

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

Alexandre Augusto Schlesner

**FUNÇÕES DAS ÁREAS HIDROLOGICAMENTE FRÁGEIS NA FORMAÇÃO E
MODELAGEM DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL NA BACIA EXPERIMENTAL
DO ARROIO LAJEADO FERREIRA, ARVOREZINHA-RS**

Santa Maria, RS
2022

Alexandre Augusto Schlesner

**FUNÇÕES DAS ÁREAS HIDROLOGICAMENTE FRÁGEIS NA FORMAÇÃO E
MODELAGEM DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL NA BACIA EXPERIMENTAL
DO ARROIO LAJEADO FERREIRA, ARVOREZINHA-RS**

Tese de doutorado 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 **Doutor em Ciência do Solo**.

Orientador: Prof. Dr. Jean Paolo Gomes Minella

Santa Maria, RS
2022

Schlesner, Alexandre Augusto
FUNÇÕES DAS ÁREAS HIDROLOGICAMENTE FRÁGEIS NA
FORMAÇÃO E MODELAGEM DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL NA BACIA
EXPERIMENTAL DO ARROIO LAJEADO FERREIRA, ARVOREZINHA-RS
/ Alexandre Augusto Schlesner.-2022.
160 p.; 30 cm

Orientador: Jean Paolo Gomes Minella
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós
Graduação em Ciência do Solo, RS, 2022

1. Representação em modelos de erosão da formação do
escoamento superficial sobre encostas, áreas de
afluência variável, zonas ripárias e estradas de bacias
hidrográficas. 2. Modelagem de base física e distribuída
da erosão I. Minella, Jean Paolo Gomes II. 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.

Declaro, ALEXANDRE AUGUSTO SCHLESNER, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Tese) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras consequências legais.

Alexandre Augusto Schlesner

**FUNÇÕES DAS ÁREAS HIDROLOGICAMENTE FRÁGEIS NA FORMAÇÃO E
MODELAGEM DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL NA BACIA EXPERIMENTAL
DO ARROIO LAJEADO FERREIRA, ARVOREZINHA-RS**

Tese de Doutorado apresentada ao Curso de Doutorado em Ciência do Solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Ciência do Solo.

Aprovada em 31 de outubro de 2022:

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

Yuri Jacques Agra Bezerra da Silva, Dr. (UFPI)

Cláudia Alessandra Peixoto de Barros, Dra. (UFRGS)

José Miguel Reichert, Dr. (UFSM)

Rutineia Tassi, Dra. (UFSM)

Santa Maria, RS
2022

Dedico este trabalho aos meus pais Augusto (*in memoria*) e Helma, que superaram as adversidades da vida para proporcionar aos filhos saúde, educação e amor incondicional.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, que está sempre ao nosso lado, na alegria e na tristeza, nos confortando e aconselhando como verdadeiro Pai.

A minha esposa Sandra, e aos meus filhos Ricardo e Yuri, motivos de orgulho e razão de existir da minha vida. Amo-os eternamente e incondicionalmente.

Aos meus pais Augusto (in memoria) e Helma, e meu irmão Paulo, que dedicaram sua vida para minha formação, sempre através do exemplo.

A 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 e da Secretaria e Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, pela sua inestimável ajuda e orientações.

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 o alto nível de qualidade e conhecimentos promovidos pelo PPGCS.

Aos colegas de aula, de pesquisa, de trabalhos a campo, bolsistas de iniciação científica, colegas participantes de projetos, colegas de doutorado, pelos momentos de convívio e superação de dificuldades e avanços obtidos na execução das pesquisas

Aos componentes da banca, pelas inestimáveis contribuições no aprimoramento do meu trabalho, especialmente a figura do meu orientador professor Dr. Jean P. G. Minella, que tem como princípios buscar 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 ambientalmente consciente. Obrigado pelo apoio, confiança, crédito e investimento.

A CAPES pelo apoio financeiro para a formação e pesquisa.

Ao CNPq pelo apoio financeiro mediante bolsa de estudos e custeio da pesquisa.

When in trouble, get back to basics!
(Oliver Velez)

RESUMO

FUNÇÕES DAS ÁREAS HIDROLOGICAMENTE FRÁGEIS NA FORMAÇÃO E MODELAGEM DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL NA BACIA EXPERIMENTAL DO ARROIO LAJEADO FERREIRA, ARVOREZINHA-RS

AUTOR: Alexandre Augusto Schlesner
ORIENTADOR: Jean Paolo Gomes Minella

Modelos erosivos de base física e distribuída como o *Limburg Soil Erosion Model* (LISEM) são complexos e demandam informações de qualidade, equações em sintonia com os processos, e fiel representação espacial dos fatores controladores. Porém, a equifinalidade do ajuste de parâmetros associada com simplificações da representação espacial, trazem incertezas na representação de alguns processos. O conteúdo de água inicial do solo e a condutividade hidráulica saturada, relacionados com o processo de infiltração e formação do escoamento superficial, são os parâmetros mais sensíveis na calibração hidrológica do modelo. Estudos apontam que é necessário forçar a redução da condutividade para valores fora de seu contexto físico sobre as encostas e existe uma tendência para a superestimativa da produção de sedimentos pelo modelo nesta bacia. Este trabalho testa a hipótese que as linhas de vertentes nas encostas, áreas de afluência variável, zonas ripárias e estradas, geram elevada proporção do escoamento superficial e sua representação é fundamental para descrever a conectividade de água e sedimentos na bacia. Esses locais na paisagem são decorrentes das características do relevo e do solo (impermeáveis, baixa Ksat, concentradoras de fluxo em superfície, saturação do perfil). No modelo serviram como área de calibração dos valores de conteúdo de SWC, Ksat e coesão do solo. Foram definidas a partir do modelo digital de terreno de precisão, sobre o qual foi aplicado o índice topográfico TWI para determinar regiões sujeitas à condução, concentração e saturação de umidade no solo. Para a simulação do processo, avaliou-se o desempenho do modelo em 150 eventos de chuva de diferentes magnitudes no período de 2014 a 2022. Nos resultados, 98 apresentaram indicador NSE > 0.5, sendo considerados bons a muito bons. Concluiu-se que o modelo LISEM apresenta capacidade estrutural e funcional para poder representar as feições da paisagem que tem maior impacto nos processos hidrológicos e erosivos. A modelagem permitiu, sobre uma base robusta de eventos monitorados, boa calibração dos eventos através da manutenção dos valores de estimativas de condutividade hidráulica sobre as encostas e amplitude dos valores de umidade calibrados condizentes com a realidade física. Já para o comportamento dos sedimentos, o modelo com uso da abordagem de representação das áreas hidrologicamente frágeis, ainda apresenta incertezas para a simulação da concentração de sedimentos em suspensão e para a produção de sedimentos. Mas obtivemos melhor estimativa da formação de escoamento superficial sobre as encostas agrícolas que promovem desagregação nestes locais pelo fluxo concentrado. A representação dos fluxos concentrados sobre estruturas de rede de drenagem expandida melhorou a resposta do escoamento e a representação do exaurimento de sedimentos nos caminhos preferências.

Palavras-chave: LISEM. Slope line. Variable source area, Riparian zones. Roads.

ABSTRACT

FUNCTIONS OF HYDROLOGICALLY FRAGILE AREAS IN THE FORMATION AND MODELING OF SURFACE RUNOFF IN THE EXPERIMENTAL CATCHMENT OF THE ARROIO LAJEADO FERREIRA, ARVOREZINHA-RS

AUTHOR: Alexandre Augusto Schlesner

ADVISOR: Jean Paolo Gomes Minella

Physically based and distributed erosion models like the Limburg Soil Erosion Model (LISEM) are complex and require high-quality information, equations aligned with the processes, and accurate spatial representation of controlling factors. However, the equifinality of parameter fitting, combined with simplifications in spatial representation, introduces uncertainties in the portrayal of certain processes. Initial soil water content (SWC) and saturated hydraulic conductivity (Ksat), which are related to the infiltration process and formation of surface runoff, are the most sensitive parameters in the hydrological calibration of the model. Studies indicate the need to force a reduction in conductivity values beyond their physical context on slopes, and there is a tendency to overestimate sediment production by the model in this catchment. This study tests the hypothesis that slope lines, variable source areas, riparian zones, and roads generate a significant proportion of surface runoff, and their representation is crucial for describing water and sediment connectivity in the basin. These landscape features result from the characteristics of topography and soil (impermeable surfaces, low Ksat, concentrated surface flow, and profile saturation). In the model, they served as calibration areas for SWC, Ksat and soil cohesion values. They were defined based on high-resolution digital terrain models, on which the topographic wetness index (TWI) was applied to determine regions susceptible to soil moisture conduction, concentration, and saturation. The model's performance was evaluated by simulating 150 rainfall events of varying magnitudes from 2014 to 2022. In the results, 98 events showed a Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) indicator greater than 0.5, indicating good to very good performance. It was concluded that the LISEM model demonstrates structural and functional capacity to represent landscape features that have a significant impact on hydrological and erosive processes. Through robust calibration using monitored events, the model maintained appropriate values of hydraulic conductivity estimates on slopes and calibrated soil moisture values consistent with physical reality. However, regarding sediment behavior, the model's representation of hydrologically fragile areas still carries uncertainties in simulating suspended sediment concentration and sediment yield. Nevertheless, it provided a better estimation of surface runoff formation on agricultural slopes, where concentrated flow causes disaggregation. The representation of concentrated flows on an expanded drainage network improved the response of runoff and the representation of sediment depletion in preferential pathways.

Keywords: LISEM. Saturated Hydraulic Conductivity. Runoff. Sediment Yield.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processos operados pelo LISEM. Hidrológicos (azul) e sedimentos (vermelho).....	27
Figura 2 - Perfil conceitual dos Argissolos na bacia	46
Figura 3 - Perfil de um Cambissolo.....	47
Figura 4 - Perfil conceitual dos Neossolos	48
Figura 5 - Mapa de condutividade hidráulica saturada obtido por Krigagem e por algoritmo Random Forest.....	55
Figura 6 - Encosta com declividade típica na bacia de Arvorezinha.....	60
Figura 7 - Sulcos gerados nas vertentes das encostas com manejo em plantio direto	60
Figura 8 - Encosta com cultivo de tabaco em camalhões	61
Figura 9 - Cultivo de tabaco em preparo convencional após incidência de precipitação.	61
Figura 10 - Caminhos preferenciais da água em função do manejo e relevo	61
Figura 11 - Encosta sob efeito de erosão entressulcos e em sulcos.....	62
Figura 12 - Influência do formato das encostas no escoamento superficial	63
Figura 13 - Sulcos nas estradas, trilhas e lavouras	65
Figura 14 - Linha das vertentes nas encostas.....	65
Figura 15 - Canais permanentes no terço superior, intermediário e inferior da bacia	66
Figura 16 - Esquema da dinâmica da evolução temporal das áreas de afluência variável.....	68
Figura 17 - Áreas de afluência variável.....	69
Figura 18 - Regiões sujeitas ao alagamento e deposição de sedimentos nas áreas próximas dos canais.....	70
Figura 19 - Áreas de acúmulo de água sujeitas a saturação.....	70
Figura 20 - Evolução da agricultura na bacia de Arvorezinha.....	78
Figura 21 - Localização da bacia hidrográfica de Arvorezinha	79
Figura 22 - Mapa de solos da bacia de Arvorezinha.....	81
Figura 23 - Pluviógrafo e pluviômetro	82
Figura 24 - Calha Parshall no exutório da bacia.....	83
Figura 25 - Coleta de sedimentos por amostradores UDH48 e ISCO 6712	85
Figura 26 - Turbidímetro e estação coletora de dados instalados próximos do exutório.....	86
Figura 27 - Mapa de relevo (MNE) gerado a partir dos pontos GPS-RTK	89
Figura 28 - Mapa de classes de uso proposto para a modelagem	90
Figura 30 - Mapa proposto de canais expandidos	92
Figura 30 - Mapa de TWI e mapa TWI classificado	94
Figura 31 - Mapa de classes de comportamento hidrológico proposto.....	95
Figura 32 - Tela principal do modelo LISEM	97
Figura 33 - Tela de saída de simulação de evento.....	99
Figura 34 - Resumo da amplitude das principais variáveis dos eventos monitorados.....	102
Figura 35 - Gráfico de agrupamento por clusters dos dados dos eventos.....	106
Figura 36 - Relações entre variáveis PPT, I _{max} , Q _{max} , Q _t , CSS _{max} , SY _t , Run _{max} e Q _{St}	108
Figura 37 - Amplitude de valores de umidade antecedente calibrados para os eventos	109
Figura 38 - Vazão de pico, descarga líquida superficial e tempo de pico da vazão simulados x observados.....	109
Figura 39 - Infiltração simulada sobre os solos nos eventos	115
Figura 40 - Amplitude de calibração da coesão do solo nos eventos simulados	119
Figura 41 - Relações entre CSS _{obs} x CSS _{sim} , SY _{obs} x SY _{sim} , Runoff _{obs} x CSS _{obs}	119
Figura 42 - Desagregação e deposição sobre as áreas hidrológicas Argissolos (ARG), Neossolos (NEO), zona ripária (RIP), estradas (EST) e áreas de afluência variável (AAV) pela modelagem	120
Figura 43 - Número de eventos por classe de NSE no desempenho da modelagem.....	122
Figura 44 - Resultados de eficiência NSE e Pbias para vazão (Q), concentração de sedimentos em suspensão (CSS) e produção de sedimentos (SY) dos eventos.....	122
Figura 45 - Evento 20160325	138
Figura 46 - Mapas de desagregação e deposição pelo escoamento superficial do evento 20200707	145

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL	12
2	HIPÓTESE.....	17
3	OBJETIVOS	18
3.1	OBJETIVO GERAL.....	18
3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
4.1	EROSÃO HÍDRICA DO SOLO	19
4.2	MODELAGEM MATEMÁTICA DA EROSIÃO HÍDRICA.....	21
4.3	MODELOS DE BASE FÍSICA E DISTRIBUÍDOS	24
4.4	MODELO DE BASE FÍSICA E DISTRIBUÍDA LISEM.....	25
4.5	APLICAÇÃO DO LISEM NA BACIA EM ARVOREZINHA	26
4.6	DESAFIOS NA MODELAGEM DA EROSIÃO COM LISEM	29
4.7	AGENTES DO PROCESSO EROSIVO NA BACIA OPERADOS PELO LISEM	35
4.7.1	Precipitação.....	35
4.7.2	Relevo.....	38
4.7.3	Vegetação.....	41
4.7.4	Solo.....	43
4.7.5	Profundidade do solo.....	48
4.7.6	Infiltração de água no solo.....	49
4.7.7	Distribuição do conteúdo de água na paisagem.....	51
4.7.8	Distribuição da condutividade hidráulica saturada no perfil e na paisagem	52
4.7.9	Roteamento do escoamento superficial na bacia	56
4.8	ESTRUTURAS HIDROLÓGICAS FRÁGEIS.....	57
4.8.1	Canais efêmeros	58
4.8.2	Linha das vertentes nas encostas.....	63
4.8.3	Canais permanentes	66
4.8.4	Áreas de afluência variável.....	67
4.8.5	Áreas de acúmulo de umidade e sujeitas à saturação hídrica	68
4.9	DESAGREGAÇÃO, TRANSPORTE E DEPOSIÇÃO DE SEDIMENTOS	71
4.9.1	Cálculo da desagregação e deposição pelo impacto da gota	71
4.9.2	Cálculo da desagregação e deposição pelo escoamento superficial.....	72
4.9.3	Fatores que atuam na desconectividade de fluxos hídricos e de sedimentos	75
5	METODOLOGIA.....	79
5.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	79
5.2	MONITORAMENTO HIDROLÓGICO.....	81
5.2.1	Precipitação	81
5.2.2	Descarga líquida	83
5.2.3	Concentração de sedimentos em suspensão	84
5.2.4	Composição do banco de dados.....	87
5.3	CONFIGURAÇÃO DOS NOVOS MAPAS DE ENTRADA AO MODELO	88
5.3.1	Elaboração de modelo numérico de elevação (MNE).....	88
5.3.2	Mapa de classes de usos.....	89
5.3.3	Mapa de canais.....	91
5.3.4	Mapa de atribuição de conteúdo de água e de condutividade hidráulica saturada	93
5.4	PREPARAÇÃO DO MODELO E CALIBRAÇÃO DOS EVENTOS	96
5.4.1	Configurações iniciais do modelo.....	96
5.4.2	Rotina de calibração dos eventos.	97
5.4.3	Avaliação da eficiência geral do modelo.....	100

5.4.4	Avaliação da eficiência predição espacial da erosão do modelo	101
6	RESULTADOS.....	102
6.1	CARACTERIZAÇÃO DOS EVENTOS MONITORADOS.....	102
6.2	ANÁLISES ESTATÍSTICAS DOS EVENTOS.....	102
6.3	RESULTADO DA CALIBRAÇÃO HIDROLÓGICA DOS EVENTOS	108
6.4	RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO DOS SEDIMENTOS.....	116
6.5	EFICIENCIA GERAL DA CALIBRAÇÃO DOS EVENTOS	121
7	DISCUSSÃO.....	125
7.1	DIRETRIZES E LIMITAÇÕES DA MODELAGEM COM LISEM.	125
7.2	SOBRE OS EVENTOS DE PRECIPITAÇÃO.	126
7.3	REPRESENTAÇÃO DAS ESTRUTURAS HIDROLÓGICAS FRÁGEIS.	130
7.3.1	Comportamento das encostas	131
7.3.2	Rede de drenagem expandida	133
7.3.3	Representação de áreas sujeitas à concentração de água no solo.....	134
7.4	EFICIÊNCIA DA SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA	135
7.5	EFICIÊNCIA DA SIMULAÇÃO DA CSS E DA PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS	141
7.5.1	Desagregação pelo impacto da gota da chuva	142
7.5.2	Desagregação pelo escoamento superficial	142
8	CONSIDERAÇÕES FINAIS	146
9	CONCLUSÕES	147

1 INTRODUÇÃO GERAL

A busca pelo desenvolvimento sustentável da agricultura associada com iminente agravamento das condições climáticas, objetiva a manutenção da disponibilidade e qualidade da água para sustentar a produção agrícola e o consumo humano. Um dos principais efeitos da combinação de aumento da intensidade energética da precipitação e expansão de áreas agrícolas é a perda de solo pelo processo erosivo. Dentro deste contexto, buscamos entender os processos erosivos e conseguir calibrar modelos preditivos para as nossas condições locais para o planejamento mais robusto de atividades conservacionistas (MINELLA *et al.*, 2010).

A partir do monitoramento e diagnóstico de bacias hidrográficas, é possível obter informações sobre os eventos pluviométricos e das perdas de água e solo, que juntamente com a percepção dos processos erosivos ocorrentes, são fundamentais para definir as estratégias de calibração de modelos matemáticos de simulação do escoamento superficial e da erosão hídrica. Entre os diferentes tipos de modelos matemáticos, temos os de base física e distribuída, que são equipados com equações que tem intenção de representar os processos físicos da erosão através de variáveis de entrada e saída dos sistemas de bacia monitorados. Uma vez adequadamente calibrados, estes modelos podem apresentar potencial para serem utilizados como ferramentas auxiliares no planejamento de ações de mitigação da erosão considerando diferentes cenários de uso e ocupação, tipos de manejo de solo e de plantas e condições climáticas. Entretanto, o Brasil carece de trabalhos realizados que utilizam modelos matemáticos de base física e distribuído com foco para o estudo de processos erosivos, com calibração apoiada em base competente de técnicas de monitoramento ambiental, um passo além da simples estimativa das perdas. Também são poucas as bacias monitoradas com intuito de obter dados detalhados sobre as características dos eventos de natureza hídrica para calibrar estes modelos de base física.

Um representante desta categoria de modelos matemáticos de base física e distribuída é o *Limburg Soil Erosion Model* (LISEM) (DE ROO *et al.*, 1994). É um modelo exigente quanto ao número e qualidade das informações para atender sua complexa estrutura de cálculo dos processos erosivos, mas apresenta alto potencial para ser utilizado como ferramenta de predição das perdas pela erosão quando aplicados sobre áreas cujos processos erosivos sejam semelhantes aos contemplados pelo modelo e cujas equações sejam sensíveis às alterações nas variáveis ambientais envolvidas nestes processos. Uma vez calibrados, ficam qualificados para reproduzir a erosão em áreas com diferentes características de uso e manejo

agrícolas. Além de alimentar adequadamente o modelo LISEM com informações do grande número de variáveis ambientais de entrada para as equações de cálculo dos processos, um desafio adicional para o usuário do modelo é justamente explorar adequadamente a sua principal característica que o diferencia e o destaca em relação aos demais modelos da categoria, que é a possibilidade de representar de forma distribuída as informações das variáveis sobre a paisagem. Ele permite representar a atribuição das variáveis de forma pontual na forma de uma matriz de células em linhas e colunas com um determinado tamanho de célula representando o mapa da paisagem da bacia, na qual se prestam informações sobre a ação do relevo, características do solo, cobertura vegetal, rugosidade do terreno e distribuição da precipitação, informações importantíssimas para o cálculo da erosão sobre bacias. Um modelo de base física e distribuído assim parametrizado traz melhorias significativas na qualidade da representação dos processos erosivos em relação aos modelos empíricos e não distribuídos (*lumped models*). Eles permitem calcular o processo de infiltração célula a célula e representar a ação do relevo e sua influência e interação com os demais fatores da cobertura do solo na geração, volume e velocidade do escoamento superficial, apresentando potencial de representar as perdas por erosão na escala de bacia de forma muito mais completa e precisa. Entretanto, alimentar adequadamente o modelo exige profundo conhecimento sobre os processos hidrológicos que ocorrem na bacia, incluindo características da infiltração de água no solo, do relevo e sua ação sobre o escoamento, ação da cobertura vegetal e estruturas que afetam a conectividade dos fluxos de água e de sedimentos entre as encostas e o canal fluvial. Além disso, considerando as suas próprias limitações, temos que avaliar se o modelo apresenta condições de bem representar tais processos em seu arcabouço de equações, estando estes em sintonia com os processos ocorrentes na bacia.

Segundo de Roo (1998) no modelo LISEM os dois fatores de calibração de maior impacto na formação do escoamento superficial são a condutividade hidráulica saturada e o conteúdo de água inicial do solo. A condutividade hidráulica saturada (K_{sat}) é uma propriedade do solo que representa numericamente a sua permeabilidade para o fluxo hídrico representando sua capacidade de infiltração máxima quando saturado de água. Da mesma forma, a distribuição espacial do conteúdo de água no solo também apresenta alto impacto na calibração dos eventos, sendo a principal variável de controle sobre a calibração hidrológica no LISEM. Entretanto, são variáveis representadas na modelagem com grandes generalizações, em virtude da dificuldade e oneroso trabalho de levantamento de dados necessário para compor um mapa de saturação e de K_{sat} do solo que possa ser representativo

ao modelo para cada evento em particular. Além da incerteza sobre a distribuição espacial das variáveis de entrada ao modelo e dos processos hidrológicos sobre a paisagem, especificamente no caso do LISEM, existem diferentes possibilidades de combinar valores de condutividade hidráulica e de conteúdo de água no perfil do solo célula a célula que podem levar a um mesmo resultado de escoamento superficial gerado pela modelagem na bacia. Em função disso, a correta identificação destes fatores na paisagem é muito importante para a coerente calibração hidrológica do modelo e redução das incertezas quanto ao desenvolvimento dos processos erosivos. Alguns trabalhos realizados com o modelo apresentaram incoerências no comportamento da modelagem, pois durante a calibração dos modelos de infiltração de água no solo tendo como base a K_{sat} , é necessário alterar este parâmetro para valores várias vezes menores em magnitude do que os observados a campo. (HU *et al.*, 2015; SHEIKH *et al.*, 2010; TAKKEN *et al.*, 1999).

Entre os trabalhos realizados com o LISEM temos os desenvolvidos sobre a bacia hidrográfica do Arroio Lajeado Ferreira, onde os levantamentos no campo sobre a varável apontam predominância de valores elevados de condutividade hidráulica e elevadas taxas de infiltração sobre as encostas agrícolas na bacia, mas com alta variabilidade e pouca dependência espacial entre os pontos amostrados de atributos (DALBIANCO, 2009). Uma das principais características da bacia do Arroio Lajeado Ferreira utilizada neste estudo para calibração do modelo é o intenso uso para fins agrícolas sobre encostas com alta declividade e intenso revolvimento do solo. Isto proporciona condições para um tipo de erosão conhecido como *interril erosion*, onde existe a formação de sulcos efêmeros nas encostas pelo escoamento superficial e a renovação e rápido exaurimento das fontes de sedimentos, de forma cíclica pelo retrabalho do solo para cultivo. A forma como este processo é representado no modelo pode ter grande impacto nos resultados da modelagem e ser uma das causas da superestimativa da produção de sedimentos apresentada em alguns estudos (SHORE *et al.*, 2013). A evolução no processo de modelagem com o LISEM passou a exigir respostas para algumas questões pontuais que desafiam a compreensão e obtenção de resultados mais coerentes, por exemplo:

- Por que o modelo apresenta a tendência de superestimar a produção de sedimentos?
- Por que é preciso reduzir os valores de condutividade hidráulica saturada durante a calibração?

- Quais as relações entre os processos que acontecem nas encostas e as perdas obtidas no exutório da bacia?

As respostas podem estar relacionadas à precária representação da distribuição espacial do conteúdo de umidade do solo e da condutividade hidráulica saturada, cujos valores podem estar incoerentes para a representação de locais com alta probabilidade de serem impermeáveis ou com baixa infiltração, sendo necessário atuar sobre os valores das encostas, onde valores de maior infiltração são mais prováveis. Além disso, a distribuição do conteúdo de água inicial do solo pode estar sendo mal representada, ignorando os locais de alta probabilidade de ocorrer saturação ou maior acúmulo de água no perfil do solo por conta da ação do relevo. Além da condutividade e do conteúdo de água no solo, temos aspectos ligados à conectividade dos escoamentos e sedimentos em superfície e subsuperfície que ainda precisam ser melhor elucidados (JANZEN; MCDONNELL, 2015a).

Atualmente, ainda temos incertezas sobre a modelagem, pois nos estudos desta bacia, os esforços inicialmente foram dirigidos no sentido de avaliar e calibrar o modelo para refletir em seus resultados, as condições apresentadas dos eventos integralizados no exutório. Mas para efetivamente utilizá-lo como ferramenta de diagnóstico da atividade antrópica, é preciso a sua validação como preditora espacial e temporal dos processos erosivos sobre a bacia, segundo os processos hidrológicos predominantes em cada local. Sobre a predição da produção de sedimentos pelo modelo, para que o modelo tenha boa resposta é necessário primordialmente bem representar os fluxos de escoamento e infiltração. Os processos de desagregação, transporte e deposição de sedimentos está relacionado com o volume gerado e escoado, influência da vegetação, do relevo e funcionalidade das zonas ripárias no controle da saturação de umidade. Estes fatores agem como promotoras da continuidade e conexão direta dos fluxos e sedimentos entre as encostas e o canal vertente, ou como regiões propícias para a desaceleração dos escoamentos e deposição de sedimentos. Podemos chamar estes locais mais específicos, com comportamento diferenciado para a infiltração e acúmulo de água, de zonas hidrologicamente frágeis. É possível que parte importante da responsabilidade para uma melhor calibração hidrológica e erosiva no modelo LISEM seja por conta de processos e estruturas físicas responsáveis pelo comportamento da infiltração de água no solo localizadas nestas regiões. Assim, a melhor representação dos processos que correm nesta área de transição, podem ser a resposta para melhorar os índices de desempenho dos modelos de base física (FENICIA; MCDONNELL, 2022).

