtidos dados consistentes sobre as perdas de água e solo de uma bacia hidrográfica com o monitoramento intensivo das variáveis hidrológicas de vazão, concentração de sedimentos em suspensão e intensidade de precipitação no tempo. Também da caracterização topográfica do relevo da bacia, especialmente pela sua importância do controle da declividade sobre a velocidade de escoamento nas encostas.

3.1 CARACTERIZAÇÃO FISIAGRÁFICA DA BACIA

A modelagem da PS foi realizada a partir dos dados de monitoramento de eventos e caracterização da bacia hidrográfica do Arroio Lajeado Ferreira, localizada no distrito de Cândido Brum em Arvorezinha, estado do Rio Grande do Sul, com área de 126 ha e exutório nas coordenadas 28°49'33"S e 52°12'30"W (Figura 3).

O clima na região é do tipo Cfb segundo a escala de Köppen, com médias de chuvas médias entre 1.250 e 2.000 mm. A Figura 4 apresenta os valores de precipitação mensal sobre a bacia entre 2010 e 2016.

A bacia representa condições de relevo acentuado e vales encaixados, comuns ao relevo da região, sendo suave a ondulado no terço superior e ondulado a forte ondulado no terço inferior, com gradiente de altitude entre 583 m no limite inferior e 728 m no limite superior da bacia (Figura 5).

O mapa de solos foi obtido através do ajustamento de um mapa já existente, no qual foram recalculados os limites de acordo com a nova base cartográfica obtida com o mapeamento com o GPS-RTK. Tanto no mapa de usos como no de solos, também foram incluídas as feições das estradas, devido sua importante contribuição na produção de sedimentos sobre a bacia (MINELLA et al., 2007; PAULO et al., 2015).

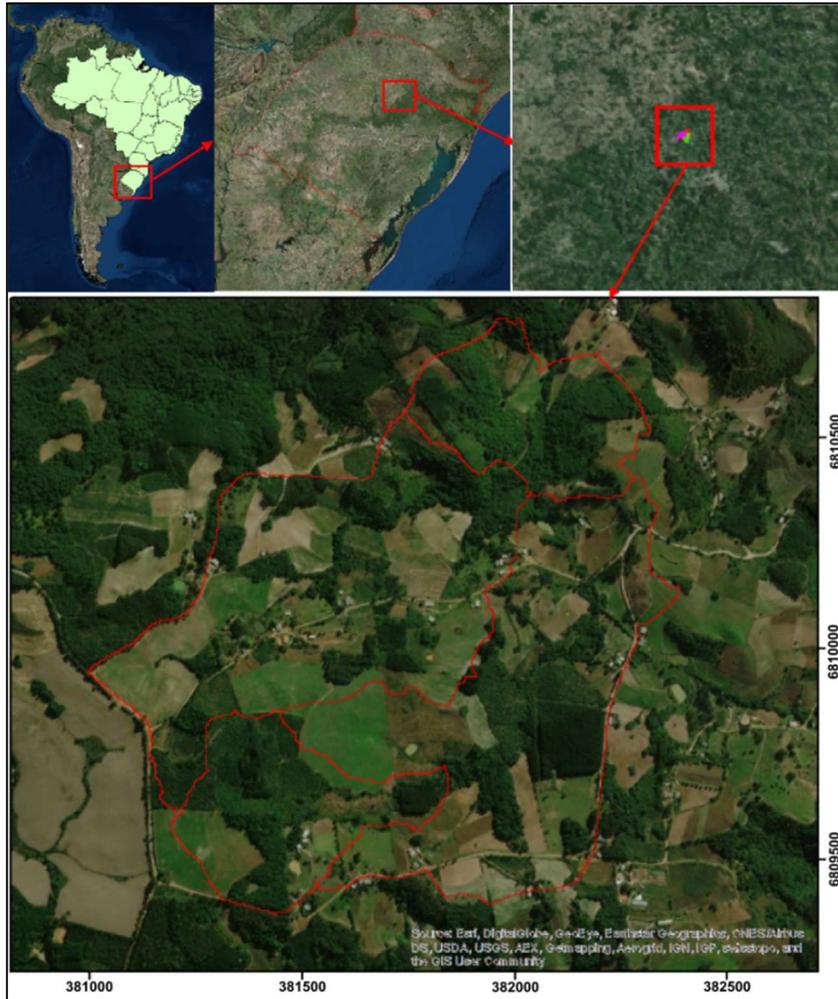


Figura 3 - Localização da bacia hidrográfica de Arvorezinha.

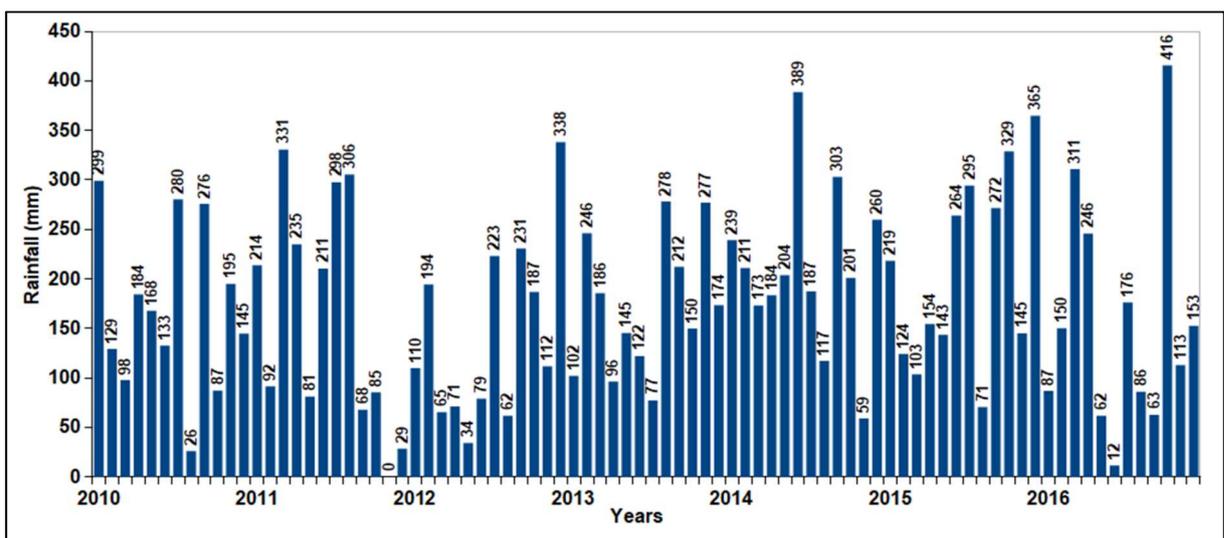


Figura 4 - Precipitação mensal incidente sobre a bacia entre 2010 e 2016.

Os solos são jovens e pouco profundos no terço inferior da bacia, formados por Neossolos e Cambissolos. No terço mediano e superior, estão presentes Argissolos, bem mais profundos, mas que apresentam camada impeditiva à infiltração de água no perfil do solo a pouca profundidade devido à presença de horizonte B textural. (Figura 5).

As encostas ocupadas com os diferentes usos e manejos sobre a bacia foram demarcados a campo com dispositivo GPS e mapeados no SIG Qgis formando um banco de dados espacial, onde as informações dos usos, manejo e respectivos parâmetros de interesse são armazenados e manipulados para a preparação dos mapas de entrada ao modelo LISEM.

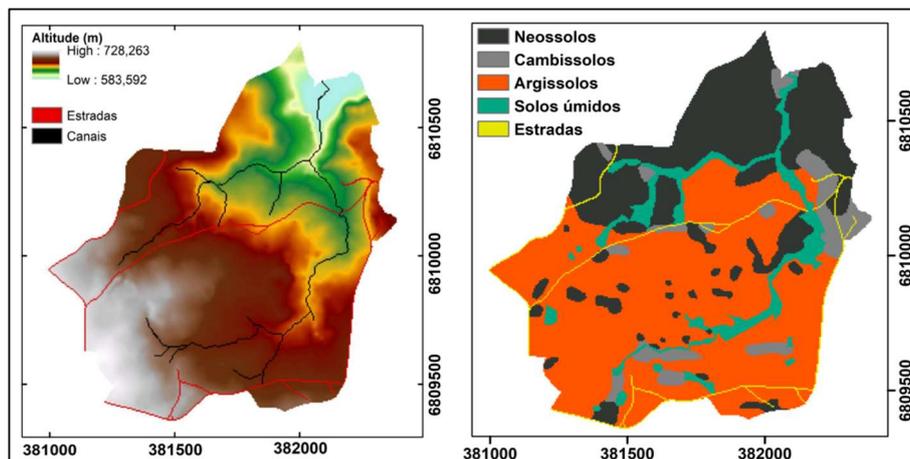


Figura 5 - Mapa de relevo e de solos

A bacia tem manejo de cultivo em pequenas propriedades onde se cultivam principalmente Tabaco (*Nicotiana sp.*, milho (*Zea mays*), Soja (*Glycine max.*), Erva-mate (*Ilex paraguayenses*) e eucalipto (*Eucalyptus sp.*), cultivos predominantes para a região da encosta do Planalto. Durante os anos considerados neste estudo ocorreram pequenas alterações na área de ocupação e na qualidade da cobertura do solo sobre a bacia. Os mapas de uso referentes aos anos considerados nos eventos se encontram na Figura 6.

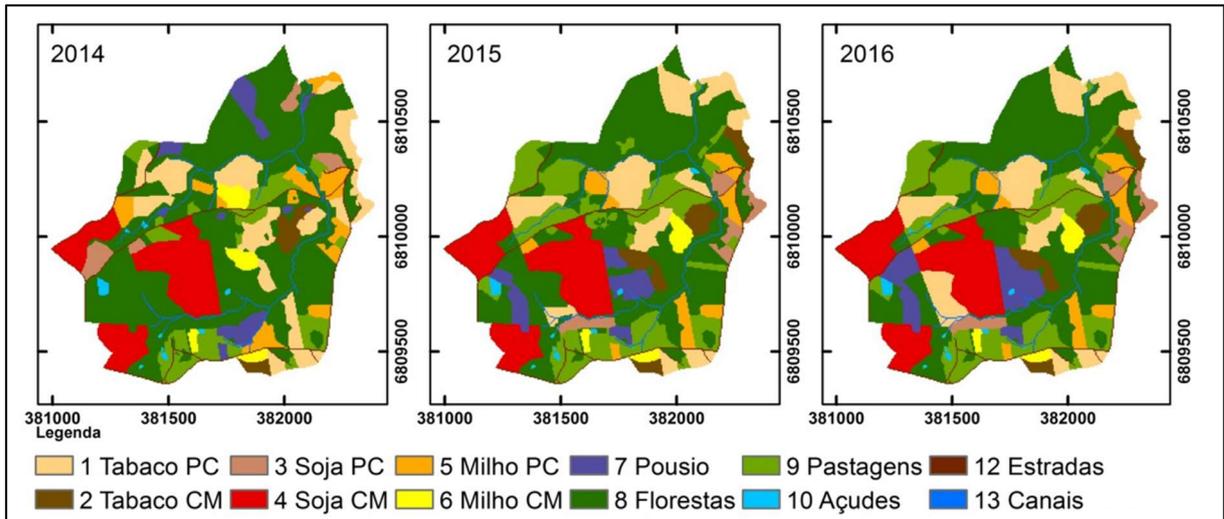


Figura 6 - Mapas de uso

3.2 DEFINIÇÃO DE PARÂMETROS DE ENTRADA NO MODELO.

Os mapas de entrada ao modelo LISEM foram preparados a partir de um script no software auxiliar *Nutshell* (JETTEN; VAN DEN BOUT, 2017) que roda os comandos do PcRaster (KARSSENBERG et al., 2010), traduzindo os parâmetros tabelados de uso e cobertura vegetal de cada evento para mapas raster. Dados de n de Manning (N), cobertura da célula (SC), altura de plantas (CH), índice de área foliar (LAI), coesão adicional das raízes (COR), fração coberta por pedras (SF), rugosidade da superfície (RR) e coesão do solo (CO) foram atribuídos a áreas específicas segundo a distribuição geográfica dos mapas de uso. Como a modelagem tem objetivo de verificar a ação da desagregação para cada evento individualmente, e em função da pequena alteração de área de ocupação espacial de cada uso entre os anos, os valores destes parâmetros foram considerados os mesmos para todos os eventos simulados. Os parâmetros N, SC e COR foram estimados pelo autor para este trabalho, e os valores de CH, LAI, SF e RR foram obtidos respeitando as características das culturas nas respectivas épocas de cada evento. Valores de condutividade hidráulica do solo saturado (KSAT), porosidade do solo (PT), tensão matricial do solo (TM), conteúdo de umidade inicial (UI) e estabilidade dos agregados (EA) foram atribuídos geograficamente segundo o mapa de solos. Valores de KSAT, PT e EA foram estimados a partir dos estudos de Barros (BARROS, 2012) e Dalbianco (DALBIANCO, 2013). A tensão matricial do solo foi considerada de forma simplificada como valor fixo de 30 kPa para todos os eventos. Os parâmetros que sofrem maior

alteração de valor em função da época do ano são os valores de altura de plantas e índice de área foliar, que foram tabelados individualmente para cada evento (ANEXO B).

Os valores de coesão dos solos (medianas) foram estimados por Dalbianco (2013) com o equipamento Torvane, para um conjunto de 71 locais com 10 repetições em cada ponto distanciados num raio de dois metros. Com base nos estudos do autor e de trabalhos anteriores de calibração com o modelo, foram elaborados os valores da Tabela 2 são sugestões de valores iniciais a serem usados para cada área superficial coberta pelos diferentes usos, considerando-se que os usos apresentam influência sobre a condição de desagregação superficial dos solos em função da sua cobertura vegetal.

Nos canais foram utilizados os parâmetros de n de Manning de 0.01, altura das paredes de 1 metro e coesão das paredes de 10.000 kPa. O mapa de direção de fluxo foi preparado de forma automática pelo algoritmo do PcRaster e posteriormente foi modificado manualmente para representar as direções de escoamento observadas em campo, obedecendo as feições de terreno que propiciam um comportamento peculiar ao escoamento, como as estradas, canais e obstáculos que não podem ser detectados de forma automática com esta resolução do modelo de terreno.

Tabela 1 - Valores de referência de parâmetros de cobertura do solo

LU	N	SC	COR	SF	RR	CO
Tobacco CT	0.20	1.00	1.00	0.20	7.57	7.00
Tobacco MT	0.25	1.00	1.00	0.20	4.86	8.00
Soybean CT	0.20	1.00	1.00	0.20	4.13	7.00
Soybean MT	0.25	1.00	1.00	0.20	4.13	8.00
Corn CT	0.20	1.00	1.00	0.10	4.13	7.00
Corn MT	0.25	1.00	1.00	0.10	4.13	8.00
Fallow	0.20	1.00	10.00	0.30	4.17	10.00
Forest	0.40	1.00	10.00	0.50	4.55	10.00
Pasture	0.20	1.00	6.00	0.20	3.99	8.00
Dams	0.01	1.00	0.00	0.00	0.00	10.00
Houses	0.15	1.00	0.00	1.00	3.99	8.00
Roads	0.20	1.00	0.00	0.50	3.99	8.00
Channels	0.05	1.00	10.00	1.00	3.00	20.00

LU - Land unit; N - Manning's number; SC - Soil cover; COR - Coehsion from roots; SF - Stone fraction; RR - Ramdon roughness; CO - Soil cohesion Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3 MONITORAMENTO HIDROLÓGICO E SELEÇÃO DOS EVENTOS

O monitoramento contínuo das variáveis hidrológicas dos eventos do período de 2014 a 2016 foi realizado por equipamentos automáticos e por campanhas de coleta manuais de eventos. Os dados da precipitação foram obtidos através do seu volume em três pontos da bacia por pluviômetros, e de sua intensidade por dois pluviógrafos, sendo estes coletados de forma automática em intervalos de 10 minutos. No exutório da bacia, um linígrafo de pressão acoplado a um datalogger da marca Solar NV2000, registrou as leituras de nível do escoamento concentrado em uma calha Parshall em intervalos de 10 minutos, calculadas em m^3 de vazão através de equação de vazão da calha. Os dados de concentração de sedimentos em suspensão foram obtidos a partir de um turbidímetro e datalogger da marca Solar em intervalos de leitura de 10 minutos, que obtiveram dados de turbidez em unidades nefelométricas (NTU) posteriormente convertidos em CSS por uma equação de conversão dos valores de NTU para CSS ($g L^{-1}$). A equação é freqüentemente calibrada através de soluções padrão de calibração, segundo metodologia descrita por (MERTEN; MINELLA, 2014), acompanhando as alterações no padrão de sedimentos da bacia. Campanhas de coleta de amostras de sedimentos analisadas em laboratório pelo método de evaporação foram conduzidas em eventos esporádicos para acompanhamento da calibração dos valores de CSS lidos nos eventos e ajustes das leituras do turbidímetro. A metodologia de calibração dos equipamentos, coletas de amostras em eventos e processamento das amostras em laboratório podem ser obtidos em trabalho de Barros (2012).

Após a condução do monitoramento contínuo dos eventos sobre a bacia, sobre toda base de dados foram selecionados 20 eventos para serem utilizados nas simulações, tentando promover a representação da diversidade do conjunto de características dos eventos que ocorreram no período. Também foi considerada a escolha de eventos que apresentassem precipitações bem definidas e formas do hidrograma que pudessem ser mais facilmente calibrados quanto ao escoamento superficial. Entre os 20 eventos selecionados ocorridos entre 2014 e 2016, temos diferentes características de duração, intensidade e volume total de escoamento. As Figuras 5 e 6 presentes no ANEXO A, representam graficamente os hietogramas, hidrogramas e sedimentogramas dos eventos monitorados e utilizados na avaliação do modelo.

O LISEM integra apenas escoamentos superficiais que chegam à rede de drenagem em suas simulações. Sendo a descarga líquida mensurada no exutório de

uma bacia composta por uma mistura de escoamentos superficial e subsuperficial, para calibrar os resultados das simulações com os dados monitorados de vazão e CSS dos eventos, procedeu-se o uso de uma rotina de separação do escoamento da descarga líquida. Para configurar um cenário de descarga líquida admitindo a participação da componente subsuperficial nos eventos de forma simplificada, foi utilizada neste estudo uma técnica de separação com uso de filtro matemático, proposto por Lyne e Hollick (LADSON et al., 2013). Este filtro matemático assume a forma de:

$$fk = \alpha f_k - 1 + \left(\frac{1+\alpha}{2}\right) (Yk - Yk^{-1}) \quad (22)$$

Onde: f_k = fluxo de resposta rápida no instante k , Y_k é o escoamento total e α é um parâmetro de calibração.

Este método está disponível como ferramenta no pacote de software BFI 3.0+, de uso livre, com ajuste realizado pela configuração de apenas um único parâmetro α . O coeficiente α normalmente é indicado com valor de 0.925 (ZHANG et al., 2017). No entanto, esta calibração depende das características da bacia e do solo, sendo usados valores específicos para os eventos em função das condições do meio. A Tabela 3 apresenta os resultados da aplicação do filtro sobre os 20 eventos selecionados e o cálculo da proporção de escoamento superficial (ES) e subsuperficial (ESS) obtidos para os eventos. Estes valores de ES serão usados como referência para calibração do ES simulado no modelo LISEM.

3.4 CALIBRAÇÃO DOS EVENTOS.

Em preparação para as simulações com o LISEM, os hietogramas dos eventos foram convertidos para o formato padrão de entrada para o LISEM na forma de um arquivo texto. Os mapas de relevo (DEM) e de direção de fluxo (LDD) foram os mesmos para o conjunto de eventos simulados.

Tabela 2 - Características dos eventos e resultados da separação do escoamento segundo o filtro.

Evento	Date	Ppt (mm)	Qt (m ³)	Q/P (%)	ES (m ³)	ES/Q t(%)	ESS (m ³)	ESS/Qt (%)
1	01/01/2014	8.98	1462.06	12.95	1173.75	80.28	288.31	19.72
3	08/04/2014	37.95	7691.11	16.12	4174.52	54.28	3516.59	45.72
5	21/05/2014	53.36	11543.17	17.21	7700.26	66.71	3842.90	33.29
6	05/06/2014	67.80	75604.85	88.71	27586.91	36.49	48017.94	63.51
8	12/12/2014	32.10	3473.45	76.48	1778.38	51.20	2763.32	79.56
9	24/02/2015	25.95	2384.31	7.31	1484.36	62.26	899.95	37.74
11	20/04/2015	59.53	15270.62	20.41	9686.47	63.43	5584.15	36.57
13	11/06/2015	57.82	12040.18	16.57	7255.84	60.26	4784.34	39.74%
14	20/07/2015	54.99	14733.17	21.32	9188.22	62.36	5544.95	37.64%
15	19/09/2015	96.57	41998.65	34.60	19611.91	46.70	22386.75	53.30
17A	21/10/2015	23.80	6588.59	22.03	2175.72	33.02	4412.87	66.98
17B	21/10/2015	15.79	12836.00	64.69%	5159.03	40.19	7676.97	59.81
18	22/10/2015	32.46	8266.57	20.26	4421.41	53.49	3845.16	46.51
19	28/12/2015	18.79	2461.62	11.64	1287.25	52.29	1174.37	47.71
20	20/03/2016	50.08	5427.38	8.62	3699.86	68.17	1727.52	31.83
21	25/03/2016	100.98	41021.97	32.32	27815.36	67.81	13206.60	32.19
22	23/04/2016	32.10	4081.53	10.12	2729.21	66.87%	1352.33	33.13
23	24/04/2016	57.91	18985.10	26.08	10072.06	53.05%	8913.04	46.95
25	17/10/2016	64.06	17119.04	21.2	12047.88	70.38%	5071.16	29.62
27	18/10/2016	24.34	11515.75	37.65	7575.14	65.78%	3940.62	34.22

Ppt – precipitação (mm), QT – vazão total (m³), Q/P – porcentagem de escoamento (%), ES – escoamento superficial (m³), ES/Qt – escoamento superficial/vazão total (%), ESS – escoamento subsuperficial, ESS/Qt – escoamento subsuperficial/vazão total (%). Fonte: Elaborado pelo autor.

Os valores dos parâmetros de entrada do modelo obtidos para vegetação (Manning's n, surface cover, crop height, LAI, cohesion roots, stone fraction, rr), e solos (sat, porosity, psi initial, initial moisture content, soildep, D50 median texture, cohesion soil, aggregate stability) pelo monitoramento para cada evento foram tabelados (unitbase.txt e soiltable.txt) e submetidos ao *script* programado especialmente no SIG PcRaster para montagem dos mapas de entrada do LISEM, organizados em pastas por evento. Com a base de dados dos eventos preparada e organizada desta forma, foram configuradas as opções de execução do programa do LISEM para simulação dos eventos. Entre as principais configurações para as simulações dos eventos foram adotados o *timestep* de 20 segundos, utilizando o método de infiltração de Green & Ampt de única camada e com *splashdelivery ratio* de 0.05. A equação de desagregação pelo impacto da gota da chuva considerou estudos anteriores realizados na própria bacia, com cálculo da energia de desagregação com base na equação $KE = 15.204 * (I)^{1.126}$ mantida na mesma forma neste estudo.

A calibração hidrológica dos eventos procurou equalizar a descarga total líquida obtida nas simulações dos eventos pelo LISEM com o escoamento superficial obtido após a aplicação do filtro de separação do escoamento dos eventos. Apenas

foi atuado sobre a umidade inicial do solo a cada calibração de evento, que é uma das variáveis com impacto sobre a calibração do ES. Valores de condutividade hidráulica saturada, porosidade e tensão matricial atribuídos ao solo, e os demais parâmetros atribuídos para a cobertura que influenciam no montante do ES, como n de Manning e declividade, foram mantidas constantes a partir dos valores iniciais estimados para a condição de cada cobertura e para cada evento. A umidade do solo foi ajustada de forma proporcional entre os diferentes tipos de solo e suas áreas de cobertura. Os valores de escoamento obtidos na Tabela 4 são cenários de participação de ES e ESS nos eventos, que calibrados no modelo oferecem uma condição padrão de cada evento para a avaliação da PS em função das equações de eficiência da desagregação.

Após a calibração dos escoamentos superficiais, foi realizada a calibração da produção de sedimentos dos eventos utilizando a nova proposição de equação de eficiência de desagregação (E2) representada pela equação (4), com a alteração unicamente do parâmetro de coesão do solo de forma também proporcional para todos os solos, conforme a necessidade de aumentar ou diminuir a produção de sedimentos. Atingida a condição de melhor ajuste na produção de sedimentos nesta equação para cada evento, foram então simuladas as demais equações (E1 e E3) de acordo com os valores de coesão encontrados na calibração de sedimentos com a E2. Neste processo, todos os demais parâmetros foram mantidos constantes entre os testes com as diferentes equações.