Em contrapartida à boa qualidade das informações sobre o comportamento hidrológico pontual sobre as encostas, temos um grande desafio para representar nos modelos de base física de forma simplificada, a complexidade dos fluxos do escoamento como ocorre sobre a superfície, como nas vertentes das encostas, em canais efêmeros e nas zonas ripárias. O presente trabalho investiga respostas para estas perguntas através da identificação e representação mais detalhada de áreas hidrologicamente frágeis sobre a bacia do Arroio Lajeado Ferreira no município de Arvorezinha, RS, o que pode trazer uma melhor eficiência da simulação hidrológica deste modelo. Culminamos nesse momento com 20 anos de dados monitorados sobre ela. Através dos conhecimentos acumulados dos processos erosivos nesta bacia, diversos artigos, dissertações e teses foram elaborados a partir da base consistente de dados, tornando-se uma importante fonte de dados de monitoramento de bacias hidrográficas de cabeceira no Brasil. Trata-se de uma pequena bacia hidrográfica rural caracterizada pelo relevo acentuado e intensa atividade agrícola, onde o principal processo erosivo observado parece ser devido à formação de escoamento superficial sobre áreas específicas nas encostas, com baixa permeabilidade ou mesmo impermeáveis, associado à formação de canais efêmeros formados pelo cultivo e regiões sujeitas à saturação nas partes baixas do relevo próximas aos canais de drenagem principais. Procurou-se aprimorar a representação espacial da distribuição da condutividade hidráulica saturada, do conteúdo de água inicial dos solos e de regiões hidrologicamente frágeis, a fim de melhor representar os processos de infiltração e formação do escoamento na escala de bacia.

2 HIPÓTESE

As áreas hidrologicamente frágeis, como talvegues nas encostas, canais efêmeros, áreas sujeitas ao acúmulo de água na superfície e de saturação de água no perfil do solo são normalmente negligenciadas na preparação da base de dados do LISEM. Sendo consideradas áreas importantes contribuintes para a formação do escoamento superficial, quando melhor representadas no modelo contribuem positivamente para melhor eficiência da calibração do escoamento superficial de eventos de diferentes características.

A tendência para a superestimativa da produção de sedimentos no modelo LISEM são em parte, produto da incapacidade do modelo em simular a renovação e exaurimento dos sedimentos para alguns eventos que ocorre nas vertentes e canais efêmeros das encostas agrícolas decorrentes do *interril erosion*.

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

Identificar e compreender as estruturas hidrológicas frágeis e seu funcionamento no processo de infiltração, formação do escoamento superficial e conectividade de fluxos de água e sedimentos sobre a bacia, para melhor representá-los na modelagem com o LISEM.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar potenciais estruturas formadoras de escoamento de forma direta ou por baixa permeabilidade sobre as encostas e métodos para representá-los em modelos distribuídos;
- Entender como o relevo e as regiões ripárias condicionam os fluxos hídricos superficiais e subsuperficiais entre as encostas e os canais de drenagem;
- Avaliar o impacto que a representação destas estruturas nos mapas de entrada do modelo LISEM causa na calibração e desempenho da modelagem na bacia.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 EROSÃO HÍDRICA DO SOLO

A erosão hídrica do solo é um importante fator de degradação das áreas agrícolas, propiciando redução da fertilidade e da camada arável do solo, redução da disponibilidade de áreas produtivas, diminuição da produtividade das culturas e poluição dos recursos hídricos. Estima-se que em torno de 25 a 40 bilhões de toneladas de solo se perdem todos os anos por conta exclusiva da erosão, diminuindo sua capacidade de estocar carbono, nutrientes e água (FAO & ITPS, 2015). Também, segundo a FAO (2015), 30% dos solos no mundo estão comprometidos com baixa produtividade ou perda de suas funções, e ações imediatas para frear o ritmo acelerado de perdas deste patrimônio é fundamental para a sobrevivência de futuras gerações. Este é um fenômeno observado em escala global durante o século 20 e com esperado agravamento segundo os modelos para o século 21 nos diversos continentes. Na América do Norte, onde alguns pesquisadores como Nearing (2004) apontam que a degradação dos solos são devidos principalmente pelas alterações nas taxas de erosão devidas ao aumento da erosividade das chuvas e, em locais onde haverá diminuição das chuvas, a erosão se dá pela diminuição da produção de biomassa protetora do solo. O estudo aponta que a taxa de erosão aumenta na ordem de 1.7 vezes em relação ao aumento da erosividade das chuvas. As principais causas apontadas como ameaças à qualidade dos solos são a erosão hídrica, eólica e pelo cultivo, declínio da matéria orgânica do solo, compactação, declínio da biodiversidade, selamento superficial, salinização e contaminação do solo, e deslizamentos de encostas.

A bacia hidrográfica é considerada como uma área delimitada, geralmente pelo relevo, na qual se processam os fenômenos hidrológicos e erosivos, que permite ser uma referência para o controle experimental na quantificação das entradas e saídas de massa e energia sob sua abrangência, as interações ligadas ao uso e manejo do solo, bem como do padrão de precipitação incidente sobre a área. As perdas de solo em nível continental têm sido avaliadas com o aprimoramento de técnicas de modelagem com foco direcionado principalmente para a caracterização do meio físico, relevo, tipos de solo, uso e manejo. As diferentes situações particulares de cada região apresentam ações específicas dos fatores controladores e resultados diversos de perdas de solo. Em estudo de modelagem usando a RUSLE em nível global para avaliar o potencial de erosão pelas alterações do clima e de uso do solo, Yang e colaboradores (2003) projetaram para 2090 perdas de solo de até 38 mm ano, estimando que 60% da erosão presente é induzida pelas atividades humanas. Na Europa, os

agentes causadores das perdas de solo são a erosão hídrica, a eólica e a erosão pelo cultivo, sendo que as taxas de perdas apresentam valores de consenso diferentes conforme as diferentes regiões (VERHEIJEN *et al.*, 2012). Na América do Sul, recente trabalho de Riquetti (2022) e colaboradores utilizou o modelo RUSLE para avaliar a erosão sobre 27 bacias sobre o continente, apurando previsões de perdas médias de $3.8 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, onde Chile e Colômbia apresentaram as maiores taxas, sendo que as bacias do Atlântico Sul apresentaram uma taxa de mobilização do solo (SDR) de 27.7%. Para modelagem em grande escala, temos processos erosivos complexos estimados a partir de estudos sobre grandes bacias ou sobre pequena escala, como em pequenas parcelas ou em pequenas encostas isoladamente.

O caráter dinâmico dos processos em bacias hidrográficas estabelece desafios para seu entendimento. Para melhor entender os processos envolvidos na erosão hídrica e avaliar o impacto das perdas de solo e água pela erosão sobre os solos agrícolas é preciso quantificar e qualificar estas perdas, sendo que para isso são utilizados recursos de monitoramento ambiental sob diferentes escalas espaciais e temporais. Entretanto, pouco entendemos sobre os processos erosivos em escala de encostas em pequenas bacias hidrográficas, inclusive as de cabeceira. É nesta escala intermediária, que importantes processos hidrológicos e erosivos acontecem, o qual são determinantes para a correta quantificação das movimentações e perdas de solo e água. Estes processos envolvem a conectividade de água e sedimentos entre as encostas e os canais de drenagem que dependem das características do relevo, tipo de solo, dinâmica do uso e manejo das regiões ripárias e da própria dinâmica fluvial da bacia. A escala de pequena bacia de cabeceira é fundamental para obtenção de evidências dos processos erosivos em suas fases iniciais, valendo-se de dados como a vazão, concentração de sedimentos e produção de sedimentos obtidos pelo monitoramento específico para esta escala. Um maior número de estudos sobre pequenas bacias hidrográficas contemplando as mais diversas regiões e situações ambientais é desejável, entretanto o monitoramento é menos comum nesta escala em função do alto custo de implementação de bacias monitoradas. O desenvolvimento na área de equipamentos e tecnologia de informação tem promovido uma maior proliferação de estudos nesta escala nos anos recentes. O monitoramento ambiental é a base para a modelagem matemática, pois através dele se obtém dados para o desenvolvimento e treinamento dos modelos, sendo que modelos matemáticos são recursos importantes para testar cenários futuros de processos erosivos em função de alterações climáticas e antrópicas, bem como planejamento e efeito de práticas conservacionistas. Ao monitorarmos o relevo, avaliar o comportamento sazonal do clima, as alterações da cobertura do solo, obtenção de um histórico de dados sobre variáveis hidrológicas e de perdas pela erosão, entendemos como os

processos impactam as perdas de água e solo em escala de bacia, sendo informações úteis para qualificar os modelos matemáticos. Com estas informações procuramos paulatinamente aprimorar técnicas de monitoramento e análise, identificar e quantificar os processos erosivos, e buscar a melhor calibração de modelos de erosão (ALEWELL *et al.*, 2019; BEVEN, 2009; CROKE; JAKEMAN, 2001). Outras técnicas complementares de avaliação da dinâmica espacial e temporal são extremamente úteis, como no caso da técnica de fingerprint para identificação das fontes de sedimentos e dos inventários do ^{137}Cs para a estimativa das taxas de erosão e de sedimentação.

4.2 MODELAGEM MATEMÁTICA DA EROSÃO HÍDRICA

Quando abordamos o tema da modelagem da erosão, é vasto o número de modelos desenvolvidos nas últimas décadas. Batista *et al.* (2019) realizaram uma meta análise sobre estudos envolvendo modelagem da erosão utilizando o termo “*soil erosion model*”, obtendo retorno sobre 550 artigos publicados entre 1985 e 2018. A Tabela 1 apresenta os principais e mais relevantes modelos citados. O desenvolvimento de modelos matemáticos preditores de erosão passou por diferentes fases ao longo das últimas décadas, sendo os modelos de erosão hídrica os principais por serem representantes de pelo menos 94,6% dos estudos desenvolvidos (BORRELLI *et al.*, 2021). Os modelos apresentam diferentes formatos de concepção. Os modelos empíricos são modelos baseados em relações empíricas entre variáveis ambientais e a taxa de erosão observada, sendo desenvolvidos a partir de dados coletados em campo e que podem ser aplicados para diferentes regiões, desde que as condições sejam semelhantes. Exemplos de modelos empíricos incluem a Equação Universal de Perda de Solo – USLE (WISCHMEIER; SMITH, 1978) e a Equação Universal de Perda de Solo Revisada – RUSLE (RENARD, 1997), que consideram fatores como a erosividade da chuva, o tipo de solo, o uso da terra e a inclinação do terreno. Modelos de base física são formulados com base nas leis da física que controlam os processos de erosão hídrica. Esses modelos levam em consideração propriedades físicas do solo, como a permeabilidade, a porosidade e a rugosidade. Eles utilizam equações diferenciais ou equações de transporte para descrever os mecanismos de erosão e transporte de sedimentos, sobre estas variáveis.

Tabela 1 Modelos matemáticos de erosão citados na literatura

Acrônimo	Nome do modelo	Referência
AGNPS	A Non-Source Pollution Model	Young et al. (1989)
ANSWERS	Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation	Beasley and Huggins (1982)
EUROSEM	European Soil Erosion Model	Morgan et al. (1998)
LISEM	Llmburg Soil Erosion Model	De Roo et al. (1996a, 1996b)
MMF	Morgan-Morgan-Finey Model	Morgan (2001); Morgan et al. (1984)
PESERA	Pan European Soil Erosion Risk Assessment	Kirkby et al. (2008)
RUSLE	Revised Universal Soil Loss Equation	Renard et al. (1997)
SedNet	Sediment and River Network Model	Wilkinson, et al. (2004)
SWAT	Soil and Water Assessment Tool	Arnold et al. (1998)
USIE	Universal Soil Loss Equation	Wischmeier and Smith (1978)
USLE-M	Modified Universal Soil Loss Equation	Kinnel and Risse (1998)
USLE-MM	Modified-Modified Universal Soil Loss Equation	Bagarello et al. (2008)
USPED	Unit Stream Power-based Erosion Deposition	Mitasova et al. (1996)
WaTEM/S	Water and Tillage Erosion Model and	Van Oost et al. (2000), Van Rompaey et al. (2001),
EDEM	Sediment Delivery Model	Verstraeten et al. (2010)
WEPP	Water Erosion Prediction Project	Flanagan and Nearing (1995)

Fonte: Adaptado de Batista et al. (2019).

Segundo Fatichi et al. (2016) um modelo hidrológico baseado em processo ou baseado fisicamente é uma formulação matemática que representa explicitamente as variáveis e fluxos de estado hidrológico que são teoricamente observáveis e que assumem leis de conservação de massa, energia e momento em escalas temporais que caracterizam os processos físicos subjacentes e quando aplicados espacialmente, desde a encosta até as escalas continentais, podem incorporar a variabilidade espaço-temporal das forças primárias, como precipitação, e variações das propriedades da superfície terrestre como topografia, solos, vegetação na escala de encosta. Tem diferentes objetivos, seja a partição chuva-escoamento, fluxos de água na camada superficial e subsuperficial, trocas terra-atmosfera, identificação de sedimentos ou fontes contaminantes ou uma descrição completa da dinâmica hidrológica. Eles fornecem uma descrição mais detalhada dos processos envolvidos, mas são exigentes em dados mais complexos e podem ser computacionalmente mais intensivos. Modelos específicos de simulação hidrológica podem ser físicos e distribuídos, simulam os processos hidrológicos e de erosão em uma área específica como uma bacia hidrográfica. O *Soil and Water Assessment Tool* - SWAT (ARNOLD *et al.*, 1998) e o *Agricultural Non-Point Source Pollution Model* – AGNPS (YOUNG *et al.*, 1989) estão entre modelos representantes desta categoria. Eles consideram fatores como o uso da terra, as características do solo, os padrões de chuva e as práticas de manejo para estimar a taxa de erosão em diferentes partes da bacia. Mais recentemente, modelos baseados em aprendizado de máquina ou *machine learning*, utilizando técnicas como redes neurais artificiais, algoritmos genéticos e máquinas de vetor de suporte, são capazes de aprender padrões complexos a partir de conjuntos de dados e fazer previsões com base nesses padrões. Eles podem incorporar grandes volumes de dados, como

imagens de satélite, dados meteorológicos e informações topográficas, para melhorar a precisão das previsões de erosão (LIU *et al.*, 2021).

A modelagem matemática da erosão de modo geral e especialmente os de base física e distribuída envolvem um procedimento complexo, que depende da boa qualidade de dados observados e processos ocorrentes na bacia. Segundo Beven (2011), a operação depende da habilidade do modelo em reproduzir os processos erosivos e da habilidade do operador em adequadamente alimentar e calibrar o modelo. O autor considera que todos os modelos matemáticos, sejam empíricos ou de base física, herdaram características do contexto de onde foram formulados. Reforçando esta ideia sobre o desafio de descrever e representar os processos, De Vente (2013) em compilação de 14 modelos de previsão de erosão aplicados em 32 estudos sobre 700 bacias de diferentes características, concluiu que a modelagem da produção de sedimentos e taxas de erosão dependem substancialmente das escalas espaciais e temporais a serem consideradas. Também, que nenhum dos modelos consegue contemplar todos os processos ou apresentou excelentes resultados de acordo com seus objetivos. No entanto, sugere que é preciso uma integração com novas abordagens conceituais, mais associadas com as observações de campo, onde os modelos necessitam representar os processos dominantes que ocorrem na bacia. O mesmo trabalho aponta que entre os modelos avaliados, WBMsed, PESERA, SWAT, AGNPS e LISEM são os únicos com habilidade de manipular a dinâmica hidráulica da água no sistema, e por isso têm o melhor potencial de acessar efeitos nas mudanças climáticas, uso do solo e práticas de manejo. Ou seja, o autor aponta aspectos fundamentais para o sucesso da modelagem, sendo que o modelo escolhido necessita estar em sintonia com os processos hidrológicos ocorrentes na bacia.

A parametrização equivocada, a falha na identificação dos processos dominantes na bacia, uso em desacordo com a habilidade do modelo, inadequada mensuração de dados fundamentais para alimentar e calibrar o modelo por um monitoramento eficiente, ou falta de experiência do operador, leva o programa a apresentar resultados de acordo com a qualidade das informações que lhe forem supridas. Certos processos físicos na erosão hídrica são fundamentais de serem bem representados pois impactam diretamente no processo de formação da erosão: a desagregação do solo pelo impacto da gota de chuva e a desagregação pelo escoamento superficial da água sobre o solo. No primeiro processo, as características da própria chuva, como volume e intensidade, associado com a situação da cobertura vegetal e a propensão do solo para ser desagregado precisam ser bem determinados. No segundo processo, o volume de água excedente sobre o solo que inicia seu deslocamento na paisagem de acordo com o relevo e a propensão do solo à desagregação também precisa ser bem

conhecida. Não só a intensidade e volume destas variáveis precisam ser conhecidos como também a distribuição espacial destes fatores na paisagem. Os processos de interceptação, armazenamento superficial, infiltração de água no solo e efeito do relevo pela declividade nos escoamentos, características da cobertura vegetal no controle do escoamento, são processos cuja representação é beneficiada pelo uso de modelos de base física e distribuída no contexto de bacia hidrográfica. Muito embora possamos mais facilmente lidar com a distribuição espacial dos fatores controladores, a evolução na modelagem está na evolução da representação dos processos, o que fica limitada pela variabilidade natural do meio e nossa capacidade de discretizar as mesmas no espaço e no tempo. Algumas relações entre processos ambientais e equacionamento são difíceis de interpretar pois dependem da espacialização das variáveis no meio, como por exemplo, a infiltração de água no solo. Como exemplo, temos o uso do método de Green & Ampt (SMITH; PARLANGE, 1978), que com um conjunto limitado de informações, como porosidade do solo, umidade inicial, tensão matricial e condutividade hidráulica saturada, representa bem o comportamento da infiltração de forma pontual. Mas quando aplicado sobre o contexto de bacia hidrográficas precisa ser aplicado de forma distribuída. Nestes casos, o uso de modelos distribuídos com boa capacidade de representar processos são opções a serem consideradas para o desenvolvimento.

4.3 MODELOS DE BASE FÍSICA E DISTRIBUÍDOS

Sobre a manipulação espacial, o conceito de representação espacial por células *raster* permite uma representação do meio físico de uma área em diferentes escalas, desde uma grande bacia até uma simples encosta. Este foi o diferencial da concepção de modelos erosivos que incluíram a representação espacial discretizada em sua estrutura de base física (DE ROO *et al.*, 1994, 1996). A resolução espacial escolhida pode ir desde centenas de metros até centímetros. A escolha da resolução espacial é de suma importância, pois altas resoluções tem melhor poder descritivo da área, mas tem demanda computacional que aumenta geometricamente conforme o tamanho da área. Embora modelos como o LISEM tenham habilidade de representar de forma detalhada a condição do meio, simplificações são operadas pelos usuários, como a baixa resolução espacial dos mapas de entrada, como relevo, características do solo ou do uso da terra. Isto ocorre, ou por opção do usuário ou pela dificuldade de obter dados discretos em alta resolução do meio físico. Em função de que são muitos os processos e muitos os parâmetros de controle destes processos, o operador deve ter ciência de qual a função de cada um e interceder de forma responsável sobre eles. Esta complexidade aumenta na medida que aumenta a incerteza de sua distribuição espacial sobre a área, o que propicia maior incerteza relacionada com a equifinalidade da ação dos

parâmetros, de modo que diferentes arranjos de valores de parâmetros sobre as variáveis observadas, como diferentes combinações de valores e distribuição espacial do conteúdo de água no solo e condutividade hidráulica do nas células, que podem resultar em valores de vazão e concentração de sedimentos em suspensão no escoamento (BEVEN, 2006, 2011; KHATAMI *et al.*, 2019).

Além dos processos de interceptação e infiltração de água no solo, as formas de roteamento do escoamento entre as células obedecem diferentes algoritmos como o R8, que também podem não representar com fidelidade o processo de escoamento. Os cálculos matemáticos de ligação do escoamento entre células, necessita de equações de continuidade complexas para reproduzir os fluxos de massa, considerando *timesteps* que obedecem a relação de Courant. Mesmo capacitados em termos de representação do meio e de processos, estes sistemas matemáticos não têm capacidade plena de representar totalmente a dinâmica dos processos erosivos e de escoamento em escala de bacia. Borrelli *et al.* (2021) em estudo de revisão de modelos, apontou que apesar do interesse de uso de modelos direcionados a processos tenha aumentado, a especificidade de parametrização de modelos de base física de acordo com as condições locais e a falta de estudos e conhecimentos sobre os processos erosivos em muitas regiões são fatores limitantes para o uso mais difundido de modelos como WEPP e LISEM. O modelo WEPP responde por cerca de 6,4% e LISEM por 1,9% dos trabalhos publicados entre 435 modelos avaliados pelos autores, sendo que a RUSLE responde por 17,1%.

4.4 MODELO DE BASE FÍSICA E DISTRIBUÍDA LISEM

Como citado na literatura, o modelo *Limburg Soil Erosion Model* (LISEM) é um representante da classe de modelos de base física e distribuído com grande potencial de simular processos erosivos bem como também bem representar as condições dos fatores controladores de forma distribuída pela paisagem. Ele foi desenvolvido com base em estudos sobre bacias experimentais no sul da província de Limburg (The Netherlands). Esta região apresentava elevado nível de degradação pela erosão, e entre 1991 e 1994, um projeto de diagnóstico sobre a área considerava duas abordagens de atuação: um programa de coleta de dados a campo e laboratório, e um programa para a modelagem dos processos erosivos nestas bacias (DE ROO *et al.*, 1994). A partir de modelos antecessores, entre eles CREAMS, ANSWER, AGNPS, KINEROS e EUROSEM, foram herdadas algumas características e equações ao qual se procurou evoluir para: a) melhorar a descrição dos processos de infiltração e desagregação; b) integração do modelo com um sistema de informação geográfica (GIS) de forma nativa; c) permitir alimentar as entradas através de dados de

sensoriamento remoto (DE ROO; WESSELING; RITSEMA, 1996). Sua principal vantagem, portanto, é a de ser de base física, com equacionamento de processos hidrológicos, mesmo que ainda sob fortes relações empíricas.

O LISEM é fundamentalmente um modelo hidrológico de superfície que simula os processos erosivos da bacia vertente até o canal fluvial resultando na produção de sedimentos (Figura 1). O modelo simula os processos de interceptação da chuva pelo dossel de plantas, armazenamento de água nas micro depressões da superfície do solo, a infiltração de água no perfil é operada por modelo Green & Ampt, tendo como resultante final a formação do escoamento superficial em cada célula. Sobre o excesso de infiltração é feito o roteamento do escoamento superficial de acordo com algoritmos e equações considerando o balanço de massa através de uma de onda cinemática calculada por diferenças finitas associada com a equação de Manning. Na simulação da erosão, os sedimentos erodidos são gerados por dois processos principais: a desagregação devida ao impacto da gota da chuva sobre o solo, e desagregação do solo pelo fluxo do escoamento superficial sobre o solo. Na sequência, processos de transporte e deposição ocorrem ao longo da simulação, produzindo ao final como resultado, hidrogramas e sedimentogramas da vazão, concentração de sedimentos em suspensão e da produção de sedimentos total.

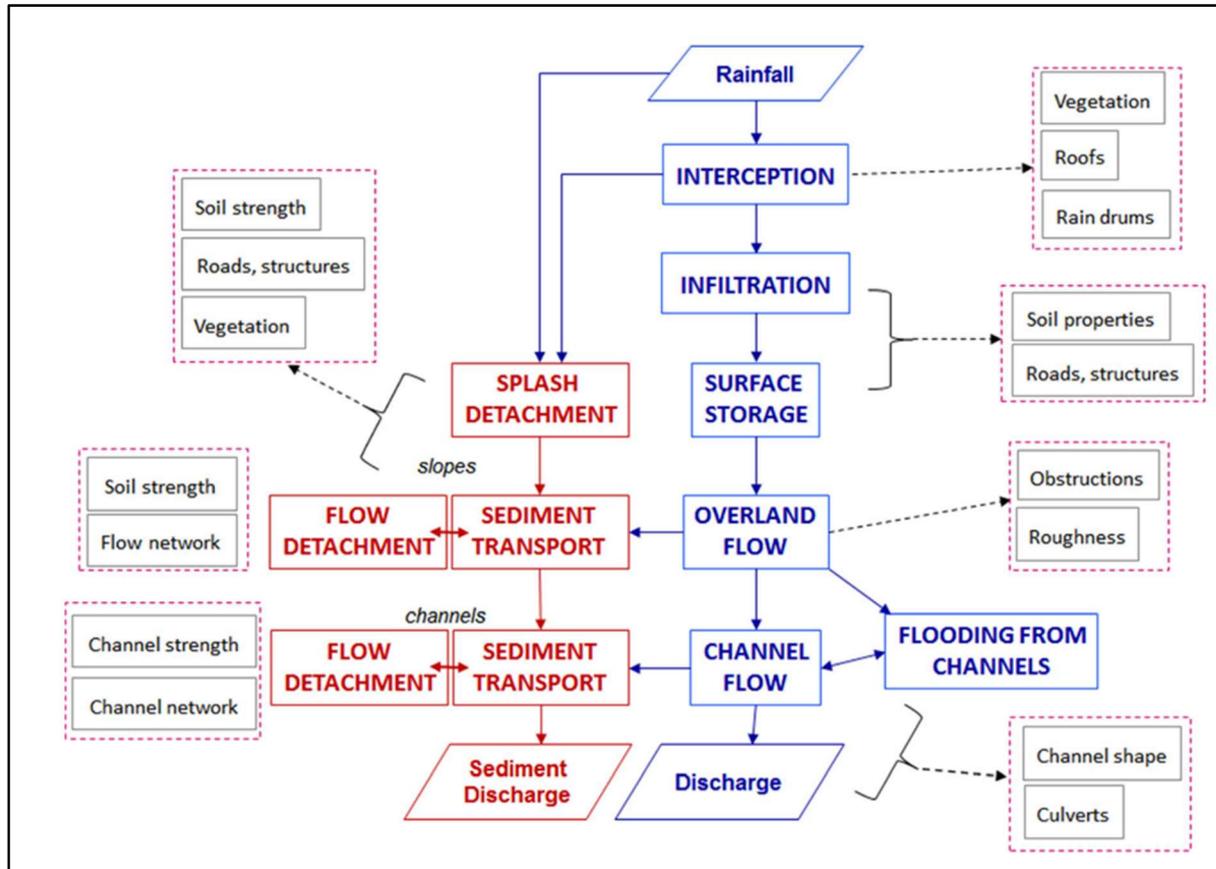
4.5 APLICAÇÃO DO LISEM NA BACIA EM ARVOREZINHA

A bacia hidrográfica do Arroio Lajeado Ferreira no município de Arvorezinha, doravante denominada simplesmente de Bacia de Arvorezinha, é uma bacia experimental de aproximadamente 1,26 km² de área localizada no rebordo do Planalto, situada na cabeceira da bacia maior ao qual pertence do Rio Guaporé. Suas características marcantes são, a expressiva ação do relevo nas encostas, os solos frágeis e submetidos ao uso intensivo pela agricultura e a um regime pluviométrico relativamente alto e bem distribuído ao longo do ano, as vezes com incidência de chuvas que podem ser caracterizadas como extremas para as condições locais. A expansão agrícola nestas regiões oferece condições para rápida degradação dos solos quando não adequadamente manejados com sistemas conservacionistas. Isto contribui para a geração e manutenção do ciclo de pobreza rural, onde a perda de qualidade de solo diminui a capacidade produtiva e por consequência, a capacidade de investimentos pelo agricultor na sua manutenção pela diminuição da renda na propriedade (TROIAN, 2020).