Simulados os eventos no LISEM, os valores de escoamento superficial e produção de sedimentos simulados pelas diferentes equações foram comparados estatisticamente com os observados pelo monitoramento segundo os coeficientes de eficiência de Nash and Sutcliffe (1970) dado por:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Em - Es)^2}{\sum_{i=1}^n (Em - E)^2} \quad (23)$$

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 o número de observações.

Valores de NSE iguais ou próximos da unidade, indicam um melhor ajustamento das simulações com os dados observados, indicando que nesta condição, o modelo calibrado opera melhor do que a simples utilização de um modelo estatístico que considera valores médios observados. As simulações também foram analisadas em função do Pbias, que representa o desvio dos dados simulados em relação aos observados, dado por:

$$Pbias(\%) = \frac{Es - Em}{Em} * 100 \quad (24)$$

Onde: *Es* é a variável simulada, *Em* a variável observada.

Através dos dados da produção de sedimentos associados à descarga hidráulica monitorada de eventos a campo com instrumentação automática devidamente calibrada, coletas de amostras de sedimentos manuais com análises laboratoriais, a detalhada caracterização do relevo da bacia para definição dos parâmetros de entrada, a aplicação de uma rotina de separação de escoamentos que permite de forma simplificada estimar a participação do escoamento superficial nos eventos, espera-se obter condições para avaliar o comportamento das diferentes equações de eficiência da desagregação na geração de resultados de estimativa da produção de sedimentos nos eventos. Atuando tão somente em um dos principais parâmetros de controle do processo hidrológico que afeta a geração do escoamento superficial que se altera entre eventos, a umidade inicial do solo, e minimamente no parâmetro de controle responsável pelo processo de desagregação do solo pelo escoamento superficial, no caso o valor mensurado de sua coesão, espera-se estabelecer cenários para o teste das equações e a avaliação comparativa dos resultados de produção de sedimentos proporcionados por estas equações para as condições de solos coesivos da região onde foram aplicadas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Um conjunto robusto de dados sobre eventos da bacia do Arroio Lajeado Ferreira, associado com detalhada caracterização do relevo e dos parâmetros de ajuste do modelo relacionados com o uso e solos, serviu de base para aplicação e análise do desempenho do modelo LISEM com diferentes equações de eficiência de desagregação, considerando a escala de bacia hidrográfica rural.

4.1 CARACTERÍSTICAS DOS EVENTOS

A disponibilidade das fontes de sedimento como fator de variabilidade para o processo de calibração fica evidente em alguns eventos do grupo simulado. Os eventos do grupo são heterogêneos, alguns apresentam comportamento complexo, com grande volume de descarga total (25/03/16, 19/09/15, 05/06/14), mas pouca PS em relação a este volume, e também eventos onde baixos volumes de ES (01/01/14, 24/02/15, 08/04/14) mostram altas PS exportadas. Para 17 dos 20 eventos considerados, existe um comportamento médio da relação ES e PS que pode ser previsto segundo a equação $SY = 5E - 08X^2 - 0,0002X + 3,6376$, com $R^2 = 0,95$.

No caso particular da bacia utilizada neste estudo, Minella et al. (2018) em trabalho sobre análise da produção de sedimentos afetada pelo uso e manejo na bacia de Arvorezinha, levantou uma série de dados sobre precipitação, vazão e CSS para os anos 2003 a 2016 ocorridos no exutório desta bacia. Plotando os dados anuais sobre precipitação, descarga total e produção de sedimentos específica obtidos da série, observamos que existe uma relação positiva entre a precipitação e os valores de descarga total, indicando que o comportamento hidrológico das taxas de escoamento total na bacia possui uma relação com os volumes de precipitação. Entretanto, o mesmo não é tão evidente quando se relacionam informações sobre a produção de sedimentos específica e os dados de descarga total. Esta visão indica que outros fatores ligados às condições de disponibilidade de sedimentos na bacia para serem desagregados, transportados ou depositados, como o uso e manejo, estão interferindo nesta relação entre descarga e produção de sedimentos na escala de bacia, sendo que os autores avaliaram a variabilidade temporal desta relação como sendo decorrente de práticas de manejo conservacionistas adotadas nos diferentes períodos.

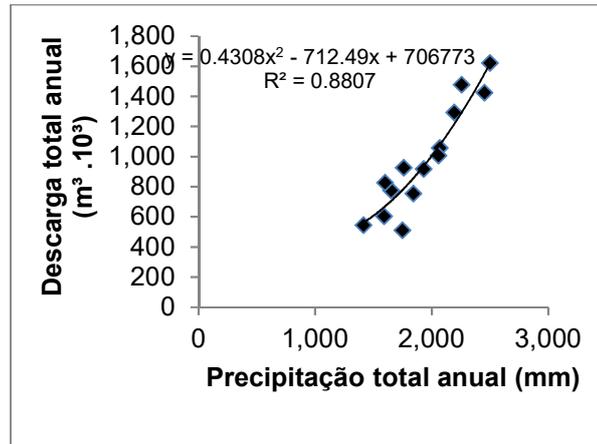


Figura 7 - Relação entre precipitação e descarga total anual sobre a bacia

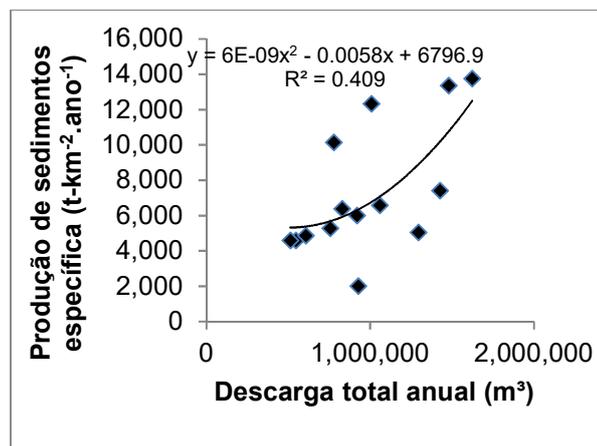


Figura 8 - Relação entre descarga líquida anual e produção de sedimentos específica na bacia

Um monitoramento contínuo destas variáveis hidrológicas permitiu conseguir capturar a variabilidade que ocorre nos processos erosivos na escala temporal de mais de uma década, evidenciando que o processo de calibração de um evento de forma pontual pode não ser válido para a condição de um grupo maior de eventos quando se considera uma bacia hidrográfica.

Na escala temporal de eventos, para o conjunto de eventos que seguem está dinâmica positiva entre descarga e PS, a equação E2 contempla bem o comportamento predominante da PS em função dos escoamentos, mas é incapaz de prever os eventos mais complexos que não seguem esta lógica, como os representados em A, B e C na Figura 6. Estudos mostram que entre as possíveis causas desta variabilidade pode incluir a participação das estradas não pavimentadas

e sujeitas a regulares ações de manutenção por máquinas pesadas, como fonte de aportes importantes de sedimentos prontamente mobilizáveis que se renovam a cada intervenção de conservação das mesmas. Nesta bacia, estudo sobre fontes de sedimentos com técnicas de *fingerprint* encontrou significativa participação de exportação de sedimentos no exutório oriundo das estradas não pavimentadas na bacia em estudo (MINELLA et al., 2007, 2008).

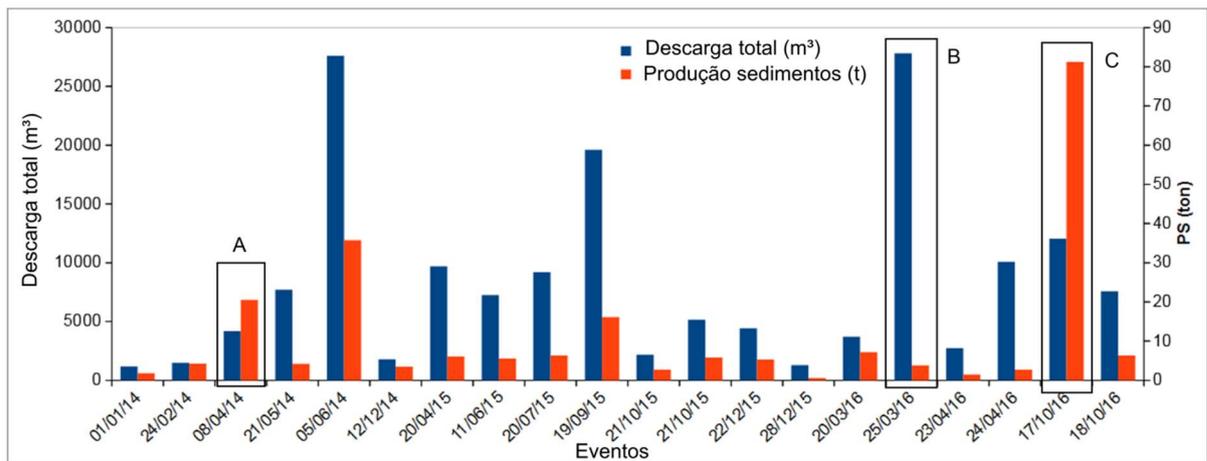


Figura 9 - Eventos selecionados para modelagem

A avaliação da capacidade preditiva do modelo está condicionada, portanto, não apenas a ajustes frequentes de seus parâmetros entre as simulações para representar as condições presentes nos eventos (LEFRANCQ et al., 2017), mas também considerar o comportamento deles sobre uma ampla base de eventos de diferentes épocas e condições. O processo de desagregação ocorrido em um evento pode não se refletir em partículas e agregados totalmente mobilizados das encostas para o exutório durante este mesmo evento, em função dos processos de deposição ao longo da bacia e características da intensidade e duração da precipitação. Logo, o montante de sedimentos desagregados proporcionado por certo cenário de uso e de atuação da precipitação em um evento, pode se refletir na PS também em eventos posteriores pelos processos de transporte. Mesmo no contexto da modelagem de base física destinada a eventos sobre bacias, é importante considerar a calibração para um conjunto amplo de eventos a fim de avaliar a variabilidade do comportamento deles que não podem ser previstos pelo homem nem pelo modelo (MINELLA et al., 2018; MINELLA; WALLING; MERTEN, 2014; VANMAERCKE et al., 2012).

4.2 CALIBRAÇÃO DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL

Uma prática convencional no processo de modelagem da erosão em bacias, é em primeiro lugar buscar a calibração da componente hidrológica dos eventos, pois identificar o volume correto de escoamento superficial do evento ser fundamental para calibrar a PS e a atuação das equações de desagregação, que são basicamente funcionais sobre a potência de escoamento. A calibração do escoamento superficial dos eventos foi obtida pela aplicação dos parâmetros de umidade inicial do solo para a condição imediatamente anterior ao início dos eventos, apresentados na Tabela 4. Nesta tabela, são apresentados os valores observados de escoamento superficial total nos eventos (m^3), sendo estes considerados como os obtidos pelo cálculo da separação do escoamento pelo filtro matemático. Os valores simulados foram os obtidos pelo LISEM para cada evento, após o ajuste calibrado dos valores do parâmetro de umidade do solo.

O processo de geração do ES, relacionado com a taxa de infiltração de água no solo no modelo é calculado com base nas características dos solos em termos de porosidade total, conteúdo de umidade inicial, condutividade hidráulica saturada e tensão matricial do solo. A calibração do ES pode ser realizada pela atuação sobre estes fatores, componentes de ajuste presentes na equação de infiltração de Green & Ampt, utilizada no modelo. Mas segundo Sheikh et al.(2010), diferentes interpretações a respeito da importância relativa que cada parâmetro apresenta para a formação do ES, dependendo das condições dos eventos. Várias são as formas de calibrar hidrologicamente o modelo: atuando sobre a umidade inicial, ou sobre a condutividade hidráulica saturada, ou sobre ambas as variáveis. A determinação destas variáveis a campo é bastante restrita, sendo que amostras são retiradas do meio natural e submetidas a testes em laboratório, um processo de alto custo e trabalho para ser aplicado a grandes áreas ou número de amostragens. O uso de interpoladores e técnicas geoestatísticas para seu mapeamento são alternativas possíveis, mas nem sempre efetivas na modelagem que tem alto nível de complexidade. Destas variáveis, a umidade inicial do solo antecedente aos eventos é a de mais fácil obtenção, pois ela pode ser determinada com certa facilidade com instrumentação a campo ou por modelos físicos ou empíricos específicos (GOMES et al., 2008). O foco da calibração foi o ajuste da umidade para obter a mesma descarga total simulada com os dados de descarga dos eventos, sendo estes submetidos ao

tratamento de separação do escoamento. As incertezas sobre este procedimento de separação no cálculo da proporção de escoamento superficial e subsuperficial foi absorvida pelo parâmetro umidade do solo, calibrada sem alterações nos valores de condutividade hidráulica, assumindo que esta não se altere como variável aplicada no modelo de Green & Ampt.

A atuação sobre a umidade do solo não apresentou valores fora do contexto dos limites fisicamente plausíveis, de acordo com os valores finais para a calibração, sendo que a proporcionalidade de variação percentual aplicada sobre a umidade para os diferentes solos foi realizada sobre a seguinte ordem: Estradas > Argissolos > Cambissolos > Neossolos > Várzeas, seguindo a probabilidade e amplitude de variação esperada em função da exposição do solo, posição no relevo da bacia e características do solo em termos de porosidade e cobertura vegetal predominante sobre os mesmos. A umidade do solo é um fator primário de ajuste do qual derivam outras variáveis de controle da infiltração no solo, sendo sua variabilidade espacial nos solos e superfície de relativa mais fácil determinação a campo. Seu correto mapeamento pode diminuir as fontes de incertezas sobre a origem do ES na bacia e também na representação nos modelos (ROBINET et al., 2018).

A condutividade hidráulica saturada é uma variável que representa a taxa de infiltração máxima de água no solo quando este atinge a condição de saturação. Seu uso está acoplado à equação de Green & Ampt para cálculo da taxa de infiltração em função também da umidade do solo. Estudos anteriores de calibração do modelo através da atuação conjunta sobre a umidade do solo, condutividade hidráulica saturada e tensão matricial, geralmente necessitaram calibrar a K_{sat} com valores bem abaixo dos que inicialmente previstos pelos ensaios de infiltração a campo por infiltrômetros de anel (DALBIANCO, 2013; DE BARROS et al., 2014).

A manutenção de K_{sat} em valores fixos e baixos para os eventos simulados neste trabalho apoiou-se nesses resultados, para facilitar o processo de calibração do escoamento superficial nos eventos desta bacia. Além disso, valores baixos de K_{sat} estão coerentes com as características dos solos, de menor profundidade e permeabilidade no caso dos Neossolos e Cambissolos, e pela presença de camada impeditiva nos Argissolos.

Tabela 3 - Resultados do procedimento de calibração do volume de escoamento superficial dos eventos.

Evento	Calibração da Umidade Volumétrica Inicial dos Solos (cm ³ /cm ³)					ES Obs (m ³)	ES Sim (m ³)	NSE	PBias
	Data	Neos.	Cambis.	Argis.	Varzea				
01/01/14	0.314	0.471	0.490	0.315	0.393	1174	1088	1.000	-7.90
08/04/14	0.166	0.250	0.260	0.186	0.232	4175	4043	1.000	-3.26
21/05/14	0.241	0.361	0.376	0.251	0.313	7700	7914	0.999	2.70
05/06/14	0.282	0.422	0.440	0.286	0.358	27587	26528	0.992	-3.99
12/12/14	0.270	0.405	0.422	0.276	0.345	1778	1816	1.000	2.09
24/02/15	0.273	0.410	0.427	0.279	0.349	1848	1389	0.999	-33.05
20/04/15	0.236	0.353	0.368	0.246	0.308	9686	9781	1.000	0.97
11/06/15	0.225	0.338	0.352	0.237	0.296	7256	7274	1.000	0.25
20/07/15	0.241	0.361	0.376	0.251	0.313	9188	8917	0.998	-3.04
19/09/15	0.174	0.261	0.272	0.192	0.240	19612	19749	0.999	0.69
21/10/15	0.284	0.426	0.444	0.289	0.361	2176	2199	1.000	1.05
21/10/15	0.314	0.470	0.490	0.313	0.393	5159	5141	1.000	-0.35
22/12/15	0.266	0.399	0.416	0.273	0.341	4421	4511	1.000	2.00
28/12/15	0.293	0.440	0.458	0.296	0.371	1287	1281	1.000	-0.47
20/03/16	0.136	0.204	0.212	0.159	0.198	3699	3735	1.000	0.96
25/03/16	0.225	0.338	0.352	0.237	0.296	27815	27960	1.000	0.52
23/04/16	0.264	0.396	0.412	0.271	0.338	2729	2730	1.000	0.04
24/04/16	0.241	0.361	0.376	0.251	0.313	10072	10319	0.998	2.39
17/10/16	0.214	0.321	0.334	0.227	0.284	12048	11858	0.998	-1.60
18/10/16	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 calibrado; NSE – Índice de Nash Sutcliffe; PBias – Desvio Pbias. Fonte: Elaborado pelo autor.

Parte do resultado da produção de sedimentos nos modelos físicos está sob responsabilidade da correta determinação, mapeamento e calibração das variáveis de cunho hidrológico, como a estimativa da rugosidade superficial (THOMSEN et al., 2015), a umidade do solo e a condutividade hidráulica do solo (HU et al., 2015). No entanto, a representação da origem do ES de forma distribuída nos eventos é bastante difícil de ser reproduzida com perfeição nos modelos, pois está sujeita a grande variabilidade espacial. Embora seja desejável obter a melhor representação possível da distribuição espacial da infiltração de água no solo em modelos distribuídos, o que levaria a uma melhor representação da formação do ES e do processo de desagregação associado, o objetivo principal do procedimento de calibração hidrológica neste estudo visou apenas em oferecer cenários semelhantes de ES em termos de volume total de escoamento exportado na bacia a ser aplicado em cada evento para o teste comparativo das equações. Optou-se então pela calibração apenas sobre os valores de umidade inicial do solo, mantendo as demais variáveis constantes. Segundo os resultados apresentados na Tabela 4, procedendo está calibração simplificada obteve-se um bom ajuste do volume da descarga líquida total simulada para cada evento, certificando-se que não haja alterações no cálculo da

desagregação devido a diferentes calibrações dos parâmetros de solo entre as simulações com as diferentes equações.

Os valores de NSE e PBias indicam um ajuste excelente do volume total de ES simulado para praticamente todos os eventos, mesmo com características bastante heterogêneas. As alterações dos valores de umidade foram realizadas de forma proporcional aos diferentes tipos de solos, e não sobre a distribuição espacial dos usos, como realizado em trabalhos anteriores de Dalbianco e Barros. Esta abordagem se justifica por ser a umidade do solo uma característica essencialmente ligada ao perfil do solo como unidade de armazenamento, que vai responder sobre o cálculo da infiltração segundo a sua distribuição espacial na bacia. O uso do modelo de Green & Ampt em camada simples se mostrou satisfatório para a modelagem do ES, permitindo uma calibração com atuação sobre um menor número de variáveis. Segundo os parâmetros aplicados e a distribuição espacial do mapa de solos, mostrou-se eficiente para calibrar a totalidade de eventos de diferentes magnitudes testados neste conjunto.

A representação da declividade e do caminho da direção do fluxo que também influencia a velocidade de escoamento, representando o formato das encostas que atuam nos processos de aceleração do ES, são pontos atendidos pela preparação de dados de entrada do relevo. Outros aspectos, como a representação de pontos de conectividade das encostas com os canais e a eficiência de certas barreiras naturais ou artificiais que interferem no transito do escoamento e na retenção dos sedimentos são igualmente difíceis de representar plenamente nos modelos, visto que estas podem sofrer alterações rápidas de disponibilidade entre e intra-eventos impactando na qualidade dos resultados simulados (FRYIRS, 2013). As estradas, por exemplo, desempenham um papel importante na dinâmica hidrológica da bacia, apesar de sua pequena área de participação sobre a mesma, em torno de 2,4%, favorecendo a velocidade do escoamento em sulcos profundos em suas laterais e aumentando a conectividade dos fluxos com os canais de drenagem principais sobre a bacia (MINELLA et al., 2007; PECHENICK et al., 2014; VAN DIJK; AUZET; LEMMEL, 2005). Como a conectividade das estradas com o canal em alguns pontos é bastante direta e com alto volume e energia do escoamento, o transporte de sedimentos nesses pontos é bastante eficiente. Neste trabalho as estradas participaram do mapa de uso e no mapa de solos, atribuindo parâmetros específicos à sua condição em termos de inexistente cobertura vegetal sobre o solo, impacto direto pela chuva, condição de

baixa rugosidade superficial favorecendo pouco armazenamento na superfície, cobertura por pedras diminuindo a sua permeabilidade, baixa permeabilidade e porosidade e condições de umidade.

A melhoria do relevo foi obtida por levantamentos precisos com equipamentos de tecnologia GNSS-RTK com precisão de três a sete milímetros na cota altimétrica do relevo base. Esta precisão aliada ao uso de uma resolução espacial do raster de entrada ao modelo de 5 m, escala aplicada também para a representação espacial dos atributos de solo e de cobertura vegetal de forma razoável, propiciou qualidade na representação da declividade entre as células e sua participação no cálculo da potência de escoamento do fluxo, juntamente com a componente de velocidade. Trabalhos anteriores realizados em outros locais e na própria bacia apontaram a necessidade de considerar a qualidade dos dados do DEM sobre os resultados do LISEM (DE BARROS et al., 2014; HESSEL; VAN DEN BOSCH; VIGIAK, 2006; JETTEN; GOVERS; HESSEL, 2003). A velocidade do ES é calculada com base na equação de Manning, sendo que o parâmetro N é utilizado de forma indireta no modelo. O valor de N representa a ação da rugosidade da superfície sobre a velocidade do ES em função das características hidráulicas de rugosidade da superfície. No modelo LISEM, a ação da rugosidade é atribuído pelos valores de N tabelados para calcular a velocidade, com incertezas consideráveis sobre seu valor real atuando a campo.

Certo nível de simplificações adotadas na modelagem, mesmo em modelos físicos avançados como o LISEM representam restrição para a plena determinação das origens do ES e sua ação sobre a desagregação. Sua habilidade de simular processos erosivos em superfície precisa ser validada em função de dados distribuídos sobre o ES obtidos sobre as encostas em alta resolução espacial. Por outro lado, o monitoramento pontual no exutório de uma bacia da descarga líquida e de sedimentos também está desconectado em parte dos processos erosivos nas encostas, eventualmente submetidas à mistura de escoamentos de outras origens e dos processos de transporte e deposição. A simulação do ES no modelo com base na calibração pelo volume total de escoamento, permite inferências com ressalvas sobre a qualidade do processo de desagregação com o uso de equações, pois estão sujeitas à incertezas que necessitam de ajustes mais localizados para refletir o processo de forma distribuída nas encostas.

4.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE A DINÂMICA DA PS NA BACIA.

A modelagem com o LISEM, tanto na componente hidrológica como na de erosão do solo, é influenciada pela qualidade da representação do meio físico, pela rotina de calibração utilizada e pela representatividade das equações matemáticas em reproduzir os processos físicos que acontecem no fenômeno da erosão. Melhores resultados da modelagem são esperados pelo fornecimento de melhor qualidade dos parâmetros de entrada e melhor caracterização do meio, mas menos freqüentemente atuamos sobre o sistema de equações do modelo. Em estudos anteriores com o LISEM, onde foram utilizadas versões do programa mais simplificadas e ainda com presença de erros de programação, havia apenas maior flexibilidade de atuação nos parâmetros ligados à formação do escoamento superficial, e menor nos ajustes da desagregação, dificultando a calibração da estimativa da PS (DE BARROS et al., 2014; RODRIGUES et al., 2014; STARKLOFF; STOLTE, 2014). Nestes estudos foi possível obter um bom ajuste hidrológico, mas nem sempre foi possível obter bom ajuste para a componente de sedimentos. As causas da incompatibilidade de simular satisfatoriamente a PS pelo modelo LISEM para as condições de uma bacia hidrográfica rural no sul do Brasil foram exploradas neste estudo do ponto de vista da qualidade preditiva das equações do modelo. Foram testadas diferentes estruturas matemáticas da equação de eficiência de desagregação no modelo LISEM para simulação da PS de 20 eventos de chuva-vazão em uma bacia hidrográfica agrícola. Para isso, procurou-se manter a mesma intensidade de potência de escoamento e volume de escoamento superficial sobre as células, aliada com a melhoria da representação do relevo da bacia, da declividade e o caminho de fluxo sobre eventos de precipitação, e compará-los com dados de PS efetivamente medidos, mantendo valores de coesão do solo tão próximos quanto possível dos obtidos em leituras diretas a campo pelo método do Torvane.