Um projeto de diagnóstico e apoio governamental promovido pelo governo do Estado do Rio Grande do Sul e Banco Mundial em parceria com universidades e entidades privadas, foi iniciado em 2001 para fomento da erradicação da pobreza rural nesta bacia

hidrográfica rural, deficiente em recursos e associada com elevado impacto ambiental pela agricultura (MINELLA *et al.*, 2022).

Figura 1 - Processos operados pelo LISEM. Hidrológicos (azul) e sedimentos (vermelho).



Fonte: <https://blog.utwente.nl/lisem/basic-theory/>

A partir de então, iniciou-se um trabalho de monitoramento dos processos erosivos e da atividade antrópica sobre a bacia, para avaliar o nível de impacto ambiental pela agricultura nesses ambientes. Para isso, o Grupo de Pesquisa em Erosão e Hidrologia de Superfície (GIPEHS) da Universidade Federal de Santa Maria, junto com outras entidades vem desenvolvendo pesquisas em bacias hidrográficas através de competente monitoramento ambiental, onde realiza a caracterização detalhada das propriedades do solo, do relevo, a dinâmica do uso e manejo da cobertura vegetal pela agricultura, a componente climática e a mensuração dos escoamentos e da produção de sedimentos da bacia. O monitoramento da bacia hidrográfica de Arvorezinha no sul do Brasil, conta com 20 anos de dados monitorados, sendo uma das poucas bacias de cabeceira de pequeno porte que detém uma base de dados de tão longo período de monitoramento contínuo no Brasil.

Monitoramento e modelagem evoluíram de maneira conjunta, com uma base cada vez mais completa de informações sobre o comportamento da bacia pelo monitoramento, e a identificação dos diferentes processos hidrológicos e erosivos. Estas características, associadas com a existência de um monitoramento de variáveis ambientais, lhe condiciona a ser um excelente laboratório para calibração e desenvolvimento de modelos de base física e distribuídos, com foco direcionado aos processos erosivos. Os testes iniciais com modelos matemáticos de base física na bacia experimental de Arvorezinha começaram a ser realizados após quatro anos de dados hidrológicos monitorados e quando houve uma base mais sólida de dados sobre o comportamento hidrológico do solo. O modelo escolhido foi o LISEM (*Limburg Soil Erosion Model*) (DE ROO; OFFERMANS; CREMERS, 1996; DE ROO; WESSELING; RITSEMA, 1996), reconhecido como de grande potencial para modelagem de bacias que apresentam alta complexidade em termos de relevo pronunciado, diversidade de solos, grande heterogeneidade espacial dos usos e sistemas de manejo. Pela sua capacidade de representar a dinâmica espacial dos usos e de reproduzir o processo de escoamento superficial, torna-se uma ferramenta potencial para estimar estes impactos sobre a exportação de água e sedimentos desta bacia, que apresenta características de forte ação do relevo e das práticas agrícolas sobre as perdas da erosão. A calibração e desenvolvimento de aplicações do modelo LISEM sobre a bacia se deu através de várias pesquisas de modelagem, que foram evoluindo tanto na aquisição de dados sobre a paisagem como na representação mais adequada de processos hidrológicos. Os trabalhos iniciais com o modelo apontavam o bom potencial para simular as perdas de água, com bom ajuste dos hidrogramas, e de expressar as alterações antrópicas previstas em cenários de uso. Paralelamente ao monitoramento, são conduzidos diversos estudos científicos interdisciplinares, que propiciaram evolução no conhecimento das características e dos processos operantes na bacia (BARROS, 2016a; DALBIANCO, 2009, 2013a; DE BARROS, C A P *et al.*, 2021; MINELLA; WALLING; MERTEN, 2008).

Entretanto, ao longo dos trabalhos de modelagem foram surgindo desafios no sentido de caracterizar processos hidrológicos e representá-los adequadamente no modelo com bons níveis de desempenho, alguns de caráter comum a outras bacias estudadas, outras particulares à condição de Arvorezinha. Nos próximos parágrafos iremos relacionar e discutir aspectos gerais que afetam a modelagem com o LISEM e quais são as questões desafiadoras para o melhorar o desempenho do modelo a partir da experiência obtida nos estudos com esta bacia. Ao mesmo tempo iremos apresentar características e evidências de fatores controladores dos processos erosivos da bacia que podem explicar seu comportamento e o desempenho da

modelagem, amparado em subsídios de trabalhos na literatura relacionados com estas questões.

4.6 DESAFIOS NA MODELAGEM DA EROÇÃO COM LISEM

Este estudo ocorre sobre uma bacia hidrográfica de intensa atividade antrópica e com características heterogêneas de constituição física, tanto de solos como relevo, usos e cobertura vegetal, e que sofre variações em seu manejo muito dinâmicas, com anos intercalados entre bom manejo e cobertura do solo e anos com negligência quanto às práticas conservacionistas. Também uma variação nas condições climáticas de ano para ano, afetados pela ação dos fenômenos “El Nino” e “La Ninha”, intercalando anos com grandes volumes de precipitação com anos de menor volume que a média. Ao mesmo tempo que traz uma riqueza de situações contrastantes, aumenta também a complexidade para a modelagem, pois há inúmeros processos interagindo e influenciados por muitos fatores controladores. Somado a isso temos que o modelo LISEM se propõe a representar processos em escala de eventos independentes, nos quais sabe-se que existe forte interdependência entre eventos e seus anteriores.

Jetten et al. (2002) já apontava que as dificuldades associadas com a calibração e validação de modelos erosivos distribuídos advém da grande variabilidade espacial e temporal dos fenômenos hidrológicos e das incertezas associadas à alimentação dos parâmetros. Por ser destinado a eventos, para usar o modelo como ferramenta de diagnóstico da atividade antrópica, precisamos calibrar grande número de eventos pontuais individualmente ao longo do período considerado, sendo esta calibração feita a partir de uma eficiente caracterização do meio e parametrização do modelo. Da mesma forma, Cuomo (2016) relaciona uma síntese das prováveis causas das incertezas nas predições do modelo, sendo: baixa qualidade dos dados de entrada, incertezas sobre os valores obtidos a campo, complexidade dos eventos de precipitação, tipos de solo e uso e cobertura, e finalmente a ausência de alguns processos a serem representados no modelo, como movimentos laterais e escoamento de base.

As considerações de Takken et al. (2005), que descrevem três possíveis grupos de incertezas ligadas ao desempenho do modelo LISEM, servem de base para a formulação da discussão proposta por este trabalho. São eles:

- a) descrição dos processos ou erros estruturais do modelo: ocorre quando o modelo não apresenta equações matemáticas que representem adequadamente os processos físicos;

- b) parametrização equivocada (erros na entrada ao modelo): ocorre quando alimentamos o modelo com dados de má qualidade, com parâmetros fora de limites com significado físico;
- c) a implementação espacial (discretização espacial e método de roteamento): ocorre quando não representamos adequadamente a variabilidade dos parâmetros do meio físico com a adequada discretização e resolução espacial, ou usamos algoritmos de roteamento dos fluxos incondizentes com os processos governados pelo relevo.

A adequação da capacidade representativa dos processos pelo modelo com os efetivamente observados na bacia, precisa ser sintonizado. O modelo apenas vai apresentar bom desempenho se estiver de acordo com os processos hidrológicos operantes na bacia. Erros estruturais são comuns na fase de desenvolvimento, visto ser um software de alta complexidade e que requer excelência na programação. Ao longo dos anos, houve o desenvolvimento e agregação de novos processos ao modelo que foram paulatinamente sendo testados e corrigidos em novas versões. A partir do momento que os desenvolvedores profissionalizaram a administração do desenvolvimento, com controle de versões e reportagem de erros nas versões, certos comportamentos erráticos do modelo foram sendo conhecidos e a calibração dos eventos corrigida.

Uma das principais limitações do modelo LISEM se refere à não disponibilidade de rotinas avançadas de roteamento subsuperficial dos escoamentos. Apesar de simular o fluxo vertical esperado por diferentes métodos disponíveis, onde equação de Green & Ampt é a mais usada nos estudos da bacia, a falta de uma rotina deste tipo pode ser limitante do seu uso para certas bacias. Ritsema et al. (1996) durante os estudos preparatórios de concepção do modelo, realizaram simulações bidimensionais da dinâmica do fluxo da água em 4 encostas pertencentes à região de Limburg. Após verificarem que os fluxos laterais nas encostas durante eventos de precipitação mensurados, correspondiam entre 1.6 e 4.7% do deslocamento total de água nos perfis, concluíram e optaram por incorporar um sistema apenas unidimensional para representá-lo. No entanto, uma das principais habilidades do modelo é ter uma boa representação dos processos de formação e do roteamento do escoamento superficial. Mesmo existindo métodos mais apurados para este fim, ele alia a simplicidade do método de cálculo com eficiência do sistema computacional. Para bacias onde o escoamento superficial seja o processo predominante dos fluxos e sendo o processo erosivo devido ao escoamento superficial o mais importante a ser estimado, o LISEM apresenta boa estrutura de equações para esta finalidade.

Mas, este pode não ser o caso de bacias onde se propunha aplicar o LISEM, onde estes processos têm participação significativa, como na bacia deste estudo. Mesmo sendo a bacia de Arvorezinha uma bacia que se caracteriza por ter relevo acentuado em sua maior área e ser ela contribuinte para o processo de escoamento superficial como a principal fonte de processos erosivos, ela apresenta regiões em menor expressão que são contribuintes por fluxos subsuperficiais para o caudal. Isto adiciona uma componente de incerteza na modelagem em função que é preciso estimar a separação do escoamento dos eventos para comparar os resultados com os dados em um ponto de avaliação. Barros (2012) conhecendo esta característica de mistura de tipos de escoamento nos eventos de Arvorezinha e a limitação do LISEM em não representar os escoamentos subsuperficiais, investigou o percentual de mistura dos escoamentos dos eventos para melhor calibrar o modelo. Neste sentido, utilizou o método de separação gráfica como abordagem de calibração do escoamento superficial dos eventos, mas com resultados com certo grau de incertezas em função de que a existência de fluxos subsuperficiais eram considerados como existentes como hipótese, mas não quantificados. Desta forma, na preparação dos eventos a serem simulados, rotinas de separação do escoamento foram utilizadas, inicialmente pelo método gráfico proposto por Neill e Stedinger (1967).

Embora alentada desde o início do monitoramento na bacia, a participação da componente subsuperficial nos escoamentos só começou a ser melhor investigada a partir de trabalhos de identificação da mistura de componentes dos escoamentos. Assim, alguns autores apontam que a participação dos fluxos subsuperficiais podem representar aproximadamente até 50% dos escoamentos (BARROS, 2016a; ROBINET *et al.*, 2018a). Com uma oferta mais abundante de dados hidrológicos, avanços na investigação dos processos erosivos e na modelagem matemática foram obtidos com tese de doutorado de Barros (2016a), onde foram avaliadas algumas limitações e condicionantes que geram incertezas nos resultados do modelo para produção de sedimentos. O autor investigou os processos hidrológicos na bacia e a participação dos fluxos subsuperficiais na descarga dos eventos através de análises de silício dissolvido, comprovando que existe uma alta participação deste tipo de escoamento na bacia, dissolvendo a concentração de sedimentos em suspensão. Este estudo contribuiu para uma ideia mais clara sobre os processos de escoamento da bacia, mas por ser um método de análise de difícil execução e de alto custo, não pode ser usado em toda base de eventos. Assim, pela aptidão da versão testada pelo autor em termos de simular basicamente escoamentos superficiais e equações erosivas intrínsecas à versão do modelo, o estudo evidenciou

limitações do uso do modelo para simular certos tipos de bacias com estes processos hidrológicos.

O uso de filtros matemáticos de separação do escoamento nos eventos foi então considerado como possível alternativa de baixo custo e fácil aplicação. Schlesner (2017) utilizou um filtro de Lyne e Hollick (LYNE; HOLLICK, 1979) para separação de 20 eventos simulados com diferentes características com objetivo de calibrar sedimentos, sendo que o filtro apresentou uma resposta moderada na separação em relação ao método gráfico, especialmente no trato de eventos mais complexos. Já Bernardi (2018a), procurou calibrar um filtro de maior complexidade, Eckard (1952), associado com os dados de participação dos escoamentos obtido por Barros (2016a), ajustando valores de parâmetros que representem a mistura dos eventos da bacia de Arvorezinha com mais fidelidade, unindo vantagens de ambos os métodos numa só ferramenta.

Uma segunda fonte de incertezas sobre a representação de processos é com relação ao cálculo da produção de sedimentos pelas equações do modelo. Uma condição de recorrência apresentada nos resultados da modelagem era a superestimativa da produção de sedimentos apresentada nas simulações, o que forçava a calibração dos valores de coesão do solo para valores fora dos intervalos mensurados a campo para a variável. Até meados de 2017, as versões disponíveis do LISEM apresentavam apenas uma única equação de eficiência de desagregação, equação esta que acoplada à equação de desagregação principal do modelo modula a quantidade de sedimentos desagregados do solo pelo escoamento superficial. Assim que disponibilizada, Schlesner (2017) testou uma versão mais atualizada do modelo que utiliza outras opções de equações de eficiência da desagregação. A opção pelo uso de uma equação utilizada inicialmente no modelo EUROSEM, apresentou resultados de produção de sedimentos simulados muito mais próximos das perdas reais, considerando separação de escoamentos, influência das estradas, uma representação do relevo mais precisa, mas mantendo um bom ajuste dos hidrogramas para as condições da bacia.

Sobre a parametrização equivocada anteriormente levantada por Takken, logo após a formulação teórica e construção do modelo LISEM, De Roo (1998) ao avaliar os resultados do então novo modelo acoplado a um GIS, verificou limitações dos modelos distribuídos em representar espacialmente os processos erosivos. Ele atribui isso às incertezas e dificuldades em estimar e mensurar o grande número de variáveis de entrada em escala de bacia. Isto envolve de fato uma grande quantia de informações que, para boa qualidade das predições, precisa apresentar um detalhamento enorme, sendo de alto custo e serem realizadas de forma contínua, em função da dinâmica da ocupação e condições climáticas. Estes modelos existem

justamente para simular diferentes condições, diferentes configurações de parâmetros iniciais para avaliar o impacto nas predições dos fatores controladores, no caso estipulando cenários. Mas para isto é necessária adequada calibração do modelo, bem como validação das predições, o que só pode ser obtido se calibrados amparados com intensiva coleta de dados. Neste sentido, simplificações são operadas no sentido de reduzir esta complexidade, porém isto impacta nos resultados e nas incertezas associadas. Sendo a calibração do modelo LISEM nos estudos com a bacia de Arvorezinha obtidos a partir de uma base robusta de dados de uma bacia intensivamente monitorada, aumenta a confiabilidade sobre o real desempenho do modelo.

Uma das principais falhas na modelagem é a excessiva generalização nas informações sob o aspecto temporal e espacial. Estas generalizações podem ocorrer em dados sobre o comportamento e distribuição da precipitação, configuração da cobertura vegetal, simplificação do relevo, espacialização das características de solo, e uso de equacionamento incoerente com os processos, entre outros. Como é grande o número de parâmetros usados pelo LISEM, é grande a fonte de possíveis incertezas sobre a ação deles no contexto de bacia. Entretanto, pela experiência obtida nos trabalhos desenvolvidos, muitos parâmetros apresentam baixo impacto no resultado das simulações, enquanto alguns principais apresentam alto impacto, como no caso o conteúdo de água do solo e a condutividade hidráulica do solo para a formação do escoamento superficial e a coesão dos solos para a produção de sedimentos.

Sobre a discussão da implementação espacial nos modelos como fonte de erros na modelagem, em modelos distribuídos suportados por ferramentas de SIG como o LISEM, algum tipo de arranjo espacial é adotado, seja através de polígonos que abrangem áreas de mesmas características, como unidades hidrologicamente semelhantes, que podem apresentar áreas de menos de um até centenas de hectares, ou então o uso de células raster, que podem assumir diferentes dimensões e mesmo formatos geométricos. Os mais comuns são as células quadradas, que assumem sistemas de representação computacional na forma de uma matriz de valores ajustadas em linhas e colunas. O LISEM, com estrutura raster de representação espacial, é apontado como o apresenta bons resultados em função que a representação raster permite um melhor detalhamento da paisagem em larga escala, uma melhor representação da variabilidade espacial dos atributos, maior correlação espacial dos atributos do meio com os parâmetros de entrada ao modelo, o que permite uma melhor espacialização também dos resultados da erosão sobre a área. O maior ou menor detalhamento da paisagem está relacionado com aspectos se a região é homogênea, se o relevo é mais uniforme, se o uso

predominante é o mesmo, que permitem aumentar o tamanho de célula e a área de cobertura, o que traz melhor rendimento computacional. Ao contrário, para casos em que a área apresenta relevo mais acidentado, usos mais diversificados ou processos hidrológicos mais específicos, células menores devem ser utilizadas a fim de melhorar a caracterização espacial. Da mesma forma, células menores tendem a apresentar uma melhor resposta no cálculo de processos hidrológicos como no caso do escoamento superficial, sob um certo custo de desempenho computacional. Hoje temos computadores mais velozes o que permite explorar menores tamanhos de células e mesmo timesteps menores. Ambos melhoram o poder de predição da modelagem, pois permitem cálculos mais corretos para as equações diferenciais de movimento de massa. Resoluções de 30 metros de célula foram utilizados em trabalhos de modelagem com o LISEM sobre a bacia, em função da fonte de dados de relevo por satélites disponíveis a pouco tempo ser restrita a esta dimensão. Hoje temos melhores resoluções de dados espaciais obtidas de satélites, entre centímetros e algo como de 10 metros, dependendo da fonte e dos objetivos.

Quanto ao desempenho sob diferentes resoluções espaciais, Hessel (2005) avaliou diferentes tamanhos (entre 5 e 100 m) de células e diferentes intervalos de tempo (entre 2 e 120 s) nos resultados do LISEM e constatou haver grande variação nos resultados em função destes dois parâmetros, sendo que sua escolha deve ser avaliada previamente, antes da calibração. Em trabalhos locais na bacia de Arvorezinha, se evoluiu de trabalhos com resolução de 90 m para simulações com 5 metros de tamanho de célula. O uso de 5 m nos trabalhos com o LISEM foi possível a partir de interpolações feitas com a base de dados de 30 m do SRTM e de 10 m obtidas a partir do satélite ALOS PALSAR. Posteriormente, um trabalho de levantamento a campo com aparelho GPS de precisão foi realizado em 2014, com intuito de ofertar ao modelo um modelo digital de terreno realístico e de maior precisão. Este modelo gerado a partir deste levantamento é utilizado até o momento devido ser a melhor informação disponível até o momento, mas que alia a precisão dos dados altimétricos, e por consequência dos valores de declividade entre células calculado, com a melhor distribuição espacial dos demais fatores controladores atrelada à distribuição espacial necessária para as simulações.

Em síntese, estes estudos apresentaram avanços nas ferramentas de diagnóstico e qualidade na obtenção dos parâmetros de entrada, que resultaram em avanços na modelagem hidrológica, mas não foram acompanhados de uma melhora significativa do poder preditivo do modelo na simulação de sedimentos. Isto foi relatado por Hessel (2003) que mesmo introduzindo novos conceitos de preparação ao modelo em um trabalho de parametrização

específica para as condições de uma bacia na China, conclui que melhorias teóricas podem dar novos direcionamentos para representar alguns processos, mas não necessariamente melhoram sua resposta preditiva. Especificamente para a condição de Arvorezinha, em resumo como motivos para tal constatação, os estudos relacionam a complexidade dos processos que ocorrem na escala de bacia, a inabilidade do modelo em representar processos subsuperficiais, a variabilidade espacial dos fatores de solo, equações que são pouco sensíveis à alteração dos parâmetros, as alterações das condições iniciais entre eventos que podem alterar completamente o comportamento hidrológico, o que é não capturado pelo modelo, e o grande número de parâmetros que precisam ser calibrados.

4.7 AGENTES DO PROCESSO EROSIVO NA BACIA OPERADOS PELO LISEM

4.7.1 Precipitação

A erosão hídrica ocorre devido ao comportamento e ação da precipitação pluviométrica sobre uma determinada região. O regime pluviométrico, portanto, além do impacto direto da energia que provoca desagregação, determina o volume de água que incide sobre um local, que associado com a capacidade do solo de infiltrar este volume de água, vai gerar ou não o escoamento superficial. Este excedente de água sobre a superfície do solo na forma de escoamento superficial pode causar um segundo processo erosivo importante, pela desagregação de partículas do solo pela energia cinética do escoamento, também desagregando e transportando partículas. Além da intensidade da chuva, a duração do fenômeno sobre uma região também influencia a quantidade e acumulado de energia incidente. Da mesma forma, o regime de frequência de incidência na região interfere nos períodos de recarga e evaporação de água no solo.(NEARING *et al.*, 2005)

Sobre o globo terrestre, o padrão climático sofre influência da altitude, posição geográfica em relação ao equador, o efeito cíclico das estações do ano pela translação da Terra em torno do Sol. O regime de precipitação também é influenciado pelas correntes marítimas e temperatura dos oceanos. Aspectos sobre a intensidade, duração e frequência da chuva promovem a ação energética do impacto direto ou indireto da gota da chuva sobre o solo, causando a desagregação e disponibilidade para o transporte das partículas de solo. Identificar o comportamento energético da chuva em determinada região é o primeiro passo para o estudo dos processos erosivos. A erosividade da chuva é um índice obtido a partir da energia cinética da chuva, e determina o potencial energético de desagregação do solo e da formação do escoamento superficial com base principalmente na intensidade máxima da chuva em determinado período, no caso em 30 minutos (EI_{30}) (WISCHMEIER; SMITH,

1978). Sendo que o processo erosivo é complexo, estudos sobre a erosividade são feitos principalmente em ambientes mais controlados em pequenas parcelas, visto que em escalas maiores, outros fatores influenciam as quantias a serem mesuradas. Sendo que a precipitação apresenta características particulares a cada região, diferentes equações são formuladas a partir de dados locais. Tamanho e velocidade da gota de chuva determinam a sua energia cinética, que ao entrar em contato com o solo, se transforma em energia mecânica de impacto. No entanto, no Brasil são poucos os locais monitorados e são poucas as equações disponíveis, sendo que normalmente se usam equações formuladas em outras regiões, notadamente dos Estados Unidos. Nos trabalhos de modelagem com o LISEM executados em Arvorezinha até 2017 foram usadas equações empíricas que relacionam a energia cinética de desagregação com a intensidade da chuva. No que concerne à situação do sul do Brasil, a região apresenta efeitos cíclicos devidos ao La Nina e El Nino, fenômenos climáticos de escala regional que são manifestações das alterações de temperatura do oceano Pacífico. Este padrão cíclico tem se intensificado nas últimas décadas provocando alterações no padrão de erosividade da precipitação, sendo que Almagro et al. (2017) avaliou cenários projetados para alterações climáticas sobre a erosividade das chuvas, estimando que poderá ocorrer um aumento de até 109% nos níveis de erosividade para a região sul do Brasil no período entre 2007 e 2040.

O modelo LISEM é bem equipado para representar os principais processos envolvidos com a erosão ligados à precipitação. Primeiramente calcula a interceptação e armazenamento na vegetação, o armazenamento superficial no solo e a erosão pelo impacto direto e indireto pela gota da chuva. A interceptação ocorre em função da cobertura vegetal do solo, representada através dos mapas de entrada de parâmetros ligados ao armazenamento direto pelas plantas (*canopy storage*), índice de área foliar (LAI) e altura de plantas. São variáveis que se modificam ao longo do tempo, sendo necessário atribuí-los para cada evento particular, obedecendo o crescimento das culturas. Agem nos processos de interceptação e redução da energia cinética da gota da chuva. Também podemos atribuir um percentual da área da célula sobre o qual queremos fazer incidir os parâmetros (*cell cover*), útil no caso de células de maior tamanho com condições heterogêneas. A área da célula que é impermeável devido alguma estrutura física como telhados é determinada com o mapa *house cover* e a área com estradas impermeáveis pode ser definida com o mapa *road wide*.

A erosividade da chuva pode ser representada sob diferentes formatos de equações, sendo sua energia cinética utilizada para o cálculo da desagregação pelo impacto da gota da chuva, processo chamado de *splash detachment*. Em relação à erodibilidade do solo, ela é representada no processo através do número de gotas necessários para quebrar os agregados

do solo em pelo menos 50% de seu tamanho original. Após a subtração da precipitação pela interceptação da vegetação, a desagregação e deposição pelo impacto é calculada pela equação empírica:

$$depsplash = \left(\frac{2,82}{As} Ke e^{(-1,48 h)} + 2,96 \right) Ph \frac{A}{dt}$$

Onde: *depsplash* é a taxa de deposição de respingos ($\text{kg m}^{-2}\text{s}^{-1}$); *As* é a estabilidade do agregado, o número mediano de gotas para diminuir a massa agregada em 50% (-); *Ke* a energia cinética da chuva ($\text{J m}^{-2} \text{mm}^{-1}$); *Ph* é a precipitação (mm); *A* é a área de superfície onde ocorre o desprendimento do respingo (m^2).

Além da precipitação direta, aquela que incide sobre o solo sem interferência pela vegetação, temos a precipitação indireta estimada em função da ação da vegetação reduzindo a energia inicialmente incidente. A energia cinética pela precipitação direta e pela indireta é calculada separadamente por:

$$Ke,r = 8.95 + 8.44 \text{Log}(Ph)$$

$$Ke,t = 15.8 \sqrt{hveg} - 5.87$$

Onde: *hveg* é a altura da vegetação (m).

Boas estimativas da energia cinética da chuva para fins de modelagem de base física são necessárias para o bom desempenho do modelo. Alguns dos principais trabalhos recentes de monitoramento da energia pelo impacto da gota da chuva na bacia de Arvorezinha foram realizados por Oliveira (2012) e Ramon (2017). Oliveira analisou mediante chuva simulada, os efeitos sobre a desagregação superficial dos solos gerados pela precipitação e pelo escoamento superficial utilizando um simulador de chuvas. O autor estimou mediante uma chuva simulada de intensidade de 70 mm h^{-1} as taxas de perdas de solo em pequenas parcelas nas encostas, para determinação do fator de erodibilidade do solo entresulcos. No experimento à campo ele encontrou para as condições do experimento em Argissolo na bacia o valor de $0,64 \times 10^6 \text{ kg s m}^{-4}$. No entanto, ao usar o modelo WEPP para estimar a taxa de erodibilidade, verificou que o modelo superestimou em 6,6 a 2,5 vezes o valor de *Ki* em relação ao mensurado. Isto evidencia que é preciso adotar ressalvas quanto aos valores estimados pelos modelos, visto que temos grande variabilidade de comportamentos de solos que não são bem representados por algumas equações presentes nestes modelos.