A Tabela 5 apresenta os valores de PS observados dos eventos, e os respectivos valores de PS obtidos pelas simulações com as três equações de eficiência de desagregação propostas pelo LISEM (E1, E3 e E2), seguidos por valores de PBIAS e COE obtidos nos resultados simulados considerando a estatística para o universo dos 20 eventos monitorados. Neste conjunto de simulações foram utilizados os valores iniciais propostos na tabela 3, sem nenhuma calibração adicional entre as rodadas.

A Tabela 6 apresenta os resultados simulados obtidos com a calibração dos valores de coesão do solo para cada uso em conjunto com a utilização da equação 2 de eficiência de desagregação, também seguido pelos valores de PBIAS e COE. O ajuste dos valores de coesão foi por tentativa e erro com sucessivas rodadas do modelo. Nesta etapa, em função de que no ano de 2016, seis eventos ocorreram espaçados de apenas algumas horas de intervalo, a calibração dos eventos do dia 20 e 25 de março, 23 e 24 de abril e 17 e 18 de outubro deste ano, foi realizada utilizando-se valores semelhantes de coesão para o par de eventos consecutivos, na hipótese que as condições do ambiente não tenham se alterado no espaço de algumas horas em termos de coesão do solo.

As simulações iniciais dos eventos, com a aplicação de valores de coesão do solo sobre os usos de acordo com o proposto na Tabela 3, resultaram nos valores de PS, COE e PBIAS para cada uma das equações apresentados na Tabela 5. O coeficiente de resultados NSE dos eventos para a equação E1 esteve entre -59.368,15 (25/03/16) e 0,21 (24/02/15), com PBIAS entre -460,15 (25/03/16) e -1,42 (24/02/15). O NSE geral para todos os eventos foi -1.340,72, com PBIAS médio de -70,30. O PBIAS apurado com a equação E1 resultou em valores de desvios percentuais negativos extremamente elevados, que representam uma superestimativa da PS nas simulações. Da mesma forma os valores de NSE estão muito abaixo do ajuste considerado perfeito (NSE = 1,00), com grande magnitude de valores negativos, na casa das centenas e milhares de vezes, considerados inadequados. Para a equação E3 testada na seqüência, uma das novas alternativas oferecidas pelo modelo, sempre com o mesmo ajuste hidrológico do ES aplicado no teste anterior, houve também uma superestimativa da PS com esta equação para os valores de coesão aplicados, mas com valores menores que com a equação E1, com redução média de 38% (28% - 52%) na PS com o uso desta equação em relação à primeira. Os resultados com esta equação obtiveram valores de NSE entre -25.155,12 (25/03/16) e 0,79 (24/02/15), com PBIAS entre -299,53 (25/03/16) e -0,72 (24/02/15). O NSE geral para os eventos nesta simulação foi de -512,77, com PBIAS médio de -44,00.

Tabela 4 - Resultados da produção de sedimentos obtida com valores padrões de referência para coesão do solo.

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

SY Obs: Produção sedimentos observada; SYE1: Produção sedimentos simulada pela equação E1; SYE3: Produção de sedimentos simulada pela equação E3; SYE2: Produção sedimentos simulada pela equação E2.

Finalmente com o uso da equação E2 houve uma efetiva redução da PS dos eventos, trazendo o patamar de diferenças entre os valores observados e simulados para a casa da unidade e décimos de unidade (em ton.). O PBIAS ficou entre -7,18 (25/03/16) e 0,96 (24/02/15), com média em -0,09, e o NSE ficou entre -13,45 (25/03/16) e 0,99. O NSE geral do modelo para o conjunto de eventos foi de -0,09, considerados aqui todos os 20 eventos. Apenas com atribuição de valores de coesão segundo valores próximos aos mensurados a campo, aliados ao uso da equação de eficiência E2, podemos encontrar valores bastante satisfatórios de resultado preditivo do modelo, mesmo considerando o comportamento irregular de alguns eventos que não foram bem representados e pioraram o seu desempenho geral.

A ação conjunta entre equação de eficiência e valor de coesão acoplada a esta equação é o que determina a representação da propensão que o solo tem para ser desagregado. A equação de eficiência tem a meta de ajustar o nível de desagregação nas células em função dos valores de coesão lidos a campo, refletindo o comportamento médio da desagregação deste tipo de solo. A função matemática inserida nesta equação exprime as alterações do padrão de erodibilidade do solo para diferentes valores de coesão. Embora seja um modelo configurável em seus parâmetros para diferentes condições do meio, suas equações dos processos foram inicialmente desenvolvidas com base em experimentos sob condições de laboratório com parcelas experimentais usando materiais uniformes e pouco coesivos (GOVERS, 1990, 1992). Os testes iniciais foram realizados em bacias sob menores intensidades de precipitações, relevos de características diferenciadas e condições de solos de maior erodibilidade, em relação aos que desejamos aplicar o modelo neste trabalho (DE ROO; WESSELING; RITSEMA, 1996a, 1996b; GOVERS et al., 1990; HESSEL, 2002). Estes estudos levaram à proposição da E1 como única opção de calibração disponível. O gráfico da Figura 5 apresenta um comparativo do efeito proporcionado pelas funções matemáticas das três equações disponíveis sobre o coeficiente multiplicador y a partir dos valores de coesão.

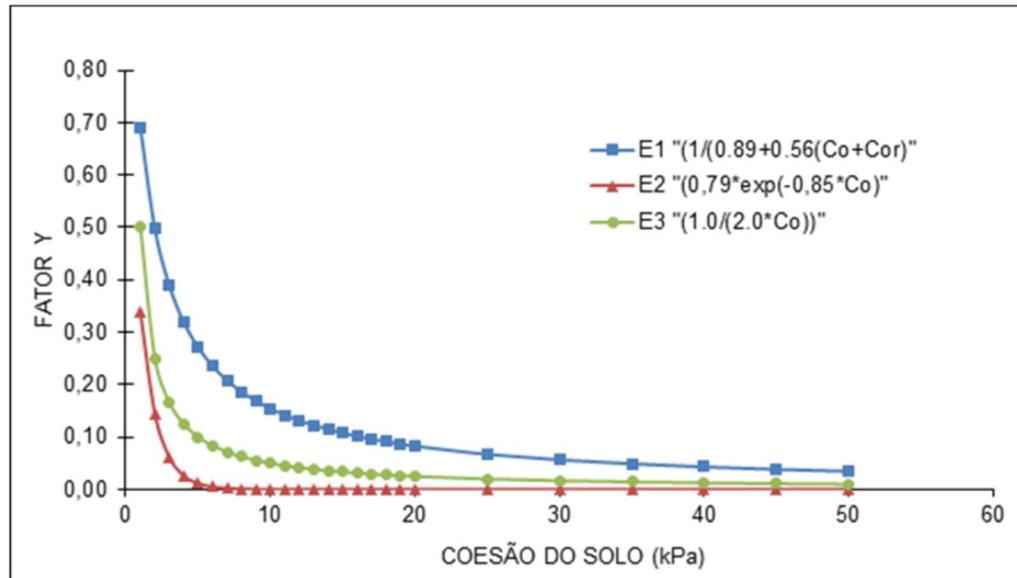


Figura 10 - Coeficiente Y em função da coesão do solo segundo as equações de eficiência de desagregação

A equação E2 a partir de valores de coesão acima de sete kPa já se mostra muito restritiva, tornando o fator $y = 0,0021$, sendo um multiplicador que diminui consideravelmente a desagregação. Para a E1 com coesão de sete kPa temos y em 0,2079, em torno de 100 vezes menos restritiva que a equação E2. O modelo LISEM, segundo a sua estrutura de cálculo matemático, promove sempre uma relação positiva entre o volume do ES e a desagregação.

A partir da vantagem preditiva da equação E2 perante as demais, procedeu-se a calibração específica dos eventos com uso desta equação, procurando ajustar a PS dos eventos, considerando que o parâmetro coesão do solo fica agora totalmente responsável pelo ajuste final para explicitar a PS em função das condições ambientais que o meio impõe ao ES. As sucessivas rodadas do modelo na busca do ajuste da PS de acordo com os valores de coesão resultaram nos apresentados na Tabela 4 para o conjunto de eventos, com valores de PS, PBIAS e NSE das simulações. Para a amplitude de variação da PS dos eventos monitorados, foi possível obter um bom ajuste da PS para todos eles, apenas com intervenção nos valores de coesão do solo. A política de alteração dos valores de coesão obedeceu a uma taxa de proporcionalidade entre os diferentes usos, propiciando as mesmas condições de ajuste para toda a área envolvida da bacia, sem evidenciar nenhum uso específico neste comparativo, mesmo que alguns possivelmente tenham influência maior sobre

a PS em eventos específicos, como as estradas. Assim, os resultados obtidos com a equação E2 e com a calibração da PS pelos valores de coesão, obtiveram PBIAS entre -5.800,70 (25/03/16) e 92,09 (17/10/16), e NSE entre -942,46 (25/03/16) e 1,00. Se desconsiderarmos os três eventos do conjunto que apresentaram comportamento diferenciado, os valores passam para NSE entre 0,82 (20/03/16) e 1,00 na maioria dos eventos, com PBIAS entre -5,47 (20/07/15) e 4,77 (05/06/14). Estes valores indicam uma capacidade preditiva muito boa para o conjunto de 17 dos 20 eventos calibrados com NSE entre 0,82 e 1,00, considerando o uso da equação E2.

Muito importante destacar neste momento, o principal destaque no uso da equação E2, que é como ela permitiu manter os valores de coesão usados na calibração muito próximos dos valores lidos em campo pelo Torvane. Para seis eventos, a variação de ajuste numérico da coesão foi em até 5%; para três eventos o percentual de variação foi entre 5% e 10%; e entre 10% e 20% para quatro eventos, entre os vinte testados. Ajustes dos valores da coesão dentro destes pequenos limites são justificáveis em função da incerteza das leituras da variável a campo, bem funções residuais que ele absorve como única variável de controle da desagregação em todo conjunto.

A configuração matemática do LISEM continua ainda sem capacidade de considerar o possível exaurimento das fontes de sedimentos sobre ela durante os eventos. Esta deficiência pode explicar a melhor resposta do modelo para solos mais profundos e menos coesivos, onde a característica de erodibilidade e profundidade de camada de solo a ser desagregado se aproximam mais da habilidade do modelo em representá-lo, em relação aos menos profundos e mais coesivos que apresentam maior resistência à desagregação pelo fluxo.

Mesmo assim, estes resultados indicam que com a nova equação de controle da eficiência de desagregação (E2), foi possível alcançar boa predição da PS, melhorando os resultados de NSE alcançados em comparação aos obtidos por (GRUM et al., 2017) e diminuiu a condição de superestimativa da PS pelo modelo, para condições de relevo com alta declividade e solos coesivos na bacia experimental de Arvorezinha.

Tabela 5 - Valores de coesão do solo ajustados e resultados de eficiência das simulações para a equação E2 (Baseada no EUROSEM).

Data evento	Coesão do solo - Calibrado													SY Obs	Equação E2		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13		SY E2 Cal	PBIAS (%)	NSE
01/01/2014	5.3	6.3	5.3	6.3	5.3	6.3	8.4	8.4	6.3	8.4	6.3	6.3	20.0	1.79	1.73	3.58	1.00
08/04/2014	3.3	3.9	3.3	3.9	3.3	3.9	5.2	5.2	3.9	5.2	3.9	3.9	20.0	20.54	20.66	-0.56	1.00
21/05/2014	7.4	8.4	7.4	8.4	7.4	8.4	10.5	10.5	8.4	10.5	8.4	8.4	20.0	4.17	4.01	3.91	1.00
05/06/2014	6.4	7.4	6.4	7.4	6.4	7.4	9.2	9.2	7.4	9.2	7.4	7.4	20.0	35.78	34.07	4.77	1.00
12/12/2014	4.4	5.3	4.4	5.3	4.4	5.3	7.0	7.0	5.3	7.0	5.3	5.3	20.0	3.47	3.34	3.83	1.00
24/02/2015	2.9	3.5	2.9	3.5	2.9	3.5	4.6	4.6	3.5	4.6	3.5	3.5	20.0	4.26	4.41	-3.52	1.00
20/04/2015	7.3	8.3	7.3	8.3	7.3	8.3	10.3	10.3	8.3	10.3	8.3	8.3	20.0	6.09	6.01	1.35	1.00
11/06/2015	7.0	8.0	7.0	8.0	7.0	8.0	10.0	10.0	8.0	10.0	8.0	8.0	20.0	5.52	5.42	1.74	1.00
20/07/2015	7.1	8.1	7.1	8.1	7.1	8.1	10.1	10.1	8.1	10.1	8.1	8.1	20.0	6.36	6.71	-5.47	0.99
19/09/2015	7.0	8.0	7.0	8.0	7.0	8.0	10.0	10.0	8.0	10.0	8.0	8.0	20.0	16.10	16.31	-1.29	1.00
21/10/2015	5.6	6.6	5.6	6.6	5.6	6.6	8.8	8.8	6.6	8.8	6.6	6.6	20.0	2.71	2.61	3.62	1.00
22/10/2015	6.4	7.3	6.4	7.3	6.4	7.3	9.1	9.1	7.3	9.1	7.3	7.3	20.0	5.79	5.81	-0.38	1.00
22/12/2015	5.3	6.4	5.3	6.4	5.3	6.4	8.6	8.6	6.4	8.6	6.4	6.4	20.0	5.32	5.36	-0.73	1.00
28/12/2015	6.1	7.0	6.1	7.0	6.1	7.0	9.0	9.0	7.0	9.0	7.0	7.0	20.0	0.58	0.59	-1.90	1.00
20/03/2016	4.2	5.0	4.2	5.0	4.2	5.0	6.5	6.5	5.0	6.5	5.0	5.0	20.0	7.16	6.87	4.12	0.99
25/03/2016	4.2	5.0	4.2	5.0	4.2	5.0	8.0	8.0	6.0	8.0	8.0	8.0	20.0	3.83	226.00	-5800.70	-942.46
23/04/2016	6.5	7.6	6.5	7.6	6.5	7.6	9.4	9.4	7.6	9.4	7.6	7.6	20.0	1.49	1.51	-1.61	1.00
24/04/2016	6.5	7.6	6.5	7.6	6.5	7.6	9.4	9.4	7.6	9.4	7.6	7.6	20.0	2.69	12.21	-353.86	-0.29
17/10/2016	7.0	8.0	7.0	8.0	7.0	8.0	10.0	10.0	8.0	10.0	8.0	8.0	20.0	81.26	6.43	92.09	-0.14
18/10/2016	7.0	8.0	7.0	8.0	7.0	8.0	10.0	10.0	8.0	10.0	8.0	8.0	20.0	6.35	6.60	-4.00	1.00

1 - Tabaco CT; 2 - Tabaco MT; 3 - Soja CT; 4 - Soja MT; 5 - Milho CT; 6 - Milho MT; 7 - Pousio; 8 - Floresta; 9 - Pastagem; 10 - Açudes; 11 - Casas; 12 - Estradas; 13 - Canais; SY Obs - Produção sedimentos observada; SY E2 Cal - Produção de sedimentos simulada e calibrado pela equação E2. Fonte: Elaborado pelo autor.

5 CONCLUSÕES

Houve diferenças significativas entre as equações de eficiência de desagregação testadas para a simulação da produção de sedimentos, sendo que a equação $y = 0.79 \exp(-0.85 Co)$ oriunda do modelo EUROSEM apresentou os valores de produção de sedimentos simulados no modelo LISEM mais próximos dos observados para 85% de vinte eventos do conjunto testado. Com o uso desta equação foi possível manter os valores de coesão do solo na calibração relativamente próximos dos valores obtidos em campo. Este resultado foi obtido a partir de uma boa calibração da descarga líquida dos eventos aliada com uma boa estimativa da produção de sedimentos, reduzindo a superestimativa obtida pelo modelo quando utilizando as demais equações, obtida em estudos anteriores.

Os altos coeficientes de ajuste obtidos nas simulações destes eventos de comportamentos heterogêneos, compreendendo três anos de monitoramento da bacia, possibilitam evidenciar a boa habilidade do modelo LISEM em simular a produção de sedimentos em bacias hidrográficas rurais sob relevo acentuado e solos de natureza mais coesiva. No entanto, três eventos que pelo seu comportamento não apresentaram correlação positiva entre potência de escoamento superficial e os níveis de desagregação do solo, lógica esta prevista pela estrutura matemática no modelo, obtiveram resultados insatisfatórios.

O uso da equação de eficiência de desagregação do modelo EUROSEM acoplada no modelo LISEM, aumenta a confiabilidade da modelagem da produção de sedimentos para solos mais coesos e abre possibilidade de reavaliar positivamente seu uso como ferramenta de estudos dos processos erosivos em escala de bacias rurais condicionadas pela influência do uso, manejo e práticas conservacionistas. Estudos complementares nesse sentido podem incluir a melhoria da representação espacial dos parâmetros de solo e cobertura e uma etapa de validação do modelo com um conjunto adicional de eventos monitorados.

REFERÊNCIAS

- AKSOY, H.; KAVVAS, M. L. A review of hillslope and watershed scale erosion and sediment transport models. **Catena**, [s. l.], v. 64, n. 2–3, p. 247–271, 2005.
- ARIZA-VILLAVARDE, A. B.; JIMÉNEZ-HORNERO, F. J.; GUTIÉRREZ DE RAVÉ, E. Influence of DEM resolution on drainage network extraction: A multifractal analysis. **Geomorphology**, [s. l.], v. 241, p. 243–254, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.03.040>>
- AUGÉ, R. M. et al. Moisture retention properties of a mycorrhizal soil. **Plant and Soil**, [s. l.], v. 230, n. 1, p. 87–97, 2001.
- BAARTMAN, J. E. M. et al. Linking landscape morphological complexity and sediment connectivity. **Earth Surface Processes and Landforms**, [s. l.], v. 38, n. 12, p. 1457–1471, 2013.
- BARROS, C. A. P. **Comportamento hidrossedimentológico de uma bacia hidrográfica rural utilizando técnicas de monitoramento e modelagem**. 2012. UNiversidade Federal de Santa Maria, [s. l.], 2012.
- BEASLEY, D. B.; HUGGINS, L. F.; MONKE, AmpEJ. ANSWERS: A model for watershed planning. **Transactions of the ASAE**, [s. l.], v. 23, n. 4, p. 938–944, 1980.
- BEVEN, K. **Environmental Modelling: An Uncertain Future**. Londres.
- BEVEN, K. Rainfall-runoff modelling: the primer. [s. l.], 2011.
- BEZAK, N. et al. Estimation of soil loss by the WATEM/SEDEM model using an automatic parameter estimation procedure. **Environmental Earth Sciences**, [s. l.], v. 74, n. 6, p. 5245–5261, 2015.
- BOER, M.; PUIGDEFÁBREGAS, J. Effects of spatially structured vegetation patterns on hillslope erosion in a semiarid Mediterranean environment: A simulation study. **Earth Surface Processes and Landforms**, [s. l.], v. 30, n. 2, p. 149–167, 2005.
- BONUMÁ, N. B. et al. Simulating Landscape Sediment Transport Capacity by Using a Modified SWAT Model. **Journal of Environment Quality**, [s. l.], v. 43, n. 1, p. 55, 2014. Disponível em: <<https://www.agronomy.org/publications/jeq/abstracts/43/1/55>>
- BRACKEN, L. J. et al. Concepts of hydrological connectivity: Research approaches, Pathways and future agendas. **Earth-Science Reviews**, [s. l.], v. 119, p. 17–34, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.02.001>>
- CHANDRAMOHAN, T.; VENKATESH, B.; BALCHAND, A. N. Evaluation of Three Soil Erosion Models for Small Watersheds. **Aquatic Procedia**, [s. l.], v. 4, n. 1, p. 1227–1234, 2015. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214241X15001571>>
- CHARTIN, C. et al. Quantifying and modelling the impact of land consolidation and

field borders on soil redistribution in agricultural landscapes (1954-2009). **Catena**, [s. l.], v. 110, p. 184–195, 2013.

CHEN, N.; MA, T.; ZHANG, X. Responses of soil erosion processes to land cover changes in the Loess Plateau of China: A case study on the Beiluo River basin. **Catena**, [s. l.], v. 136, p. 118–127, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2015.02.022>>

DALBIANCO, L. et al. Propriedades físico-hídricas do solo em função dos sistemas de uso e manejo em uma microbacia hidrográfica rural. In: **XXXII Congresso Brasileiro de Ciência do Solo.**, [s. l.], n. 1, p. 3–7, 2009.

DALBIANCO, L. et al. Relações Lineares Entre a Velocidade De Infiltração Básica E Outras Propriedades Físico-Hídricas Do Solo Em Uma Bacia Hidrográfica Rural - Xxxiii Congresso Brasileiro De Ciência Do Solo -. **Methods**, [s. l.], n. 1, p. 2–4, 2010.

DALBIANCO, L. Simulação hidrossedimentológica com o Modelo LISEM em uma pequena bacia hidrográfica rural. [s. l.], p. 91, 2013.

DE BARROS, C. A. P. et al. Description of hydrological and erosion processes determined by applying the LISEM model in a rural catchment in southern Brazil. **Journal of Soils and Sediments**, [s. l.], v. 14, n. 7, p. 1298–1310, 2014.

DE ROO, A. P. J.; JETTEN, V. G. Calibrating and validating the LISEM model for two data sets from the Netherlands and South Africa. **Catena**, [s. l.], v. 37, n. 3–4, p. 477–493, 1999.

DE ROO, A. P. J.; OFFERMANS, R. J. E.; CREMERS, N. H. D. T. LISEM: a single-event, physically based hydrological and soil erosion model for drainage basins. II: sensitivity analysis, validation and application. **Hydrological Processes**, [s. l.], v. 10, n. 8, p. 1119–1126, 1996.

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**, [s. l.], v. 10, n. 8, p. 1107–1117, 1996. a.

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**, [s. l.], v. 10, n. 8, p. 1107–1117, 1996. b.

DE VENETE, J. et al. Predicting soil erosion and sediment yield at regional scales: Where do we stand? **Earth-Science Reviews**, [s. l.], v. 127, p. 16–29, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.08.014>>

DESMET, P. J. J. **Gis Based Simulation of Erosion and Deposition in an Agricultural Landscape a Comparison of Model Results With Soil Map Info**, 1985.

DI LAZZARO, M. Correlation between channel and hillslope lengths and its effects on the hydrologic response. **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 362, n. 3–4, p. 260–273, 2008.

DIDON??, E. J.; MINELLA, J. P. G.; MERTEN, G. H. Quantifying soil erosion and sediment yield in a catchment in southern Brazil and implications for land conservation. **Journal of Soils and Sediments**, [s. l.], v. 15, n. 11, p. 2334–2346, 2015.

DIDONÉ, E. J.; MINELLA, J. P. G.; EVRARD, O. Measuring and modelling soil erosion and sediment yields in a large cultivated catchment under no-till of Southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, [s. l.], v. 174, n. 1000, p. 24–33, 2017.

EVRARD, O. et al. Modelling the impact of land use change and rainfall seasonality on sediment export from an agricultural catchment of the northwestern European loess belt. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, [s. l.], v. 138, n. 1–2, p. 83–94, 2010.

FOUCHER, A. et al. Increase in soil erosion after agricultural intensification: Evidence from a lowland basin in France. **Anthropocene**, [s. l.], v. 7, n. February, p. 30–41, 2014.

FRYIRS, K. (Dis)Connectivity in catchment sediment cascades: A fresh look at the sediment delivery problem. **Earth Surface Processes and Landforms**, [s. l.], v. 38, n. 1, p. 30–46, 2013.

GIMÉNEZ, R.; GOVERS, G. Flow Detachment by Concentrated Flow on Smooth and Irregular Beds. **Soil Science Society of America Journal**, [s. l.], v. 66, n. 5, p. 1475–1483, 2002.

GOMES, N. M. et al. Aplicabilidade do LISEM (Limberg Soil Erosion) para simulação hidrológica tropical. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, [s. l.], v. 32, n. 1, p. 2483–2492, 2008.

GOVERS, G. Empirical relationships for the transport capacity of overland flow. **IAHS Publication**, [s. l.], n. January 1990, p. 45–63 ST–Empirical relationships for the transp, 1990.

GOVERS, G. et al. A long flume study of the dynamic factors affecting the resistance of a loamy soil to concentrated flow erosion. **Earth Surface Processes and Landforms**, [s. l.], v. 15, n. 4, p. 313–328, 1990.

GOVERS, G. Evaluation of transporting capacity formulae for overland flow. **Overland flow: hydraulics and erosion mechanics.**, [s. l.], n. January 1999, p. 243–273 ST–Evaluation of transporting capacity, 1992.