A partir de 2017, com trabalho de monitoramento da precipitação a partir de um equipamento Parsival da OTT, um disdrômetro que quantifica e qualifica as gotas da precipitação uma a uma, foi possível gerar uma equação específica para a região, ao qual passou a ser usada no LISEM em trabalhos subsequentes, qualificando os dados inseridos e a capacidade preditiva do modelo deste processo. (RAMON *et al.*, 2017). Também para Arvorezinha, Ramon realizou estudo com base nas relações entre a precipitação e variáveis de escoamento, concentração de sedimentos e produção de sedimentos sobre um período de 22 meses de monitoramento da precipitação, agora sobre o contexto de escala maior de bacia. As variáveis avaliadas de precipitação total (mm), energia cinética ($J m^{-2} h^{-1}$) e intensidade em 30 minutos ($mm h^{-1}$) apresentaram correlações positivas, se bem que com valores medianos de coeficientes de ajuste, com a concentração de sedimentos em suspensão ($mg L^{-1}$) e produção de sedimentos (ton) mensurados nos eventos do período. Isto mostra que no contexto de bacia, a avaliação da magnitude da erosão pelo impacto da gora da chuva é muito mais complexa e onerosa, pois é difícil quantificar as diferentes componentes e origens dos sedimentos transportados. Embora tenha importância no contexto da erosão em bacias hidrográficas sob manejos deficientes de práticas de conservação do solo como na bacia, não é o foco deste estudo aprofundar aspectos relacionados da precipitação como agente de erosividade, mas tão somente dela como agente promotor do escoamento e condicionamento dos solos e dos fluxos na escala de bacia.

4.7.2 Relevô

Durante o desenvolvimento do relevo na paisagem pelas atividades sísmicas e vulcânicas e pela ação da erosão fluvial, ele condiciona a gênese e formação do solo, suas propriedades texturais e hidráulicas, condiciona os fluxos de água no perfil em profundidade e ao longo das encostas (ALI *et al.*, 2013; MORGAN, 2009). Também influencia nos processos de armazenamento superficial, infiltração de água, aceleração do escoamento, desaceleração e deposição de sedimentos na topossequência (SHRESTHA; SURIYAPRASIT; PRACHANSRI, 2014). A partir da constatação da importância do relevo nos processos hidrológicos, modelos de base física e distribuído se apoiaram em caracterizar o relevo e importá-lo para dentro de suas rotinas de cálculo com auxílio de sistemas de informações geográficos. Entre os mais destacados que consideram a ação do relevo temos o Topmodel (BEVEN *et al.*, 1995) e versões seguintes com novas implementações como o Dynamic Topmodel (BEVEN, 1997; BEVEN; FREER, 2001).

García-Ruiz et al. (2015) em revisão sobre o efeito da declividade nas taxas de erosão sobre 624 estudos aponta que apesar de a declividade ser considerada fator crucial para explicar a variabilidade das taxas em função dos diferentes ambientes mensurados, a maioria deles é realizada na escala de parcelas em encostas agrícolas, o que acusa relações entre taxas de erosão e declividades entre 0-0.2 m.m⁻¹ razão pela qual é limitada a análise quando consideramos taxas na escala do complexo de bacias com maior diversidade de condições. Segundo definição de Savenije (2010) a visão reducionista que observa processos físicos em escalas menores, não leva à formulação de equações preditivas na escala relevante que os processos hidrológicos importantes acontecem, principalmente devido à heterogeneidade e à desconsideração de padrões em larga escala na bacia. Portanto, precisamos modelar nossas bacias hidrográficas em escalas condizentes entre a macro escala da bacia com base em dados observáveis na mesma macro escala, considerando a organização da paisagem em "unidades funcionais" topograficamente controladas (ZEHE; SIVAPALAN, 2009). Estas duas colocações denotam a importância do uso de sistemas físicos e distribuídos para avaliar a erosão em sistemas de bacias hidrográficas, visto que os processos de transferência de matéria e energia entre as diferentes escalas sofrem a interação de diversos fatores característicos da paisagem em grande escala, e só podem ser avaliados com dados nesta escala maior (MINELLA *et al.*, 2010).

No LISEM, o relevo é usado para determinar as declividades entre as células adjacentes, valores utilizados nas equações de cálculo da potência de fluxo pelo escoamento superficial, bem como a direção do roteamento do escoamento superficial gerado como será abordado em sequência. O LISEM previu na sua concepção o acoplamento a um sistema de informações geográficas para extrair informações da morfologia da bacia a ser simulada. Com adequada resolução espacial obtém precisão em cotas altimétricas, capacitando o modelo para definir os limites geográficos da bacia, representar características topográficas da superfície das encostas, como depressões, cumes, ravinas, canais amplos, faixas de contenção, estradas, rede de drenagem, avaliação das declividades das encostas e outros detalhes. Os mapas básicos que representam a caracterização física da bacia em relação ao relevo e outras variáveis derivadas no LISEM são: modelo digital de elevação (MDE), declividade (Gradiente), direção de fluxo (LDD), ponto de saída e concentração de todo fluxo na bacia (Outlet) e pontos de captura de valores monitorados no modelo (Points). Estes mapas básicos do relevo sofrem pouca alteração ao longo dos anos, a não ser eventualmente o LDD em função dos cultivos. Porém, considera cada célula como uma área uniforme em relação aos parâmetros de entrada, o que pode ser limitante na representação dos processos com uso de

baixa resolução espacial. Em uma célula de 5x5 metros temos 25 m² de superfície uniforme, uma área que pode não representar as condições naturais de escoamento superficial apropriadamente.

Uma característica da bacia de Arvorezinha é a presença de relevo acentuado e representativa da condição das encostas basálticas do RS, e por isso, uma bacia hidrográfica de interesse nos estudos de erosão. O principal uso sobre os solos da bacia, a cultura do tabaco se caracteriza pela intensa manipulação do solo para seu preparo, além de sofrer ação de altas cargas de fertilizantes e pesticidas para o controle de pragas e ervas daninhas (MERTEN; MINELLA, 2006). Como a cultura é exigente em boa drenagem, são utilizadas encostas com maior declividade, onde são construídos camalhões no sentido do declive para favorecer a drenagem, facilitando a ação da erosão (DALBIANCO, 2013a) O relevo da bacia, associado com este uso intensivo atua de forma determinante sobre os processos erosivos. O relevo condiciona os fluxos tanto superficiais como subsuperficiais, e desempenha papel importante na retenção de água no solo ao longo das encostas.(MINELLA *et al.*, 2009) A escala temporal dos processos de precipitação, escoamento superficial e roteamento destes fluxos para as partes baixas do relevo promovidas pela topografia são rápidos, seguindo o curso de alguns minutos ou algumas horas para formar o caudal registrado pelos hidrogramas no exutório. Já os processos em subsuperfície podem ser rápidos como em *pipings* ou em regiões florestadas com solos porosos e sob alto declive das encostas, ou serem lentos, como no caso da infiltração no perfil tanto no sentido vertical como no lateral e no meio microporoso da maioria dos solos.

Até meados de 2014 os estudos de simulações de erosão na bacia de Arvorezinha foram realizados com base no modelo digital de elevação gerado a partir de dados de satélite do projeto SRTM com resolução de 30 m, que deram suporte para os primeiros estudos de investigação da ação do relevo sobre a erosão (BARROS *et al.*, 2014; DALBIANCO, 2013b). Surgiram então especulações sobre a qualidade do MNE e de seu efeito no processo de simulação. A indisponibilidade de dados mais precisos sobre o relevo desta bacia com propósitos para pesquisas de modelagem, gerou a necessidade de um levantamento topográfico específico, para gerar um modelo numérico de elevação (MNE) mais detalhado para ser aplicado nos modelos hidrológicos de base física e distribuídos. De posse deste novo modelo de terreno mais acurado, Barros et al. (2021) investigou as melhorias proporcionadas por ele e seu reflexo sobre a modelagem da bacia com o LISEM. Concluiu que os uso de modelos com melhor resolução causaram pouco impacto nos resultados, mas influenciaram na magnitude de atuação dos parâmetros de calibração hidrológica dos eventos. Considera que

além de boa qualidade do modelo, é preciso também evidenciar estruturas na bacia responsáveis pela influência no comportamento hidrológico dos eventos.

4.7.3 Vegetação

Não apenas o potencial energético da chuva diretamente afeta o processo erosivo. A erosividade da chuva, que representa o potencial energético da precipitação sofre uma série de atenuações em função da eventual cobertura do solo pela vegetação e da própria erodibilidade do solo, ou seja, quão propenso o solo está para sofrer desagregação em função de suas próprias características (WISCHMEIER; MANNERING, 1969). A erosão, portanto, é produto da combinação de fatores ligados à energia da precipitação e fatores ligados à capacidade do solo e sua cobertura em atenuar esta energia. A cobertura vegetal do solo desempenha um papel crucial na redução da erosão tanto pelo impacto das gotas de chuva quanto pelo escoamento superficial. A presença de vegetação atua como uma barreira física que protege o solo, minimizando os efeitos erosivos dos agentes externos. Braida *et al.* (2006) identificou que a manutenção de palha dissipou 30% da energia necessária para compactação, diminuindo os efeitos da precipitação na compactação do solo. Neste contexto, a importância da cobertura do solo como primeira ação para conter a energia erosiva é de suma importância, sendo que ações de manejo inadequadas à situação ambiental podem ter impactos decisivos no processo erosivo de um cultivo por exemplo. Cobertura vegetal oferecida pelas diferentes partes das plantas, principalmente as folhas, proporciona uma camada protetora que intercepta e absorve parte da energia cinética das gotas e a distribuem de forma mais suave sobre a superfície do solo em múltiplas trajetórias, exercendo um efeito significativo na redução da erosão, diminuindo o impacto direto das gotas que tendem a desagregar e deslocar as partículas do solo e impedindo a formação de sulcos e ravinas. Além do efeito direto da planta verde sobre o solo, a manutenção de palha e restos vegetais sobre os cultivos anuais pode também proteger e condicionar o solo. Segundo Campos *et al.* (1994) a cobertura verde no solos de diferentes espécies, principalmente a aveia preta contribuiu para a manutenção dos níveis de água no solo.

Quando a chuva atinge o solo, a cobertura vegetal retarda a velocidade e energia da água, permitindo maior infiltração e redução na velocidade do escoamento superficial. As raízes das plantas atuam como canais naturais que promovem a infiltração da água, melhorando a estrutura do solo e aumentando sua capacidade de armazenamento de água. Na superfície, ajuda a prevenir a formação de sulcos e a erosão concentrada, direcionando o fluxo de água ao longo de trajetórias mais suaves e dispersas. Alterações na cobertura vegetal e na

precipitação pluviométrica podem causar maior impacto na erosão do que o próprio escoamento, onde ela mantém uma inter-relação crucial com as propriedades do solo, aumentando a biodiversidade para áreas de declive acentuado que têm solos altamente erodíveis, conclui os autores Zuazo e Pleguezuelo (2008).

Os modelos mais conhecidos que consideram a ação da vegetação são a USLE (WISCHMEIER; SMITH, 1978) e a RUSLE com o seu fator C de cobertura do solo e manejo (ZHOU *et al.*, 2008). Modelos empíricos como a RUSLE (RENARD, 1997) foram idealizados a partir de estudos sobre pequenas parcelas com fatores controlados. O modelo considera principalmente a ação direta do impacto da gota da chuva e do nível de proteção que a vegetação proporciona na redução da desagregação. Mas desconsidera outros fatores fundamentais no processo erosivo quando avaliamos a erosão no conjunto de fatores do contexto de bacia, como relevo, formato das encostas, dinâmica do escoamento em termos de velocidade, direção e concentração do escoamento. Nestes casos, modelos de base física e distribuído tem o desafio de representar a ação da vegetação na redução do processo erosivo.

O LISEM, mais uma vez, apresenta rotinas de cálculos avançados no que se refere à importância da vegetação. Primeiramente, avalia a ação da vegetação no processo de interceptação e armazenamento de água pelas plantas. Diferentes espécies de plantas apresentam características distintas em relação à capacidade de proteção do solo contra a erosão. Estas diferentes estruturas podem ser representadas no LISEM através de diferentes parâmetros ligados à vegetação, como índice de área foliar, altura de plantas e densidade, fatores estes que devem de certa forma também representar diferentes qualidades de manejo. Em segundo lugar, possibilita modular a erosão pelo escoamento mediante modificação da coesão do solo adicional proporcionado pelas raízes das plantas. E terceiro, permite atuar na calibração da erosão pelo escoamento superficial pela ação da vegetação na velocidade do escoamento atuando no parâmetro n de Manning. Estudos têm mostrado que a presença de vegetação pode reduzir a erosão pelo escoamento superficial em até 90%. A vegetação desempenha papel importante na prevenção do processo erosivo nas encostas, bem como na manutenção da estrutura de canais esculpidos pela erosão e redução significativa da continuidade da degradação desses locais. Tem importância inclusive maior do que a própria aceleração da erosão proporcionada pelo relevo acentuado, segundo conclusões apontadas por Molina *et al.* (2009).

Além do relevo, mapas relacionados ao armazenamento na superfície do solo e da rugosidade do terreno fazem parte dos dados de entrada ao LISEM. Entre parâmetros que sofrem influência antrópica temos o de rugosidade aleatória (RR) que afeta o armazenamento

de água na superfície do solo, e o N de Manning que controla a velocidade do escoamento superficial. São processos que se relacionam indiretamente com a infiltração de água no solo. Uma maior rugosidade superficial do solo ocasiona um maior armazenamento de água da precipitação, o qual é subtraída da mesma, resultando em menor saldo de água para infiltração. Já o n de Manning, é um parâmetro que procura relacionar a velocidade de escoamento superficial com propriedades menos tangíveis da superfície do solo, especialmente sobre a vegetação e como ela atua na redução da velocidade do escoamento. Este parâmetro é muito difícil de ser determinado corretamente em função da diversidade de condições de arquitetura de plantas e como ela atua nesse processo.

Outros mapas de entrada procuram representar a distribuição espacial de parâmetros ligados à cobertura do solo, seja ela vegetação natural ou dos usos agrícolas, ou obras antrópicas como prédios, residências, estradas. São variáveis que se modificam ao longo do tempo, sendo necessário atribuí-los para cada evento particular, obedecendo o crescimento das culturas. Agem nos processos de interceptação e redução da energia cinética da gota da chuva.

4.7.4 Solo

A constituição dos materiais de origem e as propriedades físicas e químicas dos solos afetam a sua pré-disposição à erosão, ou erodibilidade dos solos. Solos arenosos são compostos principalmente por partículas de quartzo, que possuem um tamanho relativamente maior, maior macro porosidade, estrutura granular solta que permite uma alta taxa de infiltração de água, mas por outro lado, uma menor resistência à erosão hídrica. Estes solos apresentam baixa capacidade de retenção de água com tendência a secar mais rapidamente entre chuvas. e por apresentarem menor coesão natural entre as partículas são mais suscetíveis à erosão hídrica, potencializado pela condição de alta declividade das encostas. Já os solos argilosos são compostos por partículas de argila, menores e com estrutura mais coesa e compacta. Essa estrutura densa e a alta capacidade de retenção de água dos solos argilosos conferem uma maior resistência à erosão hídrica, por reterem mais água e por mais tempo, o que contribui para a estabilização das partículas do solo. No entanto, apresentam menor velocidade para infiltração e podem se tornar facilmente saturados, levando à formação de poças e encharcamentos superficiais.

A forma como as partículas individuais do solo se agrega e se organiza em agregados maiores afetam a permeabilidade, a capacidade de infiltração de água, a retenção de umidade e a estabilidade das partículas do solo e sua resistência à erosão hídrica. A presença de

agregados estáveis age reduzindo a desagregação pelo impacto direto das gotas de chuva e diminuindo a velocidade do escoamento superficial, reduzindo a erosão nas encostas (DA SILVA MENEZES *et al.*, 2019). A presença de uma estrutura bem desenvolvida também melhora a capacidade do solo de infiltrar a água da chuva, permitindo sua infiltração no perfil do solo. Isso ajuda a reduzir a quantidade de água disponível para o escoamento superficial. Além disso, a estrutura do solo influencia a resistência à desagregação das partículas do solo. Agregados estáveis têm maior resistência ao impacto das gotas de chuva e à ação do escoamento superficial, minimizando a erosão. Segundo Montgomery (2007), a degradação da estrutura do solo é um fator crítico na aceleração da erosão do solo. A presença de matéria orgânica também desempenha um papel importante na estrutura do solo e na sua resistência à erosão, atuando como um agente aglutinante com impacto significativo na agregação, promovendo a formação de agregados estáveis (SIX *et al.*, 2004).

O Argissolo é um solo com horizonte A relativamente profundo, com bom espaço poroso, mas mais arenoso devido a migração da argila, o que favorece a infiltração. Isto é evidenciado pelos testes de infiltração realizados sobre ele, bem como as análises de condutividade em laboratório. e com camadas do perfil caracterizado pela presença de um horizonte B textural de acumulação de argila translocada de camadas superiores e argila de baixa atividade ou saturação por bases baixa. Argissolos são geralmente caracterizados por uma textura média a argilosa e uma estrutura bem desenvolvida, onde a presença de argila confere maior coesão entre as partículas do solo, reduzindo a suscetibilidade à erosão. De acordo com Bertol *et al.* (2010) a textura argilosa dos Argissolos contribui para a formação de agregados estáveis, que são menos suscetíveis à desagregação causada pelo impacto das gotas de chuva. Possuem boa drenagem natural devido à sua estrutura porosa, alta taxa de infiltração de água que favorece a redução do escoamento superficial e, conseqüentemente, a erosão (DA SILVA MENEZES *et al.*, 2019). A presença de matéria orgânica nos Argissolos é favorecida pelas condições de retenção de água e contribui para a formação de agregados estáveis e aumento da resistência à erosão (SILVA *et al.*, 2006). São solos que estão presentes em diferentes configurações de relevo, onde os localizados em áreas planas tendem a ser menos suscetíveis à erosão do que aqueles em encostas íngremes. Por estas características são solos que apresentam boa resistência para a erosão, a menos que mal manejados sob condições de alta declividade de encostas e sem uso de práticas conservacionistas, como apontado por

Portanto, A camada B textural se configura em um impeditivo para a infiltração em diferentes graus, sendo o grande diferencial nos Argissolos. As camadas acima do B textural

(O, A, B) são de solo poroso, o que facilita a infiltração de água nas encostas, e que pode se movimentar com relativa rapidez a favor do relevo e se concentrar nas vertentes e nas partes baixas do relevo próximos aos canais principais, contribuindo com parte do escoamento subsuperficial rápido, mesmo em menor grau que nos Neossolos com floresta. Abaixo do horizonte B temos uma outra camada profunda que age como armazenamento de água, com velocidade de recomposição mais lenta e que posteriormente vai contribuir para o escoamento de base ao longo do período entre eventos.

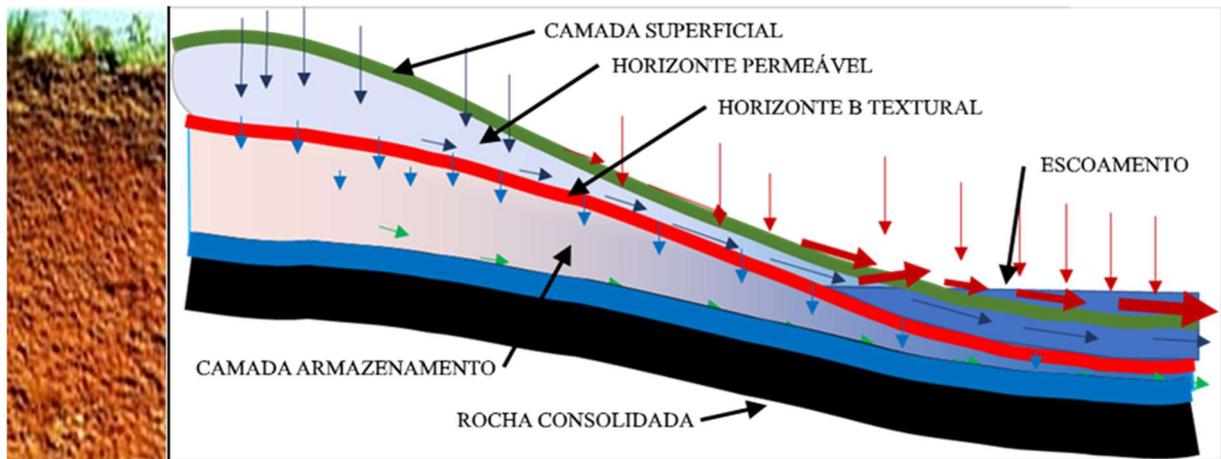
A figura 2 apresenta o modelo de perfil longitudinal de encosta característico dos Argissolos presentes na bacia de Arvorezinha, que ocupam a maior parte da bacia com cultivos agrícolas. Temos uma camada superficial cuja permeabilidade depende do tipo de manejo, seguido de um horizonte profundo e poroso, no qual a migração de umidade ocorre facilmente encosta abaixo, condicionada pela camada impeditiva do horizonte B textural. Abaixo deste horizonte temos um horizonte profundo com capacidade de armazenamento e fluxo mais lento que abastece o fluxo basal ao longo dos dias após eventos.

Além dos Argissolos, também apresentamos o esquema de perfil dos Cambissolos, que no caso da bacia possuem pouca abrangência territorial, ou se encontram localizadas em pequenas manchas sobre outras classes. Estes solos apresentam um horizonte B formado por rochas consolidadas em processo de degradação pelo intemperismo, sendo mais densos e menos porosos, mas que podem apresentar fissuras de maior ou menor tamanho por onde a umidade passa. Apresentam um horizonte A de profundidade mediana, geralmente de solo mais poroso pelo uso com florestas ou agrícola, mas com grande quantidade de rochas na superfície. A infiltração pode ser caracterizada como mediana nesses solos. Os Cambissolos, tem menor importância territorial na bacia com características semelhantes aos dos Neossolos. No entanto, pelo uso e manejo que estes solos apresentam com cultivos de tabaco, muitos deles de forma convencional, apresentam grande pedregosidade na superfície, o que pode implicar em menor infiltração e favorecer o escoamento.

Os Neossolos ocupam o terço inferior da bacia, praticamente toda área coberta com florestas e em relevo acentuado. Sua característica é a de apresentar ausência de horizonte B diagnóstico, apresentam horizonte A com predominância de matéria orgânica em diferentes espessuras, o que lhe confere uma permeabilidade muito alta, e C com rocha consolidada que restringe a infiltração e favorece o fluxo lateral, o acúmulo de água progressivo em direção ao canal, e que pode promover facilmente a reinfiltração da água e da mesma forma, a exfiltração dela nas partes baixas do relevo. É um solo, que pela sua cobertura vegetal é naturalmente mais úmido, de menor profundidade, sujeito à rápida saturação e umedecimento pela chuva

pela composição de sua camada superficial. Os solos deste bioma também apresentam alta suscetibilidade à erosão quando indevidamente manejados para agricultura, pela sua fragilidade, material de origem e pela condição de relevo e topografia acidentada das encostas cultivadas, especialmente no rebordo do Planalto do RS (TIECHER *et al.*, 2017; VASCONCELLOS, 2013).

Figura 2 - Perfil conceitual dos Argissolos na bacia



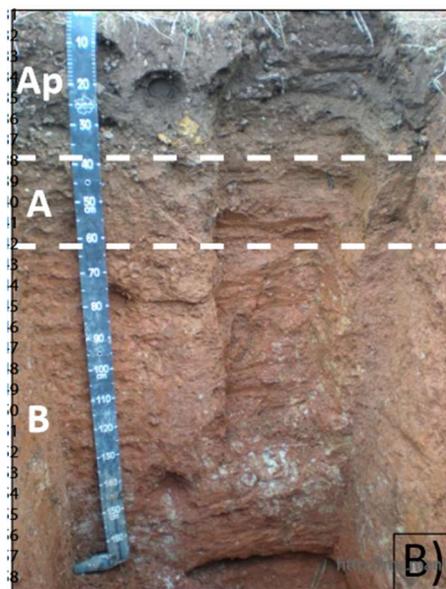
Fonte: Elaborado pelo autor

Os Cambissolos são um dos principais tipos de solo encontrados em diferentes regiões do mundo. Esses solos apresentam características específicas que influenciam seu comportamento em relação à erosão hídrica (Figura 3). Uma característica comum dos Cambissolos é que podem apresentar uma ampla variação na textura e na estrutura e uma baixa permeabilidade devido à presença de camadas compactadas ou de textura mais fina, dependendo das condições de formação e do material de origem. Cambissolos com textura mais arenosa tendem a ser mais suscetíveis à erosão, devido à sua menor capacidade de retenção de água e à maior facilidade de desagregação das partículas do solo. A textura e a estrutura pouco desenvolvidas dos Cambissolos são fatores determinantes na suscetibilidade à erosão.

A presença de cobertura vegetal desempenha um papel crucial na proteção contra a erosão em Cambissolos, protegendo do impacto das gotas de chuva, promove a infiltração de água no solo e estabiliza as partículas do solo, como enunciado por Castro *et al.* (2022), onde destacam a importância da cobertura vegetal na redução da erosão hídrica em Cambissolos. O manejo inadequado do solo, como o uso intensivo de maquinário pesado e o preparo convencional do solo, pode contribuir para a degradação e a erosão dos Cambissolos. A

remoção da cobertura vegetal natural e a exposição do solo ao impacto direto das gotas de chuva aumentam o risco de erosão. Segundo Amaral et al. (2008) a adoção de práticas conservacionistas, como o plantio direto, pode auxiliar na redução da erosão hídrica em Cambissolos. Sendo um solo suscetível à erosão, além da cobertura do solo, a erosividade das chuvas é um fator importante a ser considerado no comportamento da erosão hídrica em Cambissolos como referenciado por Cogo et al. (2018).

Figura 3 - Perfil de um Cambissolo

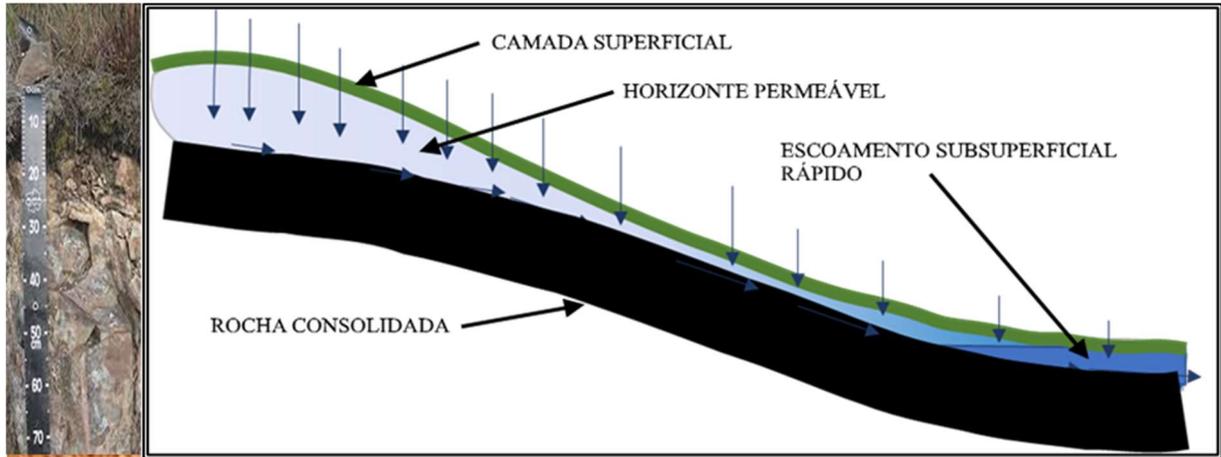


Fonte: Elaborado pelo autor

Os Neossolos dominam o terço inferior da bacia ocupado predominantemente por florestas próximas ao exutório. Na Figura 4 temos o perfil longitudinal das encostas idealizado para os Neossolos. Ele é composto por uma camada superficial muito porosa, rica em matéria orgânica e liteira, de pouca profundidade, que tem contato direto com a camada rochosa consolidada. Este ambiente, propício a infiltração quase que total, ocorre em locais de grande declividade, o que contribui para o rápido escoamento subsuperficial até o canal, muitas vezes com exfiltração.