GOVERS, G. et al. **The role of tillage in soil redistribution on hillslopes**, 1994. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2389.1994.tb00532.x>>

GOVERS, G.; GIMÉNEZ, R.; VAN OOST, K. Rill erosion: Exploring the relationship between experiments, modelling and field observations. **Earth-Science Reviews**, [s. l.], v. 84, n. 3–4, p. 87–102, 2007.

GOVERS, G.; RAUWS, G. Transporting capacity of overland flow on plane and on irregular beds. **Earth Surface Processes and Landforms**, [s. l.], v. 11, n. 5, p. 515–

524, 1986.

GRUM, B. et al. 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**, [s. l.], v. 159, n. August, p. 20–34, 2017.

GUERRA, A. J. T. et al. Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ Soil Erosion and Conservation in Brazil Erosão e Conservação de Solos no Brasil. [s. l.], v. 37, p. 81–91, 2014.

HENGSDIJK, H.; MEIJERINK, G. W.; MOSUGU, M. E. Modeling the effect of three soil and water conservation practices in Tigray, Ethiopia. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, [s. l.], v. 105, n. 1–2, p. 29–40, 2005.

HESSEL, R. Adapting the Lisem Model to Loess Plateau Conditions. [s. l.], 2002.

HESSEL, R. et al. Soil erosion simulations of land use scenarios for a small Loess Plateau catchment. **Catena**, [s. l.], v. 54, n. 1–2, p. 289–302, 2003.

HESSEL, R. Effects of grid cell size and time step length on simulation results of the Limburg soil erosion model (LISEM). **Hydrological Processes**, [s. l.], v. 19, n. 15, p. 3037–3049, 2005.

HESSEL, R.; JETTEN, V. Suitability of transport equations in modelling soil erosion for a small Loess Plateau catchment. **Engineering Geology**, [s. l.], v. 91, n. 1, p. 56–71, 2007.

HESSEL, R.; TENGE, A. A pragmatic approach to modelling soil and water conservation measures with a catchment scale erosion model. **Catena**, [s. l.], v. 74, n. 2, p. 119–126, 2008.

HESSEL, R.; VAN DEN BOSCH, R.; VIGIAK, O. Evaluation of the LISEM soil erosion model in two catchments in the East African Highlands. **Earth Surface Processes and Landforms**, [s. l.], v. 31, n. 4, p. 469–486, 2006.

HONG, Y. et al. Integrating atmospheric deposition, soil erosion and sewer transport models to assess the transfer of traffic-related pollutants in urban areas. **Environmental Modelling and Software**, [s. l.], v. 96, p. 158–171, 2017.

HU, W. et al. Effects of initial soil water content and saturated hydraulic conductivity variability on small watershed runoff simulation using LISEM. **Hydrological Sciences Journal**, [s. l.], v. 60, n. 6, p. 1137–1154, 2015.

JETTEN, V.; GOVERS, G.; HESSEL, R. Erosion models: Quality of spatial predictions. **Hydrological Processes**, [s. l.], v. 17, n. 5, p. 887–900, 2003.

JETTEN, V.; VAN DEN BOUT, B. LISEM Limburg Soil Erosion model v 3.9x: Documentation & User Manual. [s. l.], 2017.

KARSSENBERG, D. et al. A software framework for construction of process-based stochastic spatio-temporal models and data assimilation. **Environmental Modelling & Software**, [s. l.], v. 25, n. 4, p. 489–502, 2010.

KNAPEN, A. et al. Resistance of soils to concentrated flow erosion: A review. **Earth-Science Reviews**, [s. l.], v. 80, n. 1–2, p. 75–109, 2007.

KNISEL, W. G. CREAMS: a field scale model for Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems [USA]. **United States. Dept. of Agriculture. Conservation research report (USA)**, [s. l.], 1980.

KVÆRNØ, S. H.; STOLTE, J. Effects of soil physical data sources on discharge and soil loss simulated by the LISEM model. **Catena**, [s. l.], v. 97, p. 137–149, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2012.05.001>>

LADSON, A. et al. A standard approach to baseflow separation using the Lyne and Hollick filter. **Australian Journal of Water Resources**, [s. l.], v. 17, n. 1, p. 173–180, 2013.

LANE, L. J. Description of the US Department of Agriculture water erosion prediction project (WEPP) model. **Overland Flow**, [s. l.], p. 377–391, 1992.

LANGHANS, C. et al. Modeling scale-dependent runoff generation in a small semi-arid watershed accounting for rainfall intensity and water depth. **Advances in Water Resources**, [s. l.], v. 69, p. 65–78, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.advwatres.2014.03.005>>

LE GALL, M. et al. Examining suspended sediment sources and dynamics during flood events in a drained catchment using radiogenic strontium isotope ratios ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$). **Chemical Geology**, [s. l.], v. 449, n. January, p. 147–157, 2017.

LEFRANCQ, M. et al. Improving runoff prediction using agronomical information in a cropped, loess covered catchment. **Hydrological Processes**, [s. l.], v. 31, n. 6, p. 1408–1423, 2017.

LIN, K.; ZHANG, Q.; CHEN, X. An evaluation of impacts of DEM resolution and parameter correlation on TOPMODEL modeling uncertainty. **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 394, n. 3–4, p. 370–383, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.09.012>>

LONDERO, A. L. Perdas de água e sedimento de bacias pareadas de ordem zero sob plantio direto com e sem terraço. [s. l.], p. 2015, 2015.

MERTEN, G. H. **Dinâmica da erosão em sulcos alterada pela descarga sólida**. 2000. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, [s. l.], 2000.

MERTEN, G. H. et al. No-till surface runoff and soil losses in southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, [s. l.], v. 152, n. April, p. 85–93, 2015.

MERTEN, G. H.; MINELLA, J. P. G. WASWAC World Conference THE THREATS TO

LAND AND WATER RESOURCES IN THE 21. [s. l.], p. 1–14, 2013.

MERTEN, G. H.; MINELLA, J. P. G. Bedload flux in southern Brazilian basalt scarp. **IAHS-AISH Proceedings and Reports**, [s. l.], v. 367, n. November, p. 185–191, 2014.

MINELLA, J. P. G. et al. Identificação e implicações para a conservação do solo das fontes de sedimentos em bacias hidrográficas. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, [s. l.], v. 31, n. 6, p. 1637–1648, 2007.

MINELLA, J. P. G. et al. Sediment source fingerprinting: testing hypotheses about contributions from potential sediment sources. **IAHS-AISH publication**, [s. l.], n. 325, p. 31–37, 2008. Disponível em: <<http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=21383341>>

MINELLA, J. P. G. et al. Long-term sediment yield from a small catchment in southern Brazil affected by land use and soil management changes. **Hydrological Processes**, [s. l.], v. 32, n. 2, p. 200–211, 2018.

MINELLA, J. P. G.; WALLING, D. E.; MERTEN, G. H. Establishing a sediment budget for a small agricultural catchment in southern Brazil, to support the development of effective sediment management strategies. **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 519, n. PB, p. 2189–2201, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.10.013>>

MORGAN, R.P.C., QUINTON, J.N., SMITH, R.E., GOVERS, G., POESEN, J.W.A., AUERSWALD, K., CHISCI, G., TORRI, D., STYCZEN, M.E., FOLLY, A. J. . The European soil erosion model (EUROSEM): documentation and user guide. **Earth Surface Processes and Landforms**, [s. l.], v. 3, n. 6, p. 1–88, 1998.

MORGAN, R. et al. The European Soil Erosion Model (EUROSEM): documentation and user guide. [s. l.], n. July, p. 124, 1998.

MORGAN, R. P. C. **Soil erosion & Conservation**. [s.l: s.n.].

MORGAN, R. P. C.; MORGAN, D. D. V.; FINNEY, H. J. A predictive model for the assessment of soil erosion risk. **Journal of Agricultural Engineering Research**, [s. l.], v. 30, n. C, p. 245–253, 1984.

MORGAN, R. P. C.; QUINTON, J. N.; RICKSON, R. J. Modelling methodology for soil erosion assessment and soil conservation design: the EUROSEM approach. **Outlook on Agriculture**, [s. l.], v. 23, n. 1, p. 5–9, 1994.

MORO, M. Avaliação do modelo litem na simulação dos processos hidrossedimentológicos de uma pequena bacia rural localizada nas encostas basálticas do rio grande do sul. 2012. [s. l.], 2012.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. River flow forecasting through conceptual models part I: a discussion of principles. **Journal of Hydrology**, [s. l.], n. 10, p. 282–290, 1970.

NEARING, M. A. et al. Modeling response of soil erosion and runoff to changes in precipitation and cover. **Catena**, [s. l.], v. 61, n. 2–3 SPEC. ISS., p. 131–154, 2005.

NOH, S. J. et al. Simulation of soil moisture on a hillslope using multiple hydrologic models in comparison to field measurements. **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 523, n. APRIL, p. 342–355, 2015.

OLIVEIRA, F. P. De. Modelagem do escoamento superficial e da erosão hídrica em bacia rural em Arvorezinha, RS, utilizando o WEPP. [s. l.], p. 173, 2010.

PANDEY, A. et al. Physically based soil erosion and sediment yield models revisited. **Catena**, [s. l.], v. 147, p. 595–620, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2016.08.002>>

PAOLO, J. et al. Long-term sediment yield from small catchment in southern Brazil affected by land use and soil management changes . [s. l.], v. 17, p. 10803, 2015.

PECHENICK, A. M. et al. A multi-scale statistical approach to assess the effects of connectivity of road and stream networks on geomorphic channel condition. **Earth Surface Processes and Landforms**, [s. l.], v. 39, n. 11, p. 1538–1549, 2014.

PEREIRA, C. A. **Adaptações na teoria de Green-Ampt para modelar a infiltração de água no solo**. 2017. Universidade Federal de Santa Maria, [s. l.], 2017.

RAUWS, G.; COVERS, G. Hydraulic and soil mechanical aspects of rill generation on agricultural soils. **Journal of Soil Science**, [s. l.], v. 39, n. 1, p. 111–124, 1988.

ROBINET, J. et al. Spatial variability of soil water content and soil electrical conductivity across scales derived from Electromagnetic Induction and Time Domain Reflectometry. **Geoderma**, [s. l.], v. 314, n. May 2017, p. 160–174, 2018.

RODRIGUES, M. F. et al. Hydrosedimentology of nested subtropical watersheds with native and eucalyptus forests. **Journal of Soils and Sediments**, [s. l.], v. 14, n. 7, p. 1311–1324, 2014.

SHEIKH, V. et al. Sensitivity of LISEM predicted catchment discharge to initial soil moisture content of soil profile. **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 393, n. 3–4, p. 174–185, 2010.

Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.08.016>>

SOMAVILLA, A. Modelagem do excedente de infiltração para avaliar a funcionalidade hidrológica do solo. 2017. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, [s. l.], 2017.

STARKLOFF, T.; STOLTE, J. Applied comparison of the erosion risk models

EROSION 3D and LISEM for a small catchment in Norway. **Catena**, [s. l.], v. 118, p. 154–167, 2014.

Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2014.02.004>>

TAKKEN, I. et al. Spatial evaluation of a physically-based distributed erosion model

(LISEM). **Catena**, [s. l.], v. 37, n. 3–4, p. 431–447, 1999.

THOMSEN, L. M. et al. Soil surface roughness: comparing old and new measuring methods and application in a soil erosion model. **SOIL**, [s. l.], v. 1, n. 1, p. 399–410, 2015.

VAN DEN ELSEN, E. et al. Intensive water content and discharge measurement system in a hillslope gully in China. **Catena**, [s. l.], v. 54, n. 1–2, p. 93–115, 2003.

VAN DIJK, P. M.; AUZET, A. V.; LEMMEL, M. Rapid assessment of field erosion and sediment transport pathways in cultivated catchments after heavy rainfall events. **Earth Surface Processes and Landforms**, [s. l.], v. 30, n. 2, p. 169–182, 2005.

VAN WESEMAEL, B. et al. Surface roughness evolution of soils containing rock fragments. **Earth Surface Processes and Landforms**, [s. l.], v. 21, n. December, p. 399–411, 1996.

VANMAERCKE, M. et al. How long should we measure? An exploration of factors controlling the inter-annual variation of catchment sediment yield. **Journal of Soils and Sediments**, [s. l.], v. 12, n. 4, p. 603–619, 2012.

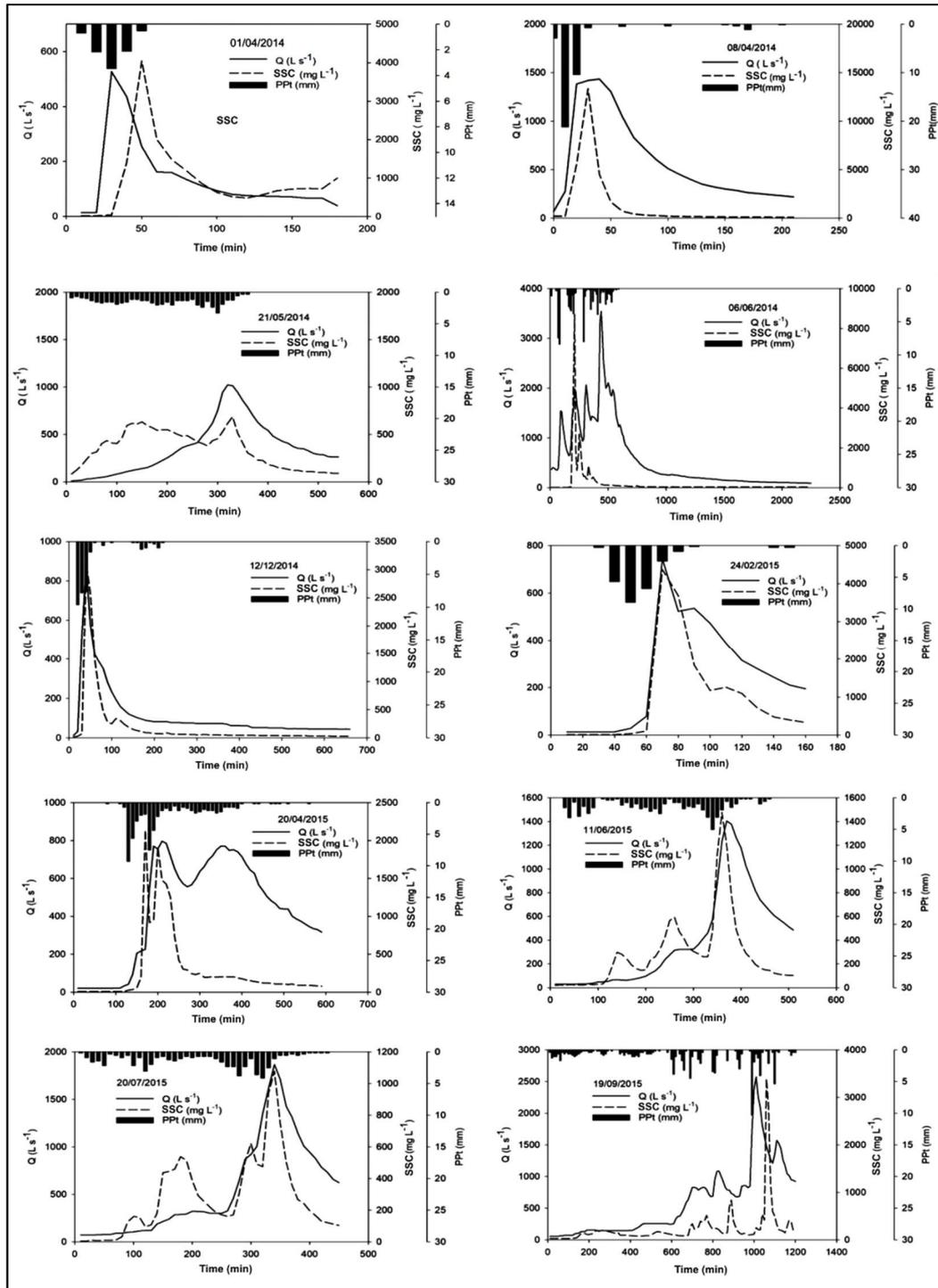
WALLING, D. Sediment Source Fingerprinting: Progress, Problems and Prospects. **AGU Fall Meeting Abstracts**, [s. l.], 2005. Disponível em: <<http://adsabs.harvard.edu/abs/2005AGUFM.H54A..01W>>

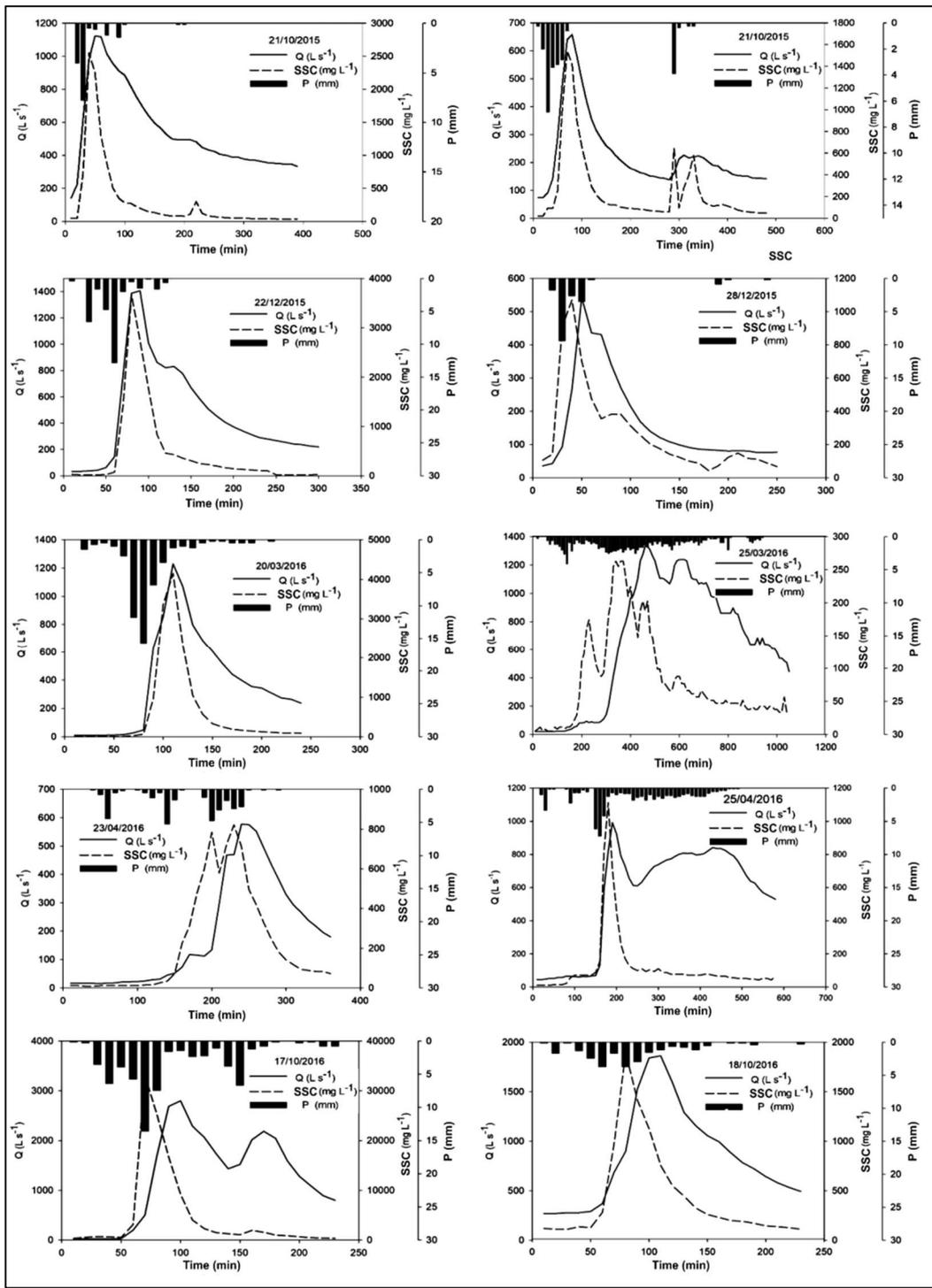
WANG, L. et al. Rainfall kinetic energy controlling erosion processes and sediment sorting on steep hillslopes: A case study of clay loam soil from the Loess Plateau, China. **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 512, p. 168–176, 2014.

WILLIAMS, J. R. Sediment-Yield Prediction with universal equation using runoff energy factor. In: PRESENT AND PROSPECTIVE TECHNOLOGY FOR PREDICTING SEDIMENT YIELDS AND SOURCES: PROCEEDINGS OF THE SEDIMENT YIELD WORKSHOP 1972, **Anais...** [s.l: s.n.]

ZHANG, J. et al. Evaluating relative merits of four baseflow separation methods in Eastern Australia. **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 549, p. 252–263, 2017.

ANEXO A – Hietogramas, hidrogramas e sedimentogramas dos eventos.





ANEXO B - Altura de plantas e índice de área foliar utilizados na parametrização dos eventos.

Uso	01/01/14		04/08/14		05/21/14		06/05/14		12/12/14		02/24/15		04/20/15		11/06/15		20/07/15		19/09/15	
	CH	LAI																		
Tabaco CT	1.00	3.50	0.00	0.00	0.00	2.00	0.00	2.00	0.90	2.00	1.00	2.00	1.00	2.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.18	0.08
Tabaco MT	1.00	3.50	0.00	0.00	0.20	2.00	0.70	2.00	0.90	2.00	1.00	2.00	1.00	2.00	0.40	1.36	0.70	4.10	0.18	0.11
Soja CT	2.23	3.50	0.00	0.00	0.00	4.00	0.00	4.00	2.23	4.00	2.23	4.00	2.23	4.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Soja MT	2.23	3.50	0.00	0.00	0.20	4.00	0.40	4.00	2.23	4.00	2.23	4.00	2.23	4.00	0.40	1.36	0.70	4.10	0.90	1.02
Milho CT	0.80	5.80	0.00	0.00	0.00	2.00	0.00	2.00	0.50	2.00	1.10	2.00	1.10	2.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Milho MT	0.80	6.80	0.00	0.00	0.20	2.00	0.40	2.00	0.50	2.00	1.10	2.00	1.10	2.00	0.40	1.36	0.70	4.10	0.90	1.02
Pousio	1.00	4.00	1.00	4.00	1.00	4.00	1.00	4.00	1.00	4.00	1.00	4.00	1.00	4.00	1.00	4.00	1.00	4.00	1.00	4.00
Floresta	6.00	3.00	6.00	3.00	6.00	4.00	6.00	4.00	6.00	4.00	6.00	4.00	6.00	4.00	6.00	3.00	6.00	3.00	6.00	3.00
Pastagem	0.50	4.00	0.50	4.00	0.50	3.00	0.50	3.00	0.50	3.00	0.50	3.00	0.50	3.00	0.50	4.00	0.50	4.00	0.50	4.00
Açudes	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Casas	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Estradas	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Canais	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Uso	21/10/15		21/10/15		22/12/15		28/12/15		20/03/16		25/03/16		23/04/16		24/04/16		17/10/16		18/10/16	
	CH	LAI																		
Tabaco CT	0.40	0.30	0.40	0.30	0.90	3.77	0.90	3.77	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.40	0.30	0.40	0.30
Tabaco MT	0.40	0.30	0.40	0.30	0.90	3.24	0.90	3.24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.40	0.30	0.40	0.30
Soja CT	0.10	0.40	0.10	0.40	2.23	4.20	2.23	4.20	2.23	0.20	2.23	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	0.40	0.10	0.40
Soja MT	0.10	0.40	0.10	0.40	2.23	4.20	2.23	4.20	2.23	0.20	2.23	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	0.40	0.10	0.40
Milho CT	0.00	0.00	0.00	0.00	0.50	4.00	0.50	4.00	1.10	3.40	1.10	3.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Milho MT	0.40	1.02	0.40	1.02	0.50	3.80	0.50	3.80	1.10	3.40	1.10	3.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.40	1.02	0.40	1.02
Pousio	1.00	4.00	1.00	4.00	1.00	4.00	1.00	4.00	1.00	4.00	1.00	4.00	1.00	4.00	1.00	4.00	1.00	4.00	1.00	4.00
Floresta	6.00	3.00	6.00	3.00	6.00	3.00	6.00	3.00	6.00	3.00	6.00	3.00	6.00	3.00	6.00	3.00	6.00	3.00	6.00	3.00
Pastagem	0.50	4.00	0.50	4.00	0.50	4.00	0.50	4.00	0.50	4.00	0.50	4.00	0.50	4.00	0.50	4.00	0.50	4.00	0.50	4.00
Açudes	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Casas	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Estradas	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Canais	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

LU – Unidade do uso; CH – Altura de plantas; LAI – Índice de área foliar; CT- Cultivo convencional; MT- Cultivo mínimo. Fonte: Elaborado pelo autor.