Nos Neossolos, temos solos bem protegidos pela cobertura vegetal, o que causa pouca erosão superficial pelo impacto da gota da chuva, mas pode eventualmente causar erosão pelo fluxo concentrado esculpido no perfil, enquanto tiver material para ser erodido.

Figura 4 - Perfil conceitual dos Neossolos



Fonte: Elaborado pelo autor

4.7.5 Profundidade do solo

A profundidade do solo está relacionada com a capacidade em espaço poroso do solo em armazenar água em seu perfil. Solos profundos geralmente tem melhor permeabilidade, armazenam maior quantidade de água, permite maior desenvolvimento de raízes de plantas, melhor drenagem e oxigenação. Solos mais rasos comumente estão associados à solos pouco desenvolvidos com rocha matriz a pequena profundidade, encostas com alta declividade, topo de morros, como no caso dos Neossolos. Geralmente são ocupados por florestas, mas quando indevidamente manejados, podem perder sua camada de solo rapidamente pela erosão. Também ocupam as áreas limítrofes da rede de drenagem, locais já esculpidos pelo relevo e pelo fluxo concentrado. Tendem a favorecer o acúmulo rápido de água e a formação do escoamento tanto superficial como subsuperficial.

A profundidade do solo, ou da camada de perfil do solo considerada como uniforme, é parâmetro de entrada ao modelo para fazer parte do cálculo da infiltração pelo Green & Ampt. Podem ser adotadas uma ou duas camadas sobrepostas no modelo de infiltração, cada uma com sua profundidade. A distribuição espacial do mapa de profundidade pode ser determinada segundo pontos amostrados e interpoladores matemáticos, método de Krigagem, ou mediante o uso de índices topográficos para esta função. Pode ser realizado célula a célula, mas generalizações foram adotadas nos trabalhos em Arvorezinha, adotando profundidades em função dos perfis padrão dos solos na bacia. Isto se justifica pela uniformidade dos solos na bacia, sendo o Argissolos mais profundos e Neossolos mais rasos, com poucas variações na profundidade dos perfis sobre a área. Os Argissolos apresentam camada impeditiva para o fluxo hidráulico no horizonte B textural. Já s Neossolos apresentam contato lítico a pouca

profundidade. Isto faz com que seus comportamentos hidrológicos para infiltração se assemelhem muito a solos com apenas uma camada com bloqueio do fluxo vertical, razão pela qual adotou-se apenas uma camada neste trabalho.

4.7.6 Infiltração de água no solo

A infiltração de água no solo é o principal processo que reflete o impacto da atividade agrícola sobre a funcionalidade hidrológica dos solos de uma bacia. Existem efeitos imediatos sobre a infiltração de água no solo, como em ações de manejo de preparo com revolvimento, e outras de menor perturbação do ambiente, como manejo em plantio direto (BERTOL *et al.*, 2013). Segundo Li e Sivapalan (2014), o processo de formação do escoamento nos eventos pode ser formado segundo dois mecanismos: escoamento de Horton ou Hortoniano e escoamento de Dunne ou Dunniano. A formação do escoamento superficial Hortoniano (HORTON, 1933) se dá pela capacidade limitada que os solos têm de receber e infiltrar a água da chuva, sendo controlado pela capacidade e velocidade de infiltração de água no solo gerando o excedente pela limitada velocidade de infiltração (VAN DE GIESEN *et al.*, 2011). O escoamento de Dunne (DUNNE; MOORE; TAYLOR, 1975) é o causado por saturação do solo, ou excedente pela limitação por saturação do solo. Estes mecanismos coexistem, podem estar presentes isoladamente ou em conjunto, em diferentes locais da bacia e em diferentes tempos de ocorrência dos eventos. O resultado observado dos eventos é uma combinação da ocorrência destes dois processos, sendo difícil mensurar a sua participação, mas que pode ser estimada pela modelagem (WOODS; SIVAPALAN, 1999).

A infiltração sofre influência da cobertura vegetal, do teor de matéria orgânica e das práticas de manejo, da constituição e das propriedades físicas do solo, das condições de umidade, da evapotranspiração e do regime pluviométrico antecedente, bem como a ação do relevo (DE ALMEIDA *et al.*, 2018). Mesmo sendo um modelo abrangente em termos de representação de processos, o LISEM não apresenta rotinas de cálculo de fluxos subsuperficiais avançados. Esta limitação precisa ser considerada, pois se temos um modelo incapaz de representar um processo de escoamento importante sobre a bacia, talvez a análise dos resultados seja equivocada. Por outro lado, ele se destaca por ser um modelo que representa bem a dinâmica dos fluxos superficiais, o processo dominante que ocorre sobre a bacia. e o coloca em vantagem sobre os outros modelos.

Diferentes métodos de cálculo da infiltração de água no solo estão disponíveis no LISEM, entre: sem infiltração, subtração direta de um valor de infiltração no evento, método SWATRE, método Smith and Parlange e o método usado nesta bacia do Green and Ampt.

Temos adotado o modelo Green & Ampt em função da disponibilidade de dados e ser amplamente utilizado no meio científico como modelo de infiltração de base física, com uso de uma ou duas camadas. No Green and Ampt, a umidade inicial do solo e a condutividade hidráulica saturada, são os principais atuadores sobre a calibração da componente hidrológica que descreve o escoamento superficial no modelo LISEM. A modificação destes parâmetros proporciona a maior resposta na melhoria do poder preditivo do modelo. A combinação de valores destas variáveis em cada célula precisa ser analisada quanto à sua posição na paisagem, na encosta, em relação à sua altitude. Para o Green and Ampt, os mapas de parâmetros relacionados com infiltração que alimentam o método podem considerar uma ou duas camadas de simulação, sendo fornecidos através dos mapas independentes para a primeira e segunda (opcional) camadas de:

- Porosidade total
- Conteúdo inicial de água
- Condutividade hidráulica saturada
- Potencial matricial inicial
- Espessura da camada de solo

Os valores destes parâmetros podem ser fornecidos segundo a distribuição espacial pelo mapa de usos para a primeira camada e pelo mapa de solos opcionalmente para a segunda camada, ou mesmo individualmente para cada célula. Os valores podem ser obtidos através de análises físicas de amostras de solo em laboratório, sendo que porosidade total, potencial matricial e espessura da camada de solo tem menor impacto no cálculo final do processo, ao contrário para o conteúdo inicial de água no solo e a condutividade hidráulica saturada, fatores de maior impacto na calibração. A equação de G&A que calcula a infiltração em cada célula no modelo, obedece a relação:

$$f = -K_{sat} \left(\frac{dh \cdot (\theta_{sat} - \theta_i)}{F} + 1 \right)$$

Onde K_{sat} é a condutividade hidráulica saturada (mm/h); dh é a soma da pressão da lâmina de água na superfície mais a tensão matricial na frente de molhamento; θ_{sat} é a porosidade de saturação; θ_i é a umidade inicial do solo abaixo da frente de molhamento; F é a lâmina infiltrada sobre a porosidade total na profundidade do solo (z , mm).

A partir da lâmina infiltrada a cada *timestep* e da lâmina precipitada, é gerado um valor de escoamento que é então roteado para a próxima(s) célula(s) até atingir o exutório da bacia. Nos deparamos com o desafio de representar a distribuição espacial dos fatores e os valores a serem inseridos na parametrização dos eventos. Por isso, esforços no sentido de identificar a distribuição espacial destes fatores pode trazer melhores níveis de melhorias nos resultados das previsões. A partir da observação dos perfis conceituais apresentados, podemos inferir sobre o comportamento destes solos para infiltração. A maior área da bacia coberta por encostas agrícolas se encontra na classe de Argissolos. Em função das características apresentadas, não temos impeditivos diretos para a infiltração nas camadas mais superficiais do solo, associando perfil relativamente profundo com boa condutividade hidráulica e espaço para armazenamento pela porosidade.

Barros (2012) em dissertação de mestrado investigou a infiltração de água em escala de bacia por diferentes métodos, análise de hietogramas e hidrogramas, modelo curva-número e desempenho do modelo LISEM, onde simulou 77 eventos monitorados entre 2009 e 2011. Entre eles, 56 eventos com magnitudes entre 6,35 mm e 49,46 mm tiveram taxas de infiltração médio de 94,60%; 18 eventos entre 59,25 mm e 93,02 mm apresentaram taxa de infiltração de 85,10% e 3 eventos de grande volume entre 127,03 mm e 187,30 mm tiveram taxa de infiltração média de 54,10%. Estes valores apontam para uma boa capacidade de infiltração pela bacia na ocorrência de eventos de precipitação de pequeno à médios volumes, proporcionando perdas de água entre 5,40% e 14,90% do precipitado nestas categorias. Já para os eventos de grande volume de precipitação tivemos perdas de até 54,40% no exutório. Já na modelagem, o modelo curva-número foi mais eficiente que o modelo LISEM para representar tais escoamentos, indicando que temos características na bacia sobre as quais não temos clara compreensão sobre o funcionamento, distribuição e valores envolvidos nos processos hidrológicos que se refletem na infiltração sobre a bacia, entre eles a distribuição da umidade do solo, profundidade e condutividade hidráulica saturada na paisagem.

4.7.7 Distribuição do conteúdo de água na paisagem

Dentro de cada tipo de solo, uso e manejo, temos uma distribuição de umidade do solo, que sofre a ação do relevo no seu comportamento de distribuição espacial. A umidade, se direciona e se armazena rapidamente nas partes baixas do terreno por ocasião dos eventos pelo escoamento superficial, bem como migra lentamente pelo perfil do solo pela ação da gravidade, no período entre eventos. Isto vale desde pontos da encosta, onde se concentram nas vertentes das encostas, como em escala de bacia, nas partes baixas da paisagem, junto à

região do canal principal e imediações, formando áreas úmidas características. A distribuição da umidade do solo no perfil do solo ao longo da paisagem afeta a velocidade e propensão aos fluxos subsuperficiais. Woods et al ((1997) analisou o comportamento dos fluxos subsuperficiais em função do relevo e da espessura da camada de solo ao longo de uma encosta na Nova Zelândia com características semelhantes à bacia de Arvorezinha, identificando que o relevo condiciona o padrão do armazenamento de água nas encostas e a velocidade dos fluxos, sendo que perfis mais elevados com menor teor de água apresentam fluxos mais lentos, enquanto partes baixas com maior teor de água ou mesmo saturados apresentam fluxos mais rápidos. Há a relação entre área de acumulação, a ocorrência de eventos antecedentes e a topografia local que condiciona os fluxos subsuperficiais da mesma forma que atua nos superficiais.

O conteúdo de água no solo antecedente aos eventos a serem simulados, é particular a cada evento e se altera em função do processo de infiltração, percolação no perfil e evaporação da umidade anterior aos eventos. Schlesner (2017) sugere que estudos com uma melhor representação espacial dos fatores de solo ligados à infiltração e a calibração do modelo através de um conjunto mais amplo de eventos seja considerado. Walling (2004) considera um outro aspecto importante sobre a deficiência da representação do meio. A interface entre encostas e canais de drenagem estão sujeitas a condições que afetam a conectividade dos sedimentos com o rio, sendo que isto é negligenciado, ou de difícil representação com as ferramentas disponíveis nos modelos. Existem situações que a variabilidade natural entre eventos dificulta a sua predição como é o caso da distribuição do conteúdo de água na bacia. Minella e Merten (2012a) em revisão da literatura sobre a aplicação de índices topográficos, concluíram que a utilização de índices topográficos representa uma enorme contribuição para o planejamento agrícola e ambiental através da modelagem de processos hidrológicos, geomorfológicos e biológicos. Aplicaram sobre a bacia de Arvorezinha, diferentes índices topográficos para determinação do potencial erosivo promovido pela declividade do terreno, que contribuíram para o entendimento da distribuição espacial da água.

4.7.8 Distribuição da condutividade hidráulica saturada no perfil e na paisagem

O valor de K_{sat} é o parâmetro mais incerto de se estimar em escala de bacia. Seu valor é função de outras variáveis como porosidade do solo, conteúdo de água, textura do solo, teor de matéria orgânica, permeabilidade do meio poroso, presença de camadas impeditivas para o fluxo, tipo de manejo do solo. Sua determinação é realizada através de

coleta de amostras indeformadas do solo submetidas à análise de infiltração em laboratório. As relações entre as propriedades físicas do solo como as citadas anteriormente e o comportamento hidráulico dos solos é bastante conhecido, porém na escala muito reduzida. Este método retira a amostra do solo, e, portanto, do contexto de arranjo espacial ao qual aquela porção de solo está interagindo com outras estruturas ao seu redor, do perfil, da encosta e da paisagem. O próprio uso da metodologia de avaliação da infiltração de água no solo pelo uso de infiltrômetro de anel, apresenta suas limitações como método de alta precisão. Ensaio com o aparelho podem apresentar variações de até x%, devidos a fugas que ocorrem no sentido lateral ao eixo vertical do perfil do solo. Isto revela uma complexidade maior ainda no estudo e avaliação do movimento de água no solo pois além da infiltração de água no solo de forma pontual, temos a variabilidade espacial do meio na paisagem. Além disso, se sabe que a configuração espacial diversa das camadas de solo, a distribuição da macro porosidade, a condição de umidade ao longo do espaço e do tempo no evento, conduz à uma situação de anisotropia da condutividade hidráulica, onde os fluxos podem tomar diferentes caminhos no espaço dimensional do solo, que pode se expressar no movimento ao longo da encosta em escalas maiores (MUALEM, 1984). Da mesma forma, a simples determinação pontual da condutividade hidráulica do solo em diferentes pontos da paisagem não garante o pleno conhecimento do comportamento dos fluxos na paisagem. Estes dependem da condição de conectividade entre os poros ao longo do meio, que por sua vez depende do design do meio poroso e da condição de umidade nos diferentes pontos da encosta (NIEBER *et al.*, 2006).

Temos, portanto, limitada condição de avaliar na plenitude o padrão de distribuição espacial da condutividade no solo. Beven (2011), dando ciência destas dificuldades, declara que a hidrologia é uma das ciências inexatas, e dadas as limitações do que podemos saber sobre os movimentos de água no solo e subsolo, ela tende a permanecer assim. Ao expandirmos a análise do movimento de água no solo do contexto de perfil para o de encosta e desta para o de bacia, necessitamos ferramentas e conceitos mais avançados de investigação que envolvem a predição dos *travel time distributions* e *residence time distributions* tanto nas áreas insaturadas como nas saturadas do solo (RINALDO *et al.*, 2011). Os fluxos superficiais e subsuperficiais possuem diferentes dinâmicas de movimentação no espaço e no tempo, com regiões onde temos bolsões com “água velha” em locais de lenta renovação dos estoques, e de locais de “água nova” em frequente e intensa renovação dos estoques de água. Em função disso o autor ressalta que um hidrograma de um evento não representa o cenário completo da

resposta hidrológica de uma bacia, onde a compreensão destes fenômenos é necessária para a formulação de uma teoria completa sobre a hidrologia de uma bacia.

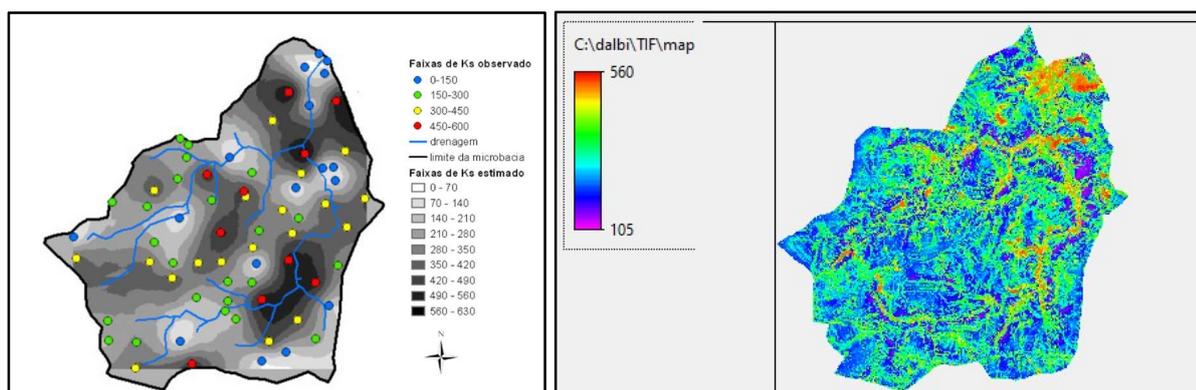
A determinação da variabilidade espacial da umidade e da condutividade hidráulica sobre a bacia foi tema de estudo de Dalbianco (2009). O autor através de ampla campanha de coleta de amostras de solo investigou a variabilidade espacial e estimativa da condutividade hidráulica para a caracterização físico-hídrica da bacia de Arvorezinha usando técnicas de interpolação por Krigagem de um conjunto de 69 amostras de pontos de condutividade hidráulica saturada do solo, representando diferentes condições de manejo sobre a bacia e gerando mapas de condutividade hidráulica saturada por krigagem. Também investigou relações de pedotransferência para a condutividade hidráulica e diversas propriedades físicas do solo. Concluiu que aspectos de manejo influenciam mais as propriedades ligadas à estrutura do solo, e esta, com a condutividade hidráulica, do que a granulometria da fase sólida do solo. Outro resultado importante é que a dependência espacial da condutividade hidráulica apresenta raio de atuação de 141 metros (Figura 1), demonstrando que o raio de interdependência entre os pontos é relativamente amplo. Estes estudos preliminares serviram de base para formular o banco de dados para serem usados posteriormente na modelagem.

Barros (2014) pondera que os ensaios de campo de infiltração de água no solo pelo método de anéis concêntricos na bacia, acusaram valores entre 1 e 500 mm.h^{-1} , com taxa média de 95 mm.h^{-1} . As análises de condutividade hidráulica em laboratório de 480 pontos na camada superficial do solo indicarem média de 289 mm.h^{-1} . Estes dados obtidos com alta densidade de amostragem atestam a alta variabilidade espacial da infiltração de água no solo, onde não houve a identificação clara de um padrão de distribuição espacial da infiltração associado com a distribuição dos tipos de solo ou características do relevo. Destaca ainda, o possível fenômeno de baixa infiltração que ocorre em áreas menos permeáveis devido às camadas de solo impeditivas para a infiltração e à formação de escoamento Dunniano que oscila em função da extensão e magnitude da precipitação. Os grandes volumes de escoamento superficial gerados na bacia contrastam com o alto valor da infiltração de água nas encostas.

A observação de que para a calibração dos eventos simulados seria necessário alterar os valores de condutividade hidráulica em patamares bem inferiores que os mensurados, levantou inicialmente a hipótese que o mapa de condutividade poderia ser mais bem elaborado. Suspeitava-se que a qualidade dos resultados da modelagem com o LISEM dos eventos da bacia de Arvorezinha, poderiam ser melhorados com a adoção de um mapa de condutividade hidráulica mais preciso, que tivesse poder explicativo da variabilidade espacial

da condutividade sobre a bacia. Isto poderia trazer melhor representação dos processos de infiltração e conseqüentemente, das características do escoamento superficial e seu impacto nos hidrogramas e sedimentogramas. Para tanto, um conjunto de pontos amostrados de condutividade sobre a bacia obtido por Dalbianco (2013) e Barros (2014), foi utilizado para compor análises relacionando a condutividade com aspectos físicos do solo, características do uso e manejo e do relevo, utilizando técnicas mais modernas de análise com *Machine Learning*, como o *Random Forest*, de interpolação como a Krigagem, e com uso de interpoladores matemáticos tradicionais (Estudo não publicado). A partir dos pontos amostrados, procurou-se correlações entre estas variáveis físicas e a condutividade hidráulica. Os resultados mostraram que a variável qualitativa uso e manejo tem diretamente pouca ou baixa correlação com os dados de condutividade. A textura do solo com seus teores de areia, mostrou-se o indicador mais correlacionado com o condicionamento das propriedades hidráulicas do solo. O mapa gerado pelo algoritmo está representado na Figura 5.

Figura 5 - Mapa de condutividade hidráulica saturada obtido por Krigagem e por algoritmo Random Forest.



Fonte: Dalbianco (2009) e autor.

Porém, os valores de condutividade hidráulica saturada mostrados pelo mapa indicam valores entre um mínimo próximo de $100 \text{ mm}\cdot^{-1}$ e um máximo de $560 \text{ mm}\cdot^{-1}$, valores em acordo com os mensurados a campo. Esta distribuição se assemelha muito com os mapas de valores iniciais usados na modelagem, com valores altos para condutividade nas encostas como mensurados, mas que na modelagem não foram suficientes para representar os fenômenos hidrológicos da bacia. Resultado semelhante foi obtido por Santos et al. (2021) aplicou na modelagem com o LISEM diferentes configurações de mapas de entrada representando incertezas na distribuição da condutividade hidráulica sobre uma bacia no sul do Brasil. Os autores detectaram pouca sensibilidade do modelo a estas variantes perante a

formação do hidrograma mediante calibração de cenários pelo teor de água no solo ao qual se mostrou fortemente dependente.

Em síntese, no que tange a identificação da distribuição espacial dos valores de condutividade hidráulica saturada para alimentar o modelo, resta ainda um elevado grau de incertezas sobre sua ação sobre os processos hidrológicos e de formação do escoamento na escala de bacia. Temos ainda o paradigma entre os valores pontuais observados sobre a bacia, determinados através de amostragens a campo, e os resultados oferecidos pela modelagem com os valores exigidos e calibrados da K_{sat} sobre as encostas. Desta forma, a investigação das causas das discrepâncias entre valores observados e calibrados de condutividade nas encostas nos eventos necessitou de uma nova abordagem, onde se seguiu a linha de investigação deste trabalho.

4.7.9 Roteamento do escoamento superficial na bacia

Isto é feito pelo método de onda cinemática que 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):

$$\frac{dA}{dt} + \frac{dQ}{dx} = q - i$$

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

$$v = R^{\frac{3}{2}} * \frac{\sqrt{S}}{n}$$

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 (-).

$$A = \alpha Q^{\beta}$$

Onde β é 0.6 e α é dado por:

$$\alpha = \left(\left(\frac{n}{S^{0.5} R} \right)^{\frac{2}{3}} \right)^{\beta}$$

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

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

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

A não linearidade desta equação é resolvida por interações pelo método de Newton Raphson para resolver Q_x^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.

4.8 ESTRUTURAS HIDROLÓGICAS FRÁGEIS

Aspectos morfológicos da bacia se relacionam com a função hidrológica e sua distribuição na paisagem de estruturas que como dito, podem ser responsáveis por significativa parcela da formação do escoamento superficial nos eventos, e que se não representadas, forçam a calibração do evento pela atuação sobre outros locais ou outros fatores controladores. As estruturas na paisagem que convencionamos aqui denominar de hidrológicamente frágeis, são locais com características específicas que desempenham um papel importante e diferenciado na infiltração de água no solo e formação do escoamento superficial. São estruturas naturalmente formadas a partir das feições do relevo e algumas relacionadas com a atividade agrícola nas encostas. Mesmo sendo áreas de pequena expressão em termos de extensão territorial, desempenham papel expressivo na formação do escoamento superficial no contexto amplo da bacia. A identificação territorial e o comportamento hidrológico de algumas delas, principalmente nas encostas, são normalmente negligenciadas quando da confecção dos mapas de entrada ao modelo LISEM. Os mapas refletem a distribuição espacial dos usos da terra, da distribuição dos tipos de solos, e da rede de drenagem principal sobre a bacia, que de acordo com seus parâmetros definidos, procuram refletir seu comportamento hidrológico. Mas algumas delas não são contempladas neste processo de mapeamento automático ou manual, muito menos o comportamento hidrológico de áreas muito específicas que não estão ligadas ao comportamento de suas áreas contíguas, mas que acabam sendo consideradas como de mesmo comportamento.

Neste caso, é necessário um maior refinamento no mapeamento de dados de entrada ao modelo, refletindo não só aspectos morfológicos presentes nas células, mas considerando seus aspectos funcionais em termos de processos hidrológicos. Como parte do monitoramento

ambiental, a observação de campo é importantíssima para percepção dos processos hidrológicos e erosivos em bacias hidrográficas. Estas observações trazem evidências do campo das manifestações naturais da erosão bem como pela ação antrópica e que contribuíram de maneira decisiva para a formulação da hipótese testada e para a preparação da base de dados de entrada. Vamos discorrer a seguir sobre estas estruturas em maior detalhe.

4.8.1 Canais efêmeros

Uma das principais características da bacia é a presença de relevo acentuado, formando encostas íngremes. No terço superior da bacia temos relevo um pouco mais suave, porém com ainda acentuada declividade. Nos dois terços inferiores do relevo, temos a predominância de encostas de longo perfil longitudinal com acentuada declividade. Esta característica está associada com o tipo de ocupação do solo na bacia, uma agricultura intensiva sobre as encostas, predominantemente sob cultivo convencional de manejo do solo durante o longo histórico de décadas de práticas agrícolas sobre a bacia. Este histórico de práticas intensivas teve consequências importantes para a evolução dos processos de erosão, acelerando ainda mais o já intenso processo natural que ocorre nestas regiões.

Ao longo dos anos ocorreram ciclos de ocupação das encostas na bacia em função da atratividade econômica de certas culturas agrícolas, sendo que o cultivo do tabaco predominou durante as décadas passadas até meados dos anos 2000. Neste período, a área da bacia era quase que totalmente ocupada por cultivo do tabaco em sistema convencional, o que levou a altos níveis de erosão. Entre 2000 e 2015 aproximadamente, houve uma melhoria significativa na diversificação de culturas e sistemas de produção, com aporte de cultivos de espécies florestais, fruticultura, culturas anuais como milho e feijão em maior escala, bem como erva-mate e o próprio tabaco como cultivos principais, mas agora mediante práticas de manejo mais conservacionistas, tais como o plantio direto na palha, uso de plantio em contorno e cobertura do solo com forrageiras protetoras do solo durante o período do inverno, mesmo que em menor escala. Após 2017, um novo ciclo de negligência das práticas conservacionistas voltou a ser adotado na bacia, elevando novamente as perdas de solo pela erosão. A partir desta época, a atratividade econômica da soja fez com que alguns agricultores a implantassem nas encostas mediante o uso do plantio direto na palha, principalmente no terço superior da bacia sobre os Argissolos.

Entretanto, a combinação mais característica da bacia é o cultivo de tabaco em sistema convencional sobre encostas com alta declividade. Na Figura 6 temos uma imagem da

típica ocupação do solo sobre a bacia. O cultivo convencional sobre as encostas proporciona o revolvimento do solo de forma intensiva, seja pelo uso de tração animal como de tração mecânica. Este revolvimento ocorre a cada ano no preparo do plantio e algumas vezes durante o ciclo das culturas para o combate de ervas daninhas e condicionamento dos camalhões do solo, estruturas para a sustentação das plantas de tabaco. Com incidência da precipitação, temos a formação de sulcos de pequenos sulcos de erosão na superfície, que é recomposta novamente mediante nova intervenção de preparo. Estes sulcos agem como caminhos rápidos do escoamento concentrado, sendo fontes de sedimentos facilmente desagregáveis e transportáveis. Quando de novo preparo do solo é realizado, se renovam as fontes de sedimentos, mas a conformação do sulco que vai adquirindo formas cada vez maiores, acaba por não se aplainarem totalmente, mantendo a perenidade das conformações deste sulco para o próximo ano. Na Figura 7 temos uma intervenção nesse sentido, onde o agricultor, mesmo no sistema de manejo em plantio direto simplificado, atua tentando fechar os sulcos aportando novo material sobre o sulco, o que não apresenta efeito duradouro por ser material frágil. Do ponto de vista do processo hidrológico, estes sulcos atuam como canais de drenagem quase como permanentes, pois são sulcos estabelecidos com leito aprofundado em contato com camadas superficiais compactadas, ou horizontes limitadores da infiltração ou mesmo a própria rocha consolidada. E mesmo que não aparentes, estão presentes e com alta potencialidade de atuar como promotoras do escoamento.

Além deste processo em plantio de culturas anuais, temos a construção dos camalhões para o tabaco, sendo estes majoritariamente construídos ao longo do perfil longitudinal da encosta para favorecer a drenagem, e não em contorno para agirem como controladores do escoamento superficial. Desta forma, aceleramos ainda mais o processo, pois construímos artificialmente uma ampla rede de canais escoadouros diretos para a rede de drenagem intermediária da encosta e principal da bacia para a água e para carregamento dos sedimentos. Sendo o preparo convencional, ocorre o selamento dos poros superficiais e a rápida saturação do leito destes canais artificiais, que atuam como formadores do escoamento superficial sobre uma área muito significativa da bacia. A Figura 8 mostra uma condição de encosta logo após o preparo convencional e plantio do tabaco onde ainda não incidiu a primeira precipitação de maior volume. Na Figura observamos um local que o preparo convencional do solo com camalhões de tabaco sofreu o impacto da primeira precipitação, gerando escoamento, desagregação, transporte e deposição de sedimentos no canal do camalhão, o que aumenta a probabilidade de que no próximo evento, diminuindo a rugosidade e a infiltração de água no solo, permita formação de escoamento superficial facilitado e

condiciona os sedimentos para serem novamente movimentados. A Figura 9 apresenta a vista e o detalhe da superfície do solo de um plantio de tabaco convencional no qual constatamos a destruição superficial dos agregados do solo e seu deslocamento para os canais artificiais dos camalhões. A Figura 10 apresenta outros exemplos de locais em que o manejo agrícola interfere nos fluxos, com plantio em locais de alta declividade fora da recomendação agrônômica e locais onde foram traçados caminhos internos nas lavouras.

Figura 6 Encosta com declividade típica na bacia de Arvorezinha



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 7 - Sulcos gerados nas vertentes das encostas com manejo em plantio direto



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 8 Encosta com cultivo de tabaco em camalhões



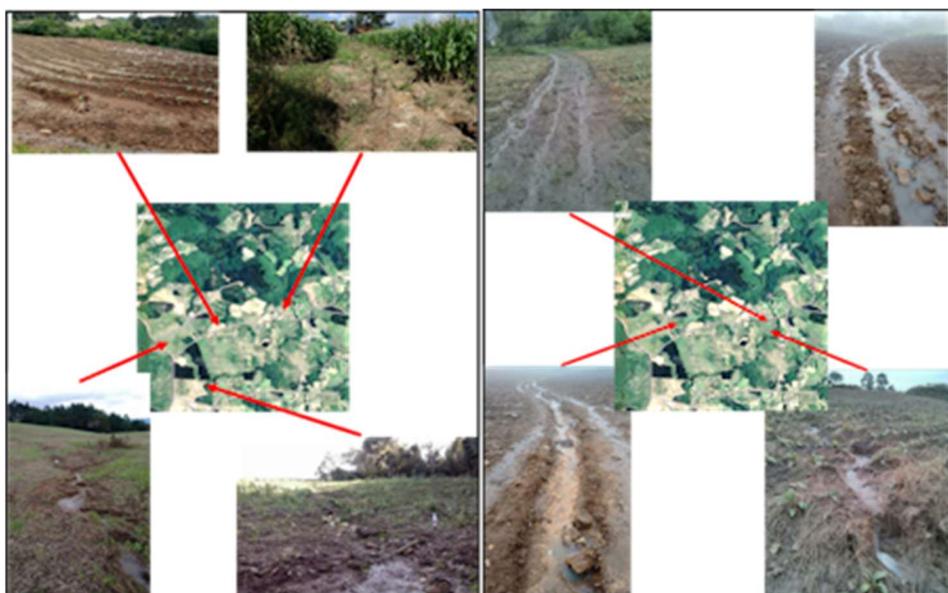
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 9 Cultivo de tabaco em preparo convencional após incidência de precipitação.



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 10 Caminhos preferenciais da água em função do manejo e relevo



Fonte: Elaborado pelo autor

O comportamento das encostas que são cultivadas com outras culturas anuais além do tabaco, como milho, feijão, mesmo a soja e a própria ervamate, sofrem o efeito do *interrill erosion*, ou erosão entre sulcos. Este tipo de erosão surge a partir da erosão laminar onde a água inicia seu escoamento superficial e começa a se concentrar em pequenos e numerosos sulcos a medida que se movimentam encosta abaixo, se concentrando em sulcos cada vez maiores e configurando adiante o sulco principal nos talvegues das encostas. A Figura 11 apresenta uma condição avançada de erosão na encosta formada pelo conjunto destas duas formas de erosão: erosão laminar e erosão por entre sulcos, gerando acúmulo de água em sulcos maiores nos talvegues, ainda dentro da própria encosta.

Figura 11 Encosta sob efeito de erosão entresulcos e em sulcos

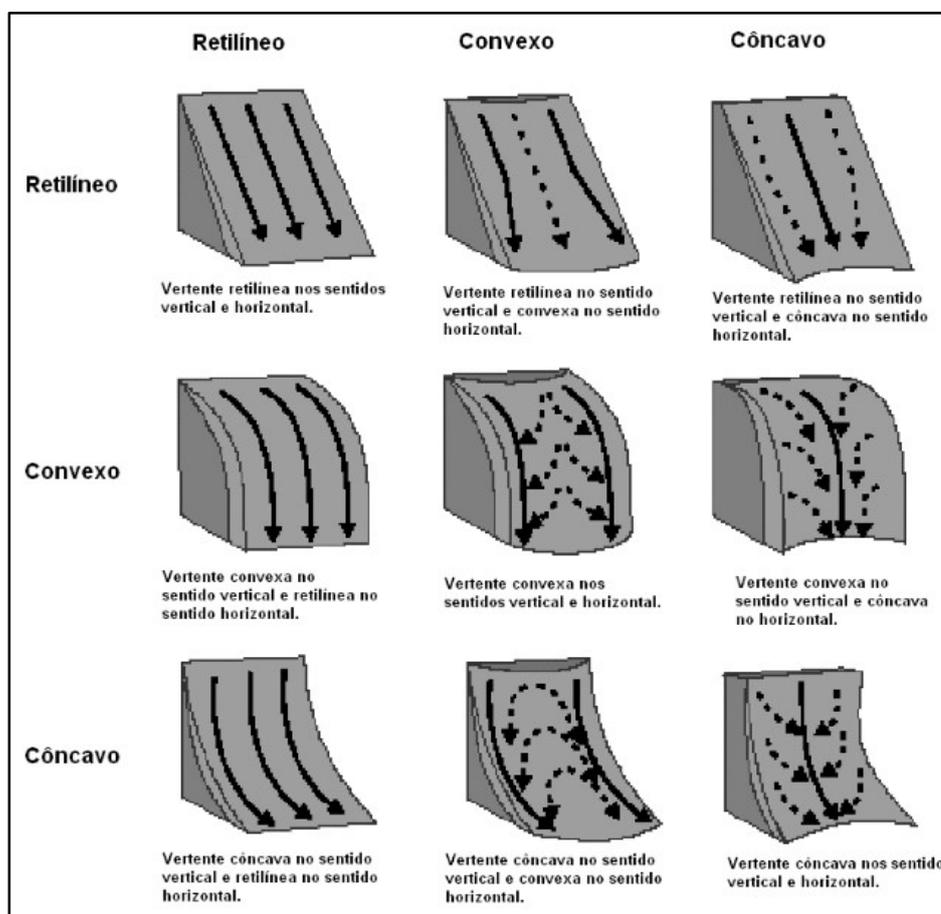


Fonte: Elaborado pelo autor

4.8.2 Linha das vertentes nas encostas

As encostas agrícolas podem assumir diferentes formatos de sua superfície ao longo da paisagem devido à configuração do relevo. O formato no sentido transversal da encosta pode assumir a forma côncava, trazendo a água para o centro de sua área, ou convexo quando ela tende a dispersar a água para as direções laterais de sua área. Já no sentido longitudinal, ela também pode assumir o formato côncavo, com grande declividade na sua parte mais alta e menor declividade na parte mais baixa, primeiro acelerando e depois desacelerando a velocidade do escoamento, bem como convexa, com menor declividade na parte superior e maior na inferior, conferindo aceleração do escoamento na parte final de seu movimento ao longo da encosta. Estes formatos podem ser visualizados de forma explicativa na Figura 12.

Figura 12 Influência do formato das encostas no escoamento superficial



Fonte: Adaptado de Ruhe (1975) citado por Minella (2013)

Pelo acentuado relevo característico da região, os diferentes formatos de encostas coexistem em diferentes tipos na bacia de Arvorezinha. Em escala territorial maior, nos dois terços superiores da bacia ocupados com encostas agrícolas sobre Argissolos, predomina um

misto de formatos convexo-convexo e convexo-côncavo, que coexistem lado a lado, formando talvegues pronunciados no centro das côncavo-convexas, e nas vizinhanças das convexo-convexo. Isto proporciona condições de que encostas tenham em seu topo uma menor declividade que favorece a infiltração, diminui a velocidade do escoamento, e assim favorece a erosão entresulcos. À medida que nos aproximamos da metade em diante da encosta, aumenta a declividade, acelerando e concentrando os fluxos em talvegues bem definidos, que adicionalmente proporcionam conexão direta com o canal principal, sendo poucos os locais onde temos áreas de deposição proporcionadas por exemplo pelo formato retilíneo-concavo. No terço inferior da bacia temos encostas em maior número convexo-retilíneas. Existe uma clara região de transição, onde o relevo tem um diferencial acentuado de altitude entre a parte superior da bacia ocupado pelos Argissolos e o terço inferior ocupado por Neossolos. Nos Neossolos após esse gradiente de altitude, o leito do canal principal tem menor declive, mas com encostas íngremes à sua volta.

Em função destas características, a formação de talvegues bem pronunciados nas encostas é bem evidente e existente praticamente sobre toda a bacia, se estendendo desde a base da encosta até a porção mediana ou mesmo superior dela. Estes talvegues, de alta declividade e comprimento de rampa, proporcionam alta velocidade para o escoamento concentrado, o que intensifica o processo de erosão, exaurindo os sedimentos existentes até encontrar uma região do perfil do solo que se caracteriza por uma área compactada, um horizonte com grande gradiente textural como o B textural dos Argissolos, ou mesmo a rocha matriz consolidada, ou fragmentos de rocha. Estes locais têm dois comportamentos. Primeiro, são naturalmente impermeáveis, ou muito pouco permeáveis. E segundo, sua ramificação topográfica sobre a encosta gera condições de conexão dos fluxos de forma direta entre os topos e meia encostas com a sua base, de forma muito acelerada, favorecendo o recolhimento e despacho e uma quantia maior de água sem oportunidade de reinfiltração.

Muitos locais da bacia apresentam este comportamento, visto que o processo erosivo acontece a décadas nesses locais, desde que a cobertura vegetal da mata atlântica sobre a área foi removida e a bacia passou a ter um perfil agrícola. Desta forma, apesar das intervenções retificadoras para cobrir novamente o solo sobre os talvegues, é uma prática com efeito temporário, tanto que muitos deles já passaram a ser consideradas áreas impróprias para o cultivo devido ao alto estado de degradação. Muitos passaram a ser descartados para agricultura ou passaram a ter funções como estradas internas na propriedade, e agora constituem locais improdutivos.

A Figura 13 e 14 apresenta casos de formação de sulcos sobre as encostas agrícolas sob cultivo, tanto no sistema convencional como no sistema de plantio direto. Estas imagens reproduzem o comportamento comum na bacia, onde o solo apresenta pouca profundidade ocorre a formação do sulco nos caminhos preferenciais da água condicionadas pelo relevo das encostas. Da mesma forma, o escoamento é condicionado pelos camalhões do tabaco e nas estradas.

Figura 13 Sulcos nas estradas, trilhas e lavouras



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 14 Linha das vertentes nas encostas



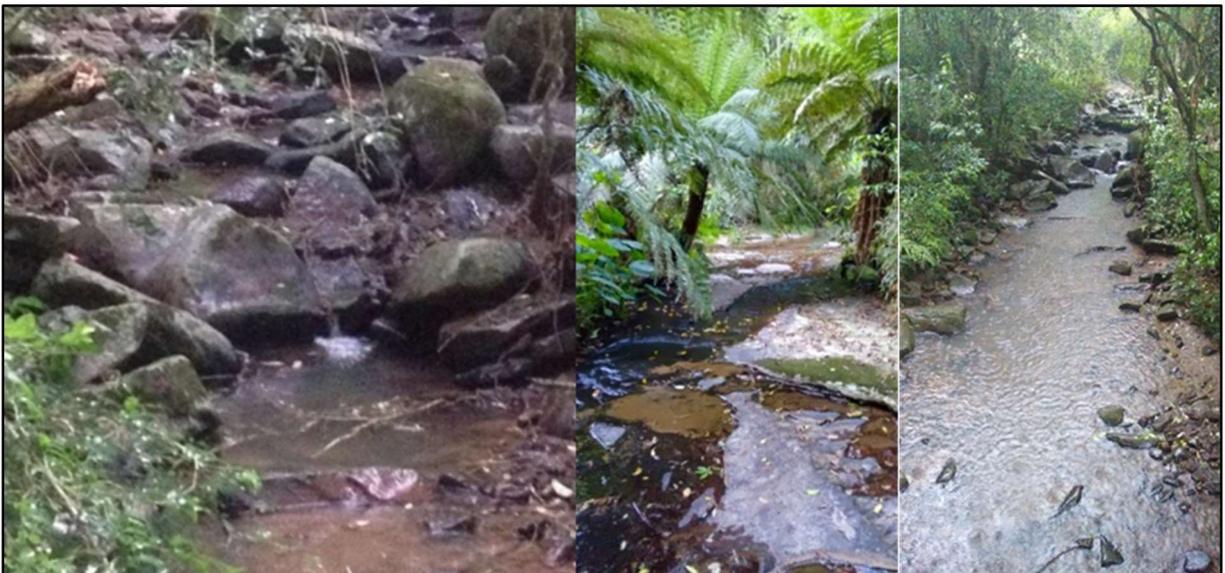
Fonte: Elaborado pelo autor

4.8.3 Canais permanentes

Canais permanentes são aqueles que compõem a rede de drenagem principal da bacia, formados pelo caminho natural que a água percorre no contexto da paisagem em maior escala (Figura 15). Forma os canais de primeira, segunda, terceira ou maior ordem na escala de Strahler que não sofrem intervenção de retrabalho pelo homem. São relativamente largos, profundos e ocupam uma área maior na bacia se comparados com os demais da rede de drenagem. Recebem a precipitação direta, no qual formam escoamento superficial por incidirem sobre a própria água escoando, seu leito descoberto e nas regiões das margens e próximas que se apresentam com grande conteúdo de água ou mesmo saturadas. Os canais principais podem oferecer infiltração no seu leito, processo inclusive contemplado no modelo LISEM. Porém, as características do leito dos canais principais em Arvorezinha são de leito rochoso, contato direto com a rocha matriz, que lhe conferem impermeabilidade e rugosidade variável conforme o nível de desenvolvimento do solo local.

A morfologia do canal está ligada ao relevo e a configuração dos perfis de solo na bacia, predominantemente sobre Argissolos e Neossolos. Locais mais planos apresentam maior rugosidade pela movimentação e deposição de rochas menores e sedimentos no leito, enquanto locais mais declivosos apresentam maior energia de escoamento e se apresentam com leito liso e mais largo. A figura apresenta a condição do leito próximo ao exutório da bacia, a figura mostra um ponto localizado próximo à cabeceira da bacia e a figura apresenta um local numa posição intermediária, mas com alta declividade.

Figura 15 Canais permanentes no terço superior, intermediário e inferior da bacia



Fonte: Elaborado pelo autor

A rede de drenagem principal se caracteriza em um local que promove escoamento superficial direto da precipitação incidente, e sua delimitação pode ser realizada através de forma automática por algoritmos de extração da rede de drenagem a partir do modelo digital de elevação considerando limites impostos, e que podem sofrer ajustes manuais conforme a necessidade. Esta rede de drenagem pode responder por parte significativa do escoamento dos eventos, sendo locais onde sempre ocorre a formação de escoamento, independente do padrão da precipitação. Eventos de menor volume, que não geram escoamento nas encostas, definitivamente geram escoamento nos canais. Nos canais principais também é maior a probabilidade de ocorrência de migração da água do solo para o canal através da percolação pelas suas margens, contribuindo para a mistura do escoamento subsuperficial com o superficial. Da mesma forma, as dimensões dos canais vão aumentando à medida que se aproxima do exutório e locais mais planos, onde pode existir regiões de maior acúmulo de água ou saturação que migram facilmente para o canal.

4.8.4 Áreas de afluência variável

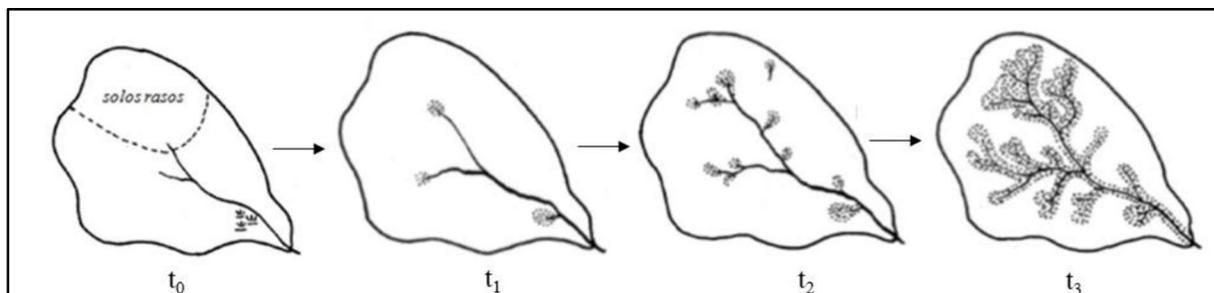
A importância das áreas de afluência variável (AAV) no contexto de bacias hidrográficas se destaca como fontes de escoamento e de sedimentos que podem ter importância e impacto na qualidade da água à jusante, visto que são locais onde a atividade agrícola entra em contato por intermédio dos fluxos hídricos expandidos pela saturação com os córregos, podendo carrear pesticidas e adubos químicos aplicados sobre a lavoura (BRESSIANI; SCHMIDT, 2016).

As AAV são definidas por Lima (2001) e Zakia et al. ((2009)) como as áreas da bacia hidrográfica que correspondem à zona de saturação hídrica do perfil do solo que proporciona a formação do escoamento superficial, sendo que elas são dinâmicas em contração e expansão pela quantidade e intensidade da incidência da chuva (Figura 16). Em geral, encontram-se próximas aos canais de drenagem e nas cabeceiras dos cursos de água, nas concavidades de terrenos para as quais convergem as linhas de fluxo e mesmo em porções de áreas saturadas encontradas em pontos mais elevados de encostas. Esta última forma é característica da bacia de Arvorezinha, onde locais de saturação do perfil por inundação do canal verdadeiramente não são comuns (Figura 17). Mas o que se apresenta são bordaduras entre os canais de drenagem e as encostas agrícolas que sofrem rápido acúmulo de água em função da direção de fluxo oferecida pela construção de camalhões, geralmente no sentido do declive da encosta que promovem a união rápida de vários fluxos concentrados ao pé da

encosta, gerando uma lâmina de água persistente, também associada com impedimentos no perfil para a infiltração.

Este processo hidrológico surge em função do progresso da precipitação e diminuição gradativa da velocidade inicial com que a infiltração de água no solo acontece, tendendo a diminuir até chegar na velocidade determinada pela condutividade hidráulica saturada. Contribuem para a formação das AAV um conjunto concomitante de processos compreendendo formação de escoamento Dunniano, escoamento Hortoniano e surgimento de AAV sobre as encostas e baixadas do terreno. O modelo LISEM tem limitações em representar o processo Dunniano, embora ele possa ser representado pela saturação das células, como abordado por Barros (2012), onde conclui que o modelo não tem capacidade de simular as áreas de afluência variável. Desta forma, parte do escoamento gerado na bacia por estes processos pode não estar sendo calculada e representada pelo modelo. Certos locais oferecem saturação do solo, e se não representadas corretamente pelos valores de umidade, podemos ter que atuar sobre a calibração de valores de condutividade hidráulica sobre estas e outras áreas para compensar o escoamento gerado e não computado.

Figura 16 Esquema da dinâmica da evolução temporal das áreas de afluência variável



Fonte: CHORLEY, 1978.

4.8.5 Áreas de acúmulo de umidade e sujeitas à saturação hídrica

Áreas de saturação hídrica são locais caracterizados por relevo plano e que acumulam água no perfil do solo que lhe permitem rapidamente chegar ao estado de saturação de água (Figura 18). Podem se localizar nas partes altas do relevo, formando bolões de água, mas não é comum na bacia encontrarmos esta situação. Porém são comuns em locais próximos ao canal principal da rede de drenagem. Seu comportamento se confunde com as áreas de afluência variável, porém aqui o depósito de água pode ser mais persistente após o evento pluviométrico por alguns dias, podendo ainda estar saturado entre dois eventos

consecutivos ocorridos em pequenos intervalos de tempo. Em uma região com relevo tão acentuado como na área da bacia, estes locais não ocupam área expressiva, mas podem apresentar impacto significativo sobre o escoamento dos eventos. À medida que as encostas agrícolas se aproximam do canal, se tornam mais planas e são locais de armazenamento de água e de deposição de sedimentos, o que vai favorecendo ainda mais o processo de nivelamento destes locais. São baixadas que devido ao relevo e pelo sombreamento pela mata ciliar, formam bolsões de armazenamento e que se mantem mais úmidos entre os eventos. E por serem as partes mais baixas do relevo recebem maior quantidade de água direta e a partir das encostas, o que favorece problemas de transferência de poluentes comprometendo a qualidade de água. A qualidade de água e sua resposta frente às diferentes fontes de poluição ambiental foram abordadas em estudo de Bastos (2021) sobre estratégias de monitoramento da qualidade de água em bacias de cabeceira.

Figura 17 Áreas de afluência variável



Fonte: Elaborado pelo autor

Estes locais, associados com a rede de drenagem permanente, assumem um comportamento hidrológico mais propício à formação do escoamento superficial. Associando

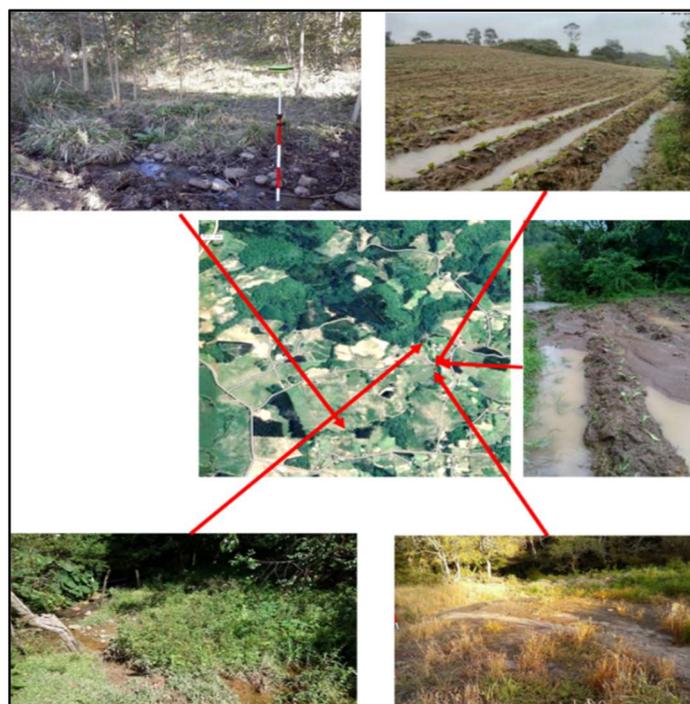
a morfologia das encostas, com o perfil dos solos Neossolos e Argissolos das encostas agrícolas apresentado anteriormente, temos as condições para a formação do escoamento superficial direto ou rápida saturação nestas áreas. É também o local para o qual convergem os fluxos subsuperficiais a partir das encostas, para posteriormente ingressarem na rede de drenagem permanente (Figura 19). Estes locais raramente são tratados como com comportamento diferenciado na modelagem, sendo a preparação dos mapas de entrada são considerados apenas a rede de drenagem permanente, e não uma área maior com este comportamento hidrológico.

Figura 18 Regiões sujeitas ao alagamento e deposição de sedimentos nas áreas próximas dos canais



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 19 Áreas de acúmulo de água sujeitas a saturação



Fonte: Elaborado pelo autor

4.9 DESAGREGAÇÃO, TRANSPORTE E DEPOSIÇÃO DE SEDIMENTOS

Discutiremos a seguir, como os escoamentos superficiais e subsuperficiais atuam no processo da erosão e no carregamento dos sedimentos relacionados com estas estruturas hidrológicas apresentadas. O modelo LISEM opera a erosão e deposição de sedimentos pelo princípio de Morgan et al. (1998):

$$e = D_s + D_f - D_p$$

Onde D_s é a erosão pelo *splash* (kg/s), D_f é a desagregação pelo fluxo e D_p é a deposição.

A erosão líquida é calculada pela componente da desagregação pelo impacto da gota da chuva sobre o solo (*splash detachment*) e a componente da erosão pela desagregação do solo pelo fluxo do escoamento superficial (*flow detachment*), subtraída da deposição dos sedimentos transportados.

4.9.1 Cálculo da desagregação e deposição pelo impacto da gota

A erosão pelo impacto da gota de chuva, ou erosão pelo *splash* é calculada em função de fatores da precipitação, como a energia da chuva representada pela sua intensidade das gotas e pelo volume da lâmina de precipitação incidente. Também considera a resistência que o solo apresenta a este impacto por intermédio da estabilidade de agregados dos solos, representado pelo valor numérico de gotas que podem incidir sobre um agregado de solo para parti-lo, diminuindo em 50% o seu tamanho, valor estimado pelo teste de Lowe. Esta configuração é a adotada no LISEM, onde valores maiores de estabilidade significam menor desagregação. Para representar a resistência do solo, se fornece um mapa de distribuição da estabilidade de agregados do solo sobre a bacia (*Aggregates*). Estes valores estão associados com uma equação de energia de desagregação apropriada para o local de estudo. No caso utiliza-se uma equação exponencial inversa proposta por Sanchez (2012) com coeficientes a e b calculados para a região. Por pesquisas de Ramon et al. (RAMON *et al.*, 2017) e colaboradores foi determinado os valores de a e b para o local como sendo

Em bacias agrícolas em que o preparo do solo de forma convencional é predominante, como no caso de Arvorezinha, os longos períodos em que a cultura fica exposta ao contato direto da precipitação favorecem a participação de proporção importante da erosão total sendo devida à erosão pelo splash. Esta situação se agrava pelo fato que este tipo de cultivo favorece a desagregação do solo pelo próprio trabalho mecânico do preparo, fracionando o solo estruturado em agregados menores. Também, o revolvimento do solo acaba por causar a compactação nas camadas mais superiores do perfil, entupimento dos

poros e favorecem a dispersão das partículas do solo a curtas distâncias pelo impacto da gota. Entretanto, a validação espacial dos processos de desagregação por este método, o transporte e deposição simulados pelos modelos, é difícil e onerosa de ser obtida a partir de informações a nível de campo.

4.9.2 Cálculo da desagregação e deposição pelo escoamento superficial

O modelo trabalha com a teoria da capacidade de transporte formulada por Govers (1990) e Morgan et al. (1998), em função da potência do fluxo do escoamento:

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

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

$$c = \frac{(D50 + 5)^{-0.6}}{0.32}$$

$$d = \frac{(D50 + 5)^{0.25}}{300}$$

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

D_{50} e D_{90} , agem no escoamento superficial e estabilidade de agregados no impacto direto da chuva. Seus valores são dependentes da umidade do solo. 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*):

$$dep = wsB \min(0.0, (T - C))$$

$$det = B \max(0.0, (T - C))$$

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

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

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

Onde y é o coeficiente de eficiência da desagregação.

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

$$y = \frac{U_{gmin}}{U_{gcrit}} = \min \left(1.0, \frac{1}{0.89 + 0.56(co + coveg)} \right)$$

Onde U_{gmin} é o mínimo requerido de velocidade de cisalhamento de grãos crítica, U_{gcrit} 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 de eficiência, 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. A maioria das calibrações e validações do modelo 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:

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

$$y = 1.0 / (2.0Co)$$

Para a entrada de variáveis relacionadas com a desagregação do solo são fornecidos os seguintes mapas:

- Cohesion: mapa com valores de coesão do solo;
- Cohesion extra: mapas com valores de coesão adicional pelas raízes;
- D50: valores de granulometria limítrofe para 50% da massa de sedimentos;
- D90: valores de granulometria limítrofe para 90% da massa de sedimentos;

Toda a representação matemática dos processos de desagregação, transporte e deposição de sedimentos apresenta grandes desafios, pois ela depende basicamente das características dos solos e do ambiente para onde são propostas. E a definição do que ocorre entre desagregação ou deposição no modelo é feita considerando o conceito de capacidade de transporte, que é avaliado através de experimentos de escoamento onde se relacionam empiricamente variáveis hidráulicas do escoamento com o comportamento dos sedimentos. Estas fases do processo erosivo formam a base de desenvolvimento de modelos de base física, como Kinematic Runoff and Erosion (KINEROS2) (Smith et al., 1995), European Soil Erosion Model (EUROSEM) (Morgan et al., 1998) e Water Erosion Prediction Project (WEPP) model (Flanagan et al., 2001).

Uma das principais limitações para o desenvolvimento de equações mais robustas está no fato de que o comportamento dos sedimentos simulados em estruturas experimentais, com condições uniformes de leito, granulometria do material transportado, escoamento e declividades de rampa podem ser totalmente diferentes daquele presente nas encostas agrícolas, onde uma complexidade de fatores interage e afeta os processos de transporte. Os experimentos conduzidos para formular estas equações tem comportamento muito mais próximo do fluxo em canais do que no fluxo em superfície, como profundidade, interações com a superfície e declividade nos eventos sob condições reais (WIRTZ *et al.*, 2013). Também, as propriedades do material erodível se modificam e causam alterações na morfologia do meio onde os fluxos ocorrem ao longo do evento, gerando uma dinâmica diferente entre os processos erosivos sob material coesivo e não coesivo. Desta forma, certas equações e estratégias se prestam mais a certas condições que outras, sendo que a escolha delas é fundamental para o bom termo da modelagem de sedimentos. (Hessel e Jetten, 2007).

A capacidade de transporte de sedimentos pode ser representada por intermédio de equações propostas por diferentes autores. Entre os estudos desenvolvidos temos a equação proposta por Yalin (1963) derivada a partir da tensão crítica do cisalhamento sobre leito de material de granulometria uniforme, não coesivo e sob baixas declividades. Mais tarde, Yang (1972) utilizou o *stream power* como referência nos estudos, que se mostrou com melhor performance do que a de Yalin, porém, também com material não coesivo e de granulometria uniforme sob declividades entre 1.7% a 21.0%. Já Govers (1990) desenvolveu uma equação para representar os processos de deposição que é aplicada nos modelos EUROSEM e LISSEM (De Roo et al., 1996), ao qual mesmo sendo própria para condições de maior declividade e usar a potência de escoamento como parâmetro de controle no processo de transporte, foi considerada um das com melhor desempenho nos ensaios de modelagem, o que coloca o

LISEM como modelo representante da classe de modelos físicos e distribuídos em destaque no que se refere à capacidade de representar o processo erosivo em bacias hidrográficas. A dificuldade de representar a erosão se agrava ainda mais quando as características do meio são mutantes ao longo de uma sequência de eventos. Embora os solos da bacia sejam considerados como coesivos pela presença de Argissolos em suas encostas agrícolas, o que é até certo ponto desfavorável ao uso do LISEM, o relevo acentuado e o uso intensivo das encostas com agricultura que promove revolvimento da camada arável, existe a rápida renovação e exaurimento dos sedimentos nos pontos de maior escoamento. Isto traz comportamento errático do modelo, que não é capaz de prontamente identificar esta dinâmica. A superestimativa da produção de sedimentos pelo modelo como mencionado por autores como Moro (2011a) e Barros (2012) pode ser parcialmente devido a estas limitações. Além disso, como todo software em desenvolvimento, o LISEM apresenta eventualmente falhas de programação, que podem ser apenas na forma de apresentar os resultados, ou que envolvem cálculo de processos. Estes erros normalmente são reportados, e uma sequência de versões implementando melhorias e correções é frequentemente publicada. Por ser um software de estrutura aberta e de livre distribuição, oferece possibilidade de eventualmente ser alterado e compilado pelos próprios usuários (<https://sourceforge.net/projects/lisem/files/>).

4.9.3 Fatores que atuam na desconectividade de fluxos hídricos e de sedimentos

Entre os principais aspectos que influenciam a forma como o escoamento superficial e os sedimentos são transportados entre as encostas e a rede de drenagem principal temos: o efeito da condição de saturação da superfície e a ação da configuração da zona ripária que controla passagem de água, sedimentos, nutrientes e poluentes até o canal principal. Segundo Bracken (2013), temos cinco áreas recorrentes de investigação sobre conectividade em bacias hidrográficas nos trabalhos publicados: i) avaliação de padrões de umidade do solo, ii) padrões de processos de escoamento sobre as encostas, iii) controle da topografia (incluindo estradas), iv) desenvolvimento de modelos que exploram a conectividade e v) criação de índices de conectividade. Grande parte dos modelos erosivos, incluindo o LISEM, tem restrições para representar processos de conectividade em suas rotinas. Porém, o autor afirma justamente que não basta bem simular a infiltração de água na bacia, mas também devemos atuar em bem representar os pontos de conexão dos escoamentos na superfície do solo, sendo esta essencialmente uma opção do usuário em bem representar estes processos.

A condição de teor de água no solo ao longo da encosta, bem como a condutividade hidráulica são fatores que vão controlar a formação ou manutenção dos níveis de escoamento

na superfície, que propicia condições para o carregamento dos sedimentos pelo fluxo contínuo. Caso isto não ocorra, pode haver a formação de locais de reinfiltração e consequentemente de deposição de sedimentos (BRACKEN *et al.*, 2015). Este é o caso das zonas ripárias, que são locais onde temos depósitos de sedimentos formando planícies de aporte e desaceleração dos fluxos e deposição de sedimentos (VON FREYBERG *et al.*, 2014). A topografia oferece importante papel no processo de conectividade onde a declividade favorece e acelera o escoamento superficial. Da mesma forma, a topografia junto aos canais oferece locais mais planos favorecendo a deposição (JANZEN; MCDONNELL, 2015b). A zona ripária oferece locais com presença de fluxos subsuperficiais devido à concentração de água promovida pela gravidade e relevo e proximidade da camada impermeável ou rocha no solo. Podem ser áreas saturadas ou com alto teor de água no perfil. Esta condição de saturação propicia o transporte principalmente de nutrientes e poluentes pelo escoamento subsuperficial de forma contínua. O comportamento da saturação nestes locais governa processos de conectividade hidrológica e de sedimentos. Caso sejam locais onde temos boa capacidade de infiltração, tanto águas do escoamento superficial como subsuperficial podem penetrar em sua área, promovendo papel de filtro para os sedimentos e poluentes (BAARTMAN *et al.*, 2013) Caso sejam locais sujeitos à fácil saturação, temos a predominância do escoamento superficial sobre a área, aumentando o risco de transporte direto dos sedimentos diretamente ao canal fluvial. Na zona ripária, a vegetação desempenha papel fundamental para controlar e retardar os fluxos superficiais de água e sedimentos. Atuando como um filtro, a vegetação através de partes da planta como raízes, caules e serrapilheira oferecem resistência e reduzem a velocidade do escoamento e proporcionam maior oportunidade de sedimentação e reinfiltração (TIECHER *et al.*, 2016). Disto advém a importância da manutenção de buffers de vegetação ao longo das margens dos canais, tanto como forma de proteção pra suas margens como para desempenhar este papel hidrológico nestes locais.

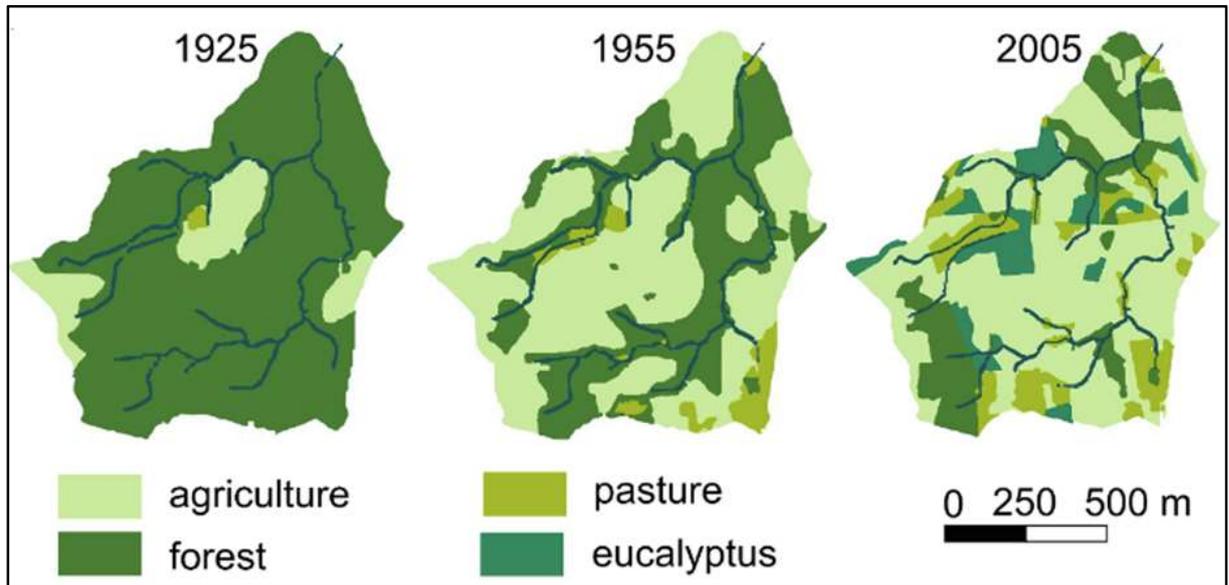
No entanto, em bacias com relevo mais acentuado, a formação de locais de deposição é mais difícil, pois temos a formação de um canal na linha das vertentes que se estende desde a encosta até o contato direto com as margens dos canais. O uso agrícola em plantio convencional propicia a baixa proteção do solo e a formação de sulcos de erosão nas encostas agravando esta situação por propiciar conexões diretas da água e sedimentos com o canal (CAPOANE; TIECHER; SANTOS, 2016) Nestas condições topográficas, mesmo em locais vegetados e com florestas apresentam esta característica. No entanto, largas extensões de matas ciliares propiciam um condicionamento muito maior da superfície do solo com

proteção e aumento de rugosidade, onde a própria conservação da morfologia da superfície evita o agravamento da situação de degradação dos solos (LIMA, 2001).

A bacia de Arvorezinha apresenta características de relevo montanhoso, onde o relevo propicia os efeitos de erosão dos solos e conectividade direta com os canais. Seu uso agrícola intensivo ao longo dos anos (Figura 20) propiciou a conversão da mata nativa em agricultura onde posteriormente houve ainda a expansão destas áreas sobre áreas das zonas ciliares de proteção existentes (BROSENS *et al.*, 2021). O desmatamento pelo corte e destoca, foi realizado de forma rápida e com equipamentos pesados que agilizaram a preparação do terreno e a implantação da nova cultura sobre a área, com uso de espécies forrageiras ou mesmo a própria vegetação natural. Algumas intervenções pontuais de terraplanagem e condicionamento de algumas encostas foram feitas, mas que não tem relação direta com os cultivos agrícolas, sendo seu impacto mais sentido diretamente sobre as áreas de drenagem junto às estradas. Esta alteração ocorreu por volta de 2018 e se manteve estável nos anos subsequentes, com poucas modificações na dinâmica ou ocorrendo em pequenas glebas. Entretanto, a tendência geral de ocupação da bacia procurou manter a cobertura do solo com menor revolvimento na maior parte das encostas, com proteção de cobertura verde durante o inverno e plantio direto nas culturas de verão. O pousio também foi usado em áreas onde a migração não foi imediata de uma cultura para outra. Mesmo sob as encostas de maior declividade e solos mais frágeis nesses locais sob adoção de plantio direto simplificado, que mantem o solo com mínimo revolvimento e boa cobertura vegetal, a negligência de outras formas de manejo e controle do escoamento superficial nas lavouras ainda são evidentes. Esta atitude promoveu aumento das perdas de solo e água durante boa parte das últimas décadas devido à prática de cultivos convencionais com grande revolvimento do solo e pouca cobertura vegetal. (MINELLA *et al.*, 2018).

A partir da constatação da possível participação de em torno de 37% das fontes de sedimentos serem oriundos das estradas e das incertezas envolvendo a correta simulação da PS pelo modelo, Silva (2021) simulou aspectos de conectividade de sedimentos com uso do LISEM e práticas conservacionistas aplicadas em escala de bacia, especialmente nas estradas. Ele identificou a ação destas estruturas nos escoamentos pela modelagem, onde houve indicação de que houve redução das perdas de água e sedimentos pela adoção das práticas propostas, evidenciando a importância e efetividade do planejamento conservacionista a partir do uso da modelagem. Este é um ponto positivo do LISEM, que apresenta meios de simular a ação de algumas estruturas.

Figura 20 - Evolução da agricultura na bacia de Arvorezinha



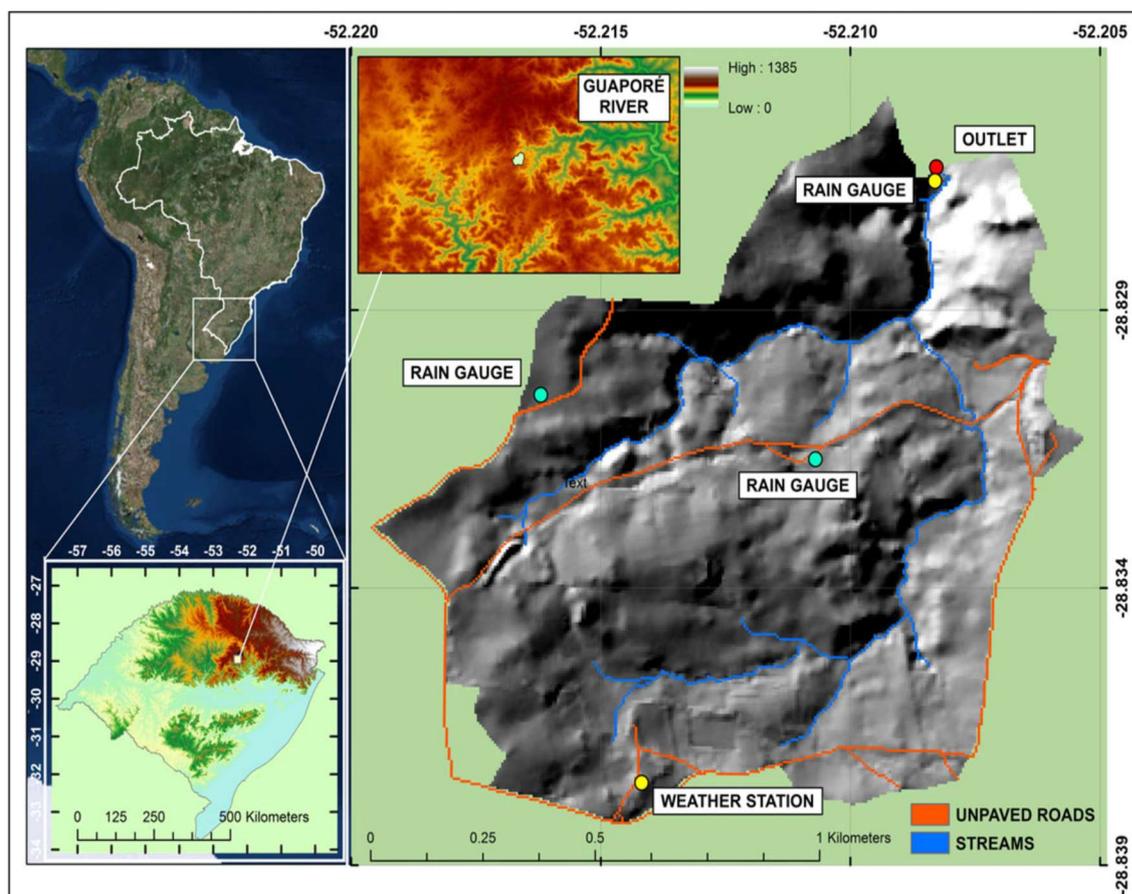
Fonte: Adaptado de Lopes ((LOPES, [s. d.])) citado por Brosens et al. (2021)

5 METODOLOGIA

5.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A bacia hidrográfica do Arroio Lajeado Ferreira está localizada no distrito de Cândido Brum em Arvorezinha, estado do Rio Grande do Sul, com área de 126 hectares e exutório nas coordenadas 28°49'33"S e 52°12'30"W (Figura 21).

Figura 21 - Localização da bacia hidrográfica de Arvorezinha



Fonte: Minella et al. (2017)

No extremo sul brasileiro, temos o bioma Mata Atlântica, com diversidade de relevo e solos, compreendendo o Planalto do RS e no seu rebordo, as encostas basálticas (MORO, 2011a). O clima na região é do tipo Cfb segundo a escala de Köppen, com precipitações médias anuais entre 1.250 e 2.000 mm. Sobre a região se manifestam fenômenos climáticos cíclicos como o El Niño e La Niña, com alterações nos regimes de chuvas em função das alterações na temperatura dos mares do pacífico (ENSO). Estes fenômenos trazem impactos econômicos e ambientais pela incidência de eventos pluviométricos com grandes volumes e

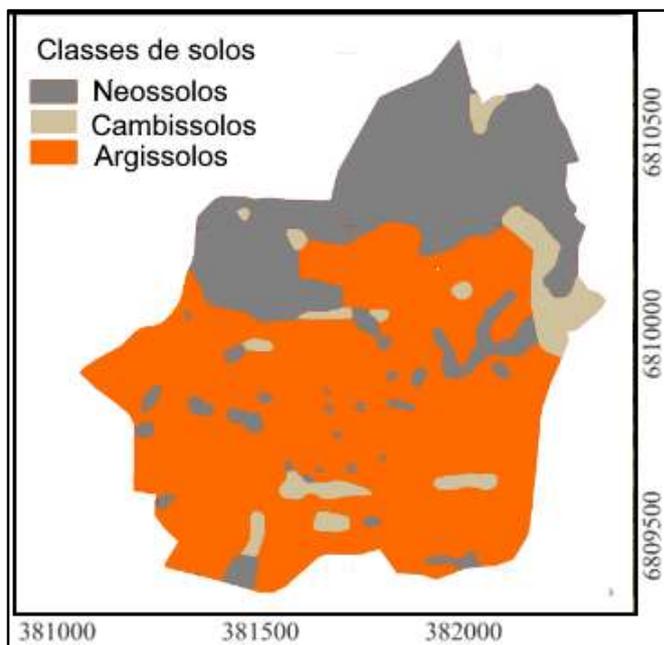
alta intensidade, intercalados por períodos de secas. O regime climático e a localização geográfica, propiciam nesse bioma, abundância de água e temperaturas amenas para as atividades agrícolas. No entanto, apresenta elevada fragilidade quando inseridos no contexto de desenvolvimento agrícola. A bacia 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 11). Na região do rebordo do Planalto existe grande gradiente hipsométrico na transição entre o Planalto com a Depressão Central, portanto muitas encostas apresentam limitações quanto ao uso agrícola para culturas anuais de forma mecanizada.

A região é ocupada por pequenas propriedades, uso de baixa tecnologia, com mão de obra familiar, voltada para atividades e cultivos de subsistência. Nas propriedades 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. A cultura do tabaco se caracteriza pela intensa manipulação do solo para seu preparo, além de sofrer ação de altas cargas de fertilizantes e pesticidas para o controle de pragas e ervas daninhas. Como a cultura é exigente em boa drenagem, são utilizadas encostas com maior declividade, onde são construídos camalhões no sentido do declive para favorecer a drenagem, facilitando a ação da erosão em maior proporção. Porém, nos últimos anos houve avanço de culturas de maior apelo econômico como a soja, com maior pressão ambiental sobre áreas de solos frágeis e suscetíveis à erosão (MINELLA *et al.*, 2018). A partir de 2014, a dinâmica de alterações de uso começou a se estabilizar com a conversão de áreas anteriormente ocupadas com pastagens para o cultivo de soja em PD simplificado. Também há um pequeno avanço da cultura da erva-mate sobre matas nativas remanescentes da Mata Atlântica e áreas de proteção ambiental permanentes (APP).

As três principais classes de solos presentes na bacia são: Argissolos, Cambissolos e Neossolos. Estes solos apresentam características diferentes quanto ao comportamento da infiltração, considerando inclusive as suas variações associadas com o relevo, profundidade do solo e posição geográfica na bacia. 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, que apresentam camada impeditiva à infiltração de água no perfil do solo a pouca profundidade devido à presença de horizonte B textural. O mapa de solos apresentado na Figura 22 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.

Figura 22 - Mapa de solos da bacia de Arvorezinha



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.2 MONITORAMENTO HIDROLÓGICO

5.2.1 Precipitação

Dados de precipitação foram obtidos com pluviógrafos e pluviômetros distribuídos pela bacia, que coletam dados em intervalos de dez minutos e acumulados diários de precipitação. O pluviógrafo (Figura 23) é um equipamento que registra o volume de precipitação em função do tempo em um datalogger, permitindo identificar a intensidade da chuva. De posse do número de batidas contadas pelo pluviógrafo se realiza a conversão deste número em precipitação em mm em uma planilha de evento, onde se fazem os cálculos necessários. Os dados do pluviógrafo são tabulados e organizados na escala de 10 minutos, depois usadas nos cálculos indicadores que compreendem, precipitação total e intensidade máxima em 10, 30 e 60 minutos de cada evento. O aparelho passa por uma calibração e manutenção frequentes para precisão e funcionamento. Da mesma forma, os pluviômetros são lidos manualmente em intervalos regulares, onde se procede a leitura do volume contido em seu interior através de uma proveta graduada em mm, uma leitura precisa do volume de chuva ocorrido. A calibração dos aparelhos se faz pela comparação e aferição em conjunto, cruzando

dados do pluviógrafo com os dados dos pluviômetros para se chegar a uma leitura mais correta das duas informações, volume e intensidade.

Figura 23 - Pluviógrafo e pluviômetro



Fonte: Elaborado pelo autor

Além das coletas realizadas pelos aparelhos também há colaboração de alguns moradores da bacia que realizam a leitura diária em pluviômetros instalados em suas propriedades, para aumentar a quantidade e confiabilidade da base de dados sobre precipitação. A Tabela 2 apresenta os valores de precipitação mensal sobre a bacia entre 2014 e 2022. Dados de precipitação são computados com escala diária, mensal e anual.

Tabela 2 - Precipitação mensal (mm) sobre a bacia de Arvorezinha

Meses	Ano									
	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	
Janeiro	229	219	87	157	215	213	125	285	181	
Fevereiro	211	124	150	133	138	123	112	79	102	
Março	173	103	311	265	154	136	32	116	213	
Abril	184	154	246	228	66	154	47	10	267	
Maio	204	143	62	346	103	190	168	254	289	
Junho	389	264	12	165	127	84	245	211	217	
Julho	187	295	176	30	183	58	409	32	136	
Agosto	117	71	86	125	188	111	130	126		
Setembro	303	272	63	103	204	74	127	221		
Outubro	201	329	416	208	246	363	31	110		
Novembro	59	145	113	206	289	178	82	34		
Dezembro	260	365	153	122	171	85	169	48		
Totais	2517	2484	1875	2088	2084	1769	1677	1525	1405	

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.2.2 Descarga líquida

O volume de água que escoar pela rede de drenagem na bacia até o exutório é mensurado como descarga líquida, sendo formado pelo volume do escoamento superficial e subsuperficial nos eventos e pelo escoamento de base da bacia. O escoamento de base representa o volume de água que percorre os canais, proveniente de afloramentos líquidos subterrâneos e do escoamento subsuperficial lateral das encostas até os canais de drenagem. Ao se medir a quantidade de volume de água que passa pelo canal do exutório e o total precipitado sobre a bacia se estabelece o coeficiente de escoamento da bacia, ou seja, a proporção de água que se deslocou da bacia para o exutório no evento.

Para medições de vazões existe uma calha Parshall no exutório construída em 2001 feita de material de alvenaria e concreto e dimensionada para suportar vazões compatíveis com a bacia (Figura 24). Para calcular a vazão usa-se uma equação específica de conversão da altura da lâmina de água que passa pela calha para vazão em $L\ s^{-1}$ ou $m^3\ s^{-1}$. A leitura da lâmina é feita por linígrafos automáticos que são sensores de pressão instalados na calha que sofrem a pressão da coluna d'água cujos valores são registrados em *dataloggers*. Regularmente se procedem calibrações do sensor. A leitura indireta pelo linígrafo é calibrada comparando suas leituras pelo sensor com as leituras manuais sobre uma régua linimétrica convencional durante os eventos.

A equação de conversão utilizada foi:

$$Q = 4515 * H^{1.595}$$

Onde H é a altura da lâmina de água na calha.

Figura 24 - Calha Parshall no exutório da bacia.



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.2.3 Concentração de sedimentos em suspensão

A concentração de sedimentos em suspensão existente no escoamento é decorrente dos processos de desagregação dos solos e transporte dos sedimentos erodidos da bacia vertente. Calculando a concentração de sedimentos em suspensão desse fluxo e o volume de líquido escoado nos eventos tem-se uma estimativa sobre a perda total de solo que, na escala de bacia, denominamos produção de sedimentos. Para obter a CSS no escoamento, podemos utilizar diferentes técnicas diretas e indiretas. As diretas incluem a amostragem manual ou automática do líquido e posterior processamento em laboratório das amostras, e as indiretas por meio de uso de turbidímetros, que são sensores eletrônicos da turbidez do líquido.

A amostragem manual de sedimentos é feita em campanhas de coleta de amostras de água do canal em eventos de precipitação ou então do fluxo basal. Com a iminência de eventos de chuva, uma equipe se desloca para o ponto de amostragem no exutório da bacia para realizar coletas manualmente. Existe uma estrutura própria montada para esta finalidade, formada por uma plataforma sobre o canal para posicionamento do amostrador e de um abrigo coberto para armazenamento das amostras. O procedimento de coleta é iniciado com a identificação de um recipiente de vidro de 500 ml. Com o uso de um equipamento específico para a coleta, o amostrador, se faz a coleta na plataforma, posicionando-se sobre o centro do canal para uma amostra representativa. O amostrador utilizado é o modelo USDH-48 (WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION; YANG, 2003) que possui uma entrada de água em forma de um tubo e um reservatório de vidro para coletar a água (Figura 25). Este amostrador é mergulhado no rio no sentido vertical com uma descida e uma subida, de forma a coletar uma amostra representativa do fluxo ao longo de todo perfil do escoamento e em tempo adequado para o preenchimento da garrafa. Como existe uma variabilidade de tamanho e peso de partículas ao longo do perfil, as mais pesadas e maiores ao fundo e as mais leves e pequenas na superfície, deve-se procurar coletar toda a variação da amostra no ato da coleta. As coletas devem ser feitas em intervalos de subida e descida do leito conforme os objetivos do trabalho, mas geralmente se coleta uma amostra a cada dois centímetros de subida da lâmina do canal, acompanhado por uma régua linimétrica auxiliar junto à plataforma até o ponto máximo de cota, e posteriormente na descida se procede da mesma forma até acontecer a estabilização do nível por ocasião do fim do evento de cheia. A amostra é transferida para o vidro definitivo e codificado que é tampado, limpo externamente e armazenado no abrigo. Ao se coletar a amostra se anota em planilha os dados do código da amostra, hora da coleta e

altura da régua linimétrica. Com estes dados monta-se um gráfico de acompanhamento da curva de vazão do evento. Após o término das coletas as amostras são enviadas junto à planilha ao, para determinar a CSS das amostras. As amostras coletadas foram encaminhadas ao laboratório do GIPEHS da UFSM, onde foram processadas pelo método de evaporação, segundo protocolo de análise descritos por Shreve e Downs (2005).

Amostras de CSS também são obtidas com o uso de amostradores automáticos de coleta de amostras do canal, instalados nos pontos de monitoramento. Esses equipamentos coletam um volume programado de líquido e armazenam em garrafas dentro do aparelho. O modelo instalado em Arvorezinha é da empresa Teledyne Isco Inc. e modelo 6712 com capacidade de 24 garrafas que podem ser preenchidas com amostras individuais ou compartilhadas com mais de uma coleta. A programação pode ser feita diretamente no computador do aparelho e pode ser as em função do nível do canal (possui linígrafo incorporado) ou por intervalos de tempo programados. Tem capacidade de funcionamento que depende dos eventos ou da programação, exigindo a revisita apenas para a troca das garrafas ocupadas por outras vazias e envio das amostras para o laboratório. O equipamento tem a vantagem de poder coletar eventos sem a presença de técnicos nas campanhas, incorrendo em menores custos de deslocamentos para o monitoramento. Tem desvantagem em não coletar uma amostra que segue os procedimentos e premissas adequadas a uma boa amostragem para finalidade de analisar concentração de sedimentos, pois a coleta é feita em um ponto estático no leito exigindo cuidado na interpretação dos resultados.

Figura 25 – Coleta de sedimentos por amostradores UDH48 e ISCO 6712



Fonte: Elaborado pelo autor.

O segundo método utilizado para determinar a CSS dos eventos é através do uso do turbidímetro (Figura 26), um sensor eletrônico que tem a capacidade de medir a turbidez da água, resultando um sinal em milivolts que é armazenado em dataloggers. Quanto maior a presença de sedimentos em suspensão no líquido menor a transparência, e esta propriedade estão relacionadas com a concentração de partículas. Este sinal elétrico precisa ser calibrado frequentemente para verificar a consistência de funcionamento do sensor, evitando alterações na leitura por flutuação do sinal elétrico devido à problemas do sensor. Usa-se soluções com padrão de concentração e turbidez conhecida segundo protocolos de padronização, segundo procedimentos descritos por Merten et al. (2014). Os sensores são instalados imersos na água e conectados ao leitor eletrônico que armazena as informações do sinal elétrico de data e hora. Após é feito a coleta desses dados e processados em *software* para depuração das leituras. Estes dados são então usados na planilha de eventos para relacionar as ocorrências avaliadas pelo método de amostragem manual (mais preciso) com as leituras do sensor e estabelecidas equações de ajuste dos dados. Pretende-se estudar o ajuste adequado desta relação com um conjunto grande de eventos de calibração para que posteriormente se utilize esses aparelhos de forma confiável nas ações de monitoramento. Apresenta a desvantagem apenas de sofrer a ação de sujidades em seu sensor, mascarando os resultados, exigindo sua limpeza frequente. Por isso as leituras de onda de cheia são mais precisas, pois o sensor está inicialmente limpo, e quando da onda de descida durante e após evento, o sensor se encontra sujo podendo realizar leituras superestimadas da concentração.

Figura 26 - Turbidímetro e estação coletora de dados instalados próximos do exutório.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para calibração do turbidímetro se realiza uma comparação de leituras de CSS das amostras em laboratório e as leituras em milivolts (mV) do turbidímetro em momentos coincidentes, obtendo uma equação para uma melhor correlação (R^2). Esta equação é então aplicada sobre os dados do período de interesse aos outros valores registrados em mV pelo

turbidímetro obtendo a serie completa. A equação utilizada para converter as leituras do turbidímetro em mV para CSS em mg L^{-1} é:

$$CSS = 0.028 * V^{2.07} \quad (R^2 = 0,836)$$

5.2.4 Composição do banco de dados

O banco de dados de chuva (P), vazão (Q) e concentração de sedimentos em suspensão (CSS) obtidos pelo monitoramento coletados manualmente ou de forma automatizada pelo uso de *dataloggers* foram tabulados, processados quanto a continuidade e padronização, preenchimento de falhas, depurados e ajustados sendo avaliados quanto à consistência e organizados de forma instantânea, diária, por eventos e mensal.

A produção de sedimentos (PS), em massa por unidade de área, é determinada pelo monitoramento da descarga total de sedimentos pelo canal no exutório da bacia e estimado pelo produto da vazão e concentração de sedimentos em suspensão em um intervalo de tempo, determinando matematicamente o total produzido de perdas de solo e água em um evento de precipitação sobre a bacia. Usa a equação:

$$PS = \sum_{i=1}^n k (CSS * Q)$$

onde: PS = produção de sedimentos (ton); k = fator de correção de unidades; C_{ss} = concentração de sedimentos em suspensão (g L^{-1}); Q = vazão (L s^{-1}); n = número de medições instantâneas de C_{ss} e Q no tempo.

Foram selecionados no banco de dados 150 eventos de diferentes características para compor a modelagem, sendo determinados e tabelados os dados de precipitação (PPT) em mm, intensidade máxima em 30 minutos (I30) em mm.h^{-1} , tempo de pico da precipitação (PT PPT) em min, vazão de pico (QT_{max}) em L.s^{-1} ; escoamento superficial (Q_{s_max}) em L.s^{-1} , tempo de pico da vazão (PT_Q_s) em min, descarga líquida total (QT) em m^3 , descarga líquida superficial total (QT_s) em m^3 , descarga líquida subsuperficial total (QT_{ss}) em m^3 , concentração de sedimentos em suspensão superficial máxima (CSS_{s_max}) em g.L^{-1} , descarga de sedimentos total (SY) em toneladas e tempo de pico da CSS_s (PT_CSS_s) em min.

Sobre os dados dos eventos selecionados foi aplicado uma Análise de Componentes Principais (PCA) através da função *prcomp* do pacote *stats* do software R. As principais

variáveis hidrológicas observados dos eventos e consideradas na análise foram, precipitação total (PPT), intensidade máxima da precipitação (I30), vazão de pico (QTmax), descarga líquida total (QT), concentração de sedimentos em suspensão máxima (CSSs_max) e produção de sedimentos total (SY), foram consideradas.

Uma análise de cluster foi aplicada ao conjunto de dados usando a ferramenta *fviz* do pacote *factoextra* no R. Esta análise tem o objetivo separar os eventos em grupos com características estatisticamente semelhantes, como volume de escoamento, intensidade de precipitação, concentração de sedimentos ou descarga total de sedimentos.

5.3 CONFIGURAÇÃO DOS NOVOS MAPAS DE ENTRADA AO MODELO

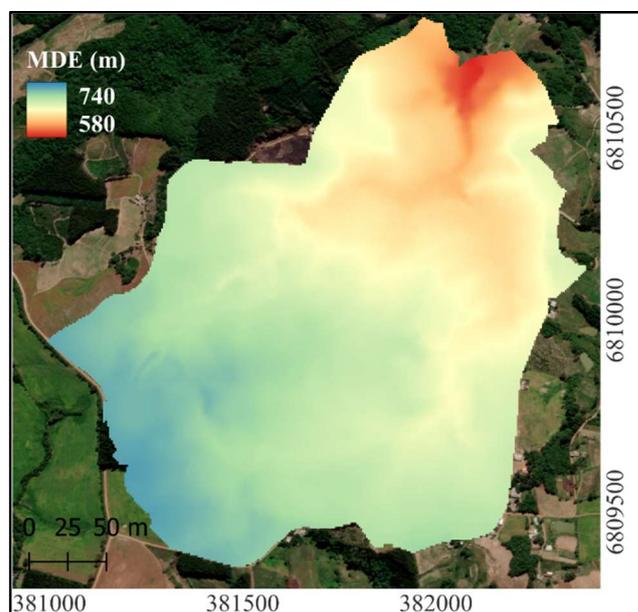
Para testar a hipótese de que as áreas hidrológicamente frágeis controlam preponderantemente o escoamento superficial, foi construído uma nova configuração de mapas de entrada ao modelo a partir dos mapas básicos existentes. Ela envolve um detalhamento maior da rede de drenagem, com setorização dos canais segundo sua posição na paisagem e função, com detalhamento das regiões com baixa permeabilidade do solo desde as encostas até os canais principais, notadamente suas vertentes. E por fim, o detalhamento das regiões propensas ao acúmulo de água potencialmente sujeitas à saturação do perfil ou aceleradoras do processo de escoamento. Desta forma, propõe-se uma ruptura da representação tradicional da distribuição do conteúdo de água no solo e da condutividade hidráulica saturada, que passa a não mais ser referenciada pelo mapa de usos e dos tipos de solo para parametrização das variáveis, mas sim por novos mapas de canais e um mapa de zonas hidrológicas frágeis. Este mapa é elaborado com base na proposta de representação do conteúdo de água no solo e da condutividade hidráulica saturada segundo os efeitos do relevo e as características peculiares de regiões com comportamento hidrológico diferenciado do padrão normal das encostas. Estas três abordagens foram unidas e adaptadas para serem inseridas no conjunto de mapas de entrada ao modelo: canais e solos.

5.3.1 Elaboração de modelo numérico de elevação (MNE)

Para o levantamento topográfico preciso da bacia a escolha recaiu sobre o uso da tecnologia de equipamentos de GPS-RTK com posicionamento cinemático em *Stop and Go* com 3 a 5 segundos de intervalo de leitura dos pontos. Por este sistema a precisão alcançada num levantamento no sistema estático e estático rápido, pode alcançar a precisão de 0,3 cm de posicionamento horizontal e 0,35 cm na vertical. A distância entre as leituras foi de aproximadamente 20 m, totalizando mais de 9.500 pontos que, depois de processados

formaram um modelo de terreno com células de 5 m de resolução (Figura 27), formando um arquivo no formato de saída PcRaster utilizado nos mapas de entrada do LISEM.

Figura 27 - Mapa de relevo (MNE) gerado a partir dos pontos GPS-RTK



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.3.2 Mapa de classes de usos

As encostas ocupadas com os diferentes usos e manejos sobre a bacia foram demarcadas a campo com dispositivo GPS e mapeados no SIG Qgis, demonstrando a dinâmica de usos e manejos conservacionistas ou de plantio convencional, considerando áreas ocupadas por cultivos, florestas e áreas de pastagens sobre a bacia. Também o monitoramento do uso e cobertura do solo foi realizado através de observações de imagens de satélite (Landsat 5, Landsat 8 e Sentinel, Google Earth). Estes mapas são gerados a partir de dados semestrais dos ciclos de ocupação das culturas de inverno e verão.

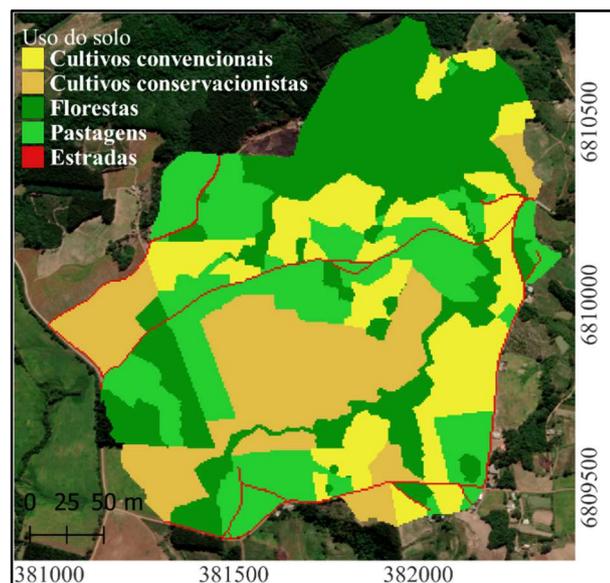
Soja, fumo, pastagem natural, erva-mate, reflorestamento com eucalipto e mata nativa são os principais usos. Observou-se a partir de 2018 até 2022, a conversão de algumas áreas anteriormente ocupadas com florestas nativas e plantadas, para áreas ocupadas com soja em plantio direto. Também houve a conversão de áreas anteriormente ocupadas por fumo em sistema convencional e de cultivo mínimo para soja e plantio de erva-mate, restando algumas poucas áreas onde ainda é cultivado o fumo em plantio convencional, bem como cultivos de subsistência como o milho e feijão.

Neste estudo, o foco não é avaliar o efeito da cobertura vegetal sobre a dinâmica dos escoamentos. O propósito é avaliar o efeito da ação de estruturas que afetam o escoamento e

que agem independentemente das condições de fatores de menor impacto sobre a calibração dos eventos. Em função disso adotamos um único mapa representativo dos usos sobre a bacia, visto que pouco se modificou em termos de ocupação do solo. As poucas alterações de uso que ocorreram, principalmente de 2018 para cá foram da transição de algumas áreas antes cultivadas com fumo e florestas para o cultivo de soja em plantio direto simplificado, o que contribuiu para ainda maior homogeneidade da cobertura do solo na bacia. Além disso, testamos a hipótese de que a condutividade hidráulica saturada sobre as encostas agrícolas se manteve *a priori* em níveis elevados, independente da ação da vegetação.

No nosso modelo de percepção, a cobertura do solo serve de base para definir parâmetros de entrada ao modelo de pouco ou menor impacto sobre a calibração dos eventos. A estratégia principal do trabalho foi aprimorar a capacidade de predição hidrológica dos eventos. Consideramos que as particularidades do uso e do manejo do solo, embora o reconhecido impacto sobre os fluxos na pequena escala de encosta, ela pode ter menor influência sobre o processo de formação do escoamento na escala de bacia. Para evidenciar a importância das áreas hidrológicamente frágeis para a geração do escoamento, podemos simplificar o comportamento dos parâmetros ligados à vegetação sobre as encostas, já que se assume que tenham alta infiltração. Em função destas observações e da pouca alteração de uso do solo no período de 2018 a 2022 optou-se por utilizar um mapa de uso para todo o período, o que facilitou sobremaneira o volume de trabalho e análise (Figura 28).

Figura 28 - Mapa de classes de uso proposto para a modelagem



Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim, novas classes simplificadas foram consideradas como referência para a escolha dos parâmetros de entrada ao LISEM relacionados com a cobertura vegetal. As classes de uso compõem-se de: plantio convencional, plantio direto, floresta, pastagem e estradas.

Os dados de cobertura vegetal e de superfície do solo foram estipulados como sendo os valores médios anuais para as classes de uso definidas no mapa de entrada de uso adotado. Esta prática foi adotada em função do modelo ser pouco sensível a esses parâmetros e afetam pouco o comportamento dos hidrogramas nesta bacia. Estes valores foram compilados e avaliados segundo as referências apresentadas na Tabela 3. Tendo a bacia uma ocupação pelos cultivos regular sobre os talhões da bacia nos anos a partir de 2018, procuramos isolar este efeito das simulações adotando valores únicos para a série. Os parâmetros iniciais estimados para a cobertura vegetal e aplicados aos eventos são apresentados na Tabela 4.

Tabela 3 - Fontes de consulta de parâmetros de cobertura do solo

Parâmetro	Determinação	Fonte
Cobertura da célula	Estimado	Schlesner (2017)
Armazenamento liteira	Estimado	
Índice de área foliar	Medido	Barros et al. (2014); de Barros et al. (2021)
Altura de plantas	Estimado	Schlesner (2017)
Armazenamento superfície	Estimado	
Rugosidade do terreno	Medido	Barros et al. (2014); de Barros et al. (2021); Schlesner (2017)
N de Manning	Estimado	Engman e Asce (1986)
Fração coberta por pedras	Medido	de Barros et al. (2021); Schlesner (2017)
Coesão pelas raízes	Estimado	Moro (2011); Barros et al. (2021); Schlesner (2017)
Estabilidade de agregados	Medido	Moro (2011); Dalbianco (2013); Barros et al. (2021); Schlesner (2017)

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 4 - Parâmetros de calibração ligados à cobertura do solo

USO	CF (-)	LT (mm)	IAF (-)	CH (m)	SMAX (mm)	RR (cm)	MAN (-)	SF (-)	COH (kPa)	EA (gotas)
Cultivo convencional	1.00	0.00	3.00	0.60	1.00	0.10	0.10	0.10	0.00	100
Plantio direto	1.00	1.00	3.50	0.60	1.00	0.10	0.20	0.10	1.00	200
Florestas	1.00	2.00	3.00	6.20	1.00	0.10	0.30	0.10	2.00	200
Pastagens	1.00	1.00	4.00	0.40	1.00	0.10	0.10	0.10	3.00	200
Estradas	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	0.01	0.10	0.00	30

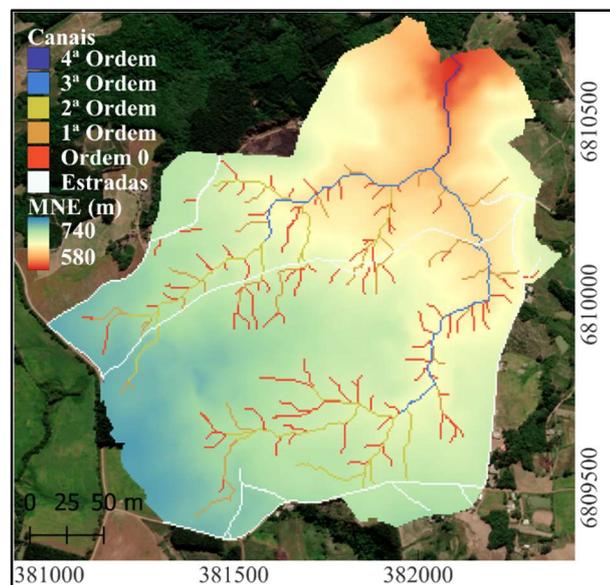
CF – Cobertura da célula; LT – Armazenamento na Liteira; Índice de área foliar; CH – Altura de plantas; SMAX – Armazenamento na superfície; RR – Rugosidade aleatória; MAN – n de Manning; SF – Fração coberta por pedras; COH – Coesão adicional pelas raízes; EA – Estabilidade de agregados. Fonte: Elaborado pelo autor.

5.3.3 Mapa de canais

O mapa de canais tradicional usados nas simulações do LISEM retrata a rede de drenagem principal, ou seja, a rede de canais permanentes (perene). O propósito neste trabalho foi expandir a rede de canais para contemplar os canais intermitentes e efêmeros. Os canais efêmeros são aqueles que ocorrem nas convergências do relevo e estão propensos a formação de escoamento superficial durante os eventos de chuva. Essas regiões da paisagem possuem características particulares que se saturam rapidamente formando grandes quantidades de escoamento. O mapeamento dessas áreas representa as áreas potenciais de formação do escoamento de modo mais amplo e talvez, mais eficiente.

O modelo LISEM permite, sobre qualquer célula, representar um canal com qualquer dimensão até o limite do tamanho da célula sobre o qual está locado. Um mapa preliminar da rede de drenagem foi gerado no PcRaster com a função *accuflux*, que usa o fluxo acumulado a partir do LDD sobre o modelo de terreno, formando a rede de canais. Na função foi aplicado um ponto de corte pela função *cellarea* de 3000 m² de área acumulada, que gerou uma rede de drenagem densa com 7 níveis de ramificação a partir do exutório. Este mapa de canais gerado com 7 níveis de ramificação foi testado na modelagem dos primeiros eventos e mostrou-se exageradamente denso, gerando maior escoamento do que o previsto para os eventos de menor magnitude (Figura 30).

Figura 29 - Mapa proposto de canais expandidos



Fonte: Elaborado pelo autor.

Foi então ajustado para um nível de ramificação inferior eliminando manualmente as células, até um 5º nível de ramificação de fluxo acumulado, com alguns ajustes manuais para representar certas particularidades do campo que formam superestimadas ou subestimadas em

relação ao resultado do algoritmo. A partir da configuração do mapa de entrada de canais ao modelo, foram estipulados os valores de parâmetros iniciais a serem atribuídos a cada classe. Os parâmetros ligados aos canais de drenagem estão na Tabela 5. Aqui, apenas valores de coesão foram ajustados.

Tabela 5 - Parâmetros de calibração relacionados aos canais

CANAIS	LC (m)	PD (m)	IPC (-)	MANC (-)	KSAT (mm.h ⁻¹)	Whi (m)	COC (kPa)	CM (m)	CMD (m)
4ª ORDEM	2.0	2.0	0	0.08	0	0	1000	0	0
3ª ORDEM	1.0	1.0	0	0.04	0	0	1000	0	0
2ª ORDEM	0.5	0;5	0	0.06	0	0	1000	0	0
1ª ORDEM	0.4	0.4	0	0.08	0	0	70	0	0
ORDEM 0	0.3	0.3	0	0.05	0	0	70	0	0
ESTRADAS	0.1	0.1	0	0.05	3	0	70	0	0

LC – Largura do canal; PD – Profundidade do canal; IPC – Inclinação das paredes do canal; MANC – *n* de Manning do canal; KSAT – Condutividade hidráulica do leito do canal; Whi – Altura do escoamento no canal; COC – Coesão das paredes do canal; CM – Material disponível para erosão; CMD – Profundidade de sedimentos depositados. Fonte: Elaborado pelo autor.

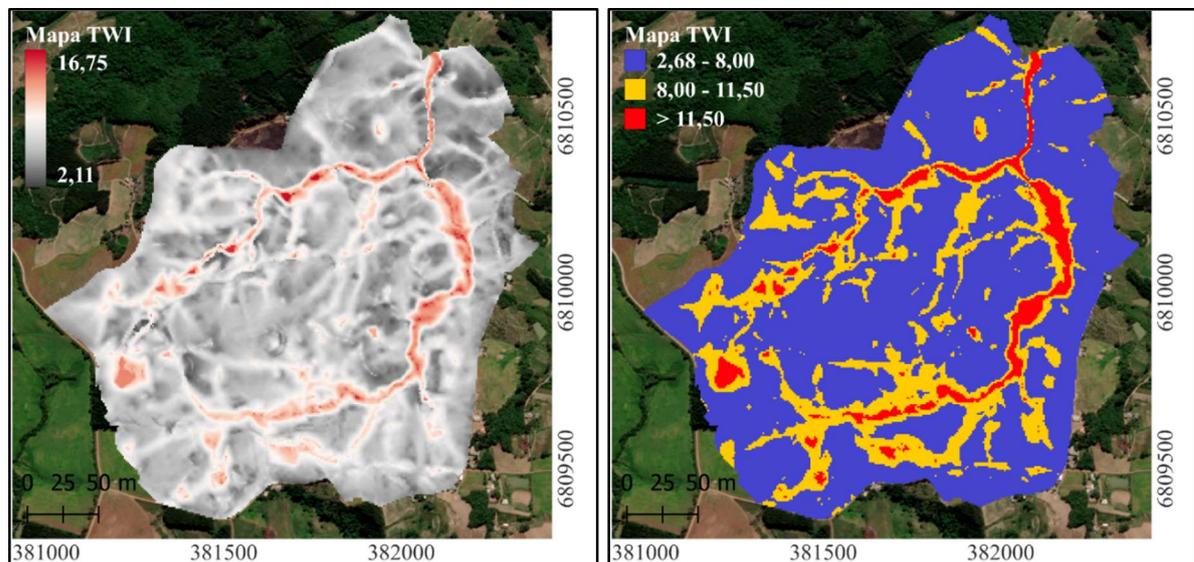
5.3.4 Mapa de atribuição de conteúdo de água e de condutividade hidráulica saturada

As propriedades do solo ligadas à infiltração, porosidade total, umidade inicial, umidade residual, tensão matricial, condutividade hidráulica saturada e profundidade do solo, apresentam variabilidade espacial ao longo do perfil e da encosta. Mesmo dentro das mesmas classes de solo normalmente mapeados, temos variabilidade nos valores das variáveis em função da ação do relevo, vegetação e usos agrícolas. Assumir que um mapa de solos e de usos sobre uma encosta apresentam a mesma parametrização ao longo de toda sua área, pode não ser verdadeiro. Para este trabalho, com objetivo de melhor representar o comportamento hidrológico, respeitando as características básicas dos solos de cada classe da bacia, sobreposmos o mapa de solos tradicional com o mapa de TWI da área, que representa o fluxo acumulado associado com a declividade do terreno. Este mapa foi obtido através do algoritmo de cálculo presente no pacote SAGA existente no software Qgis aplicado sobre o modelo numérico de elevação. E tem valores adimensionais entre 2,11 e 16,75.

A partir do mapa de TWI de escala contínua realizamos um novo mapa com classificação em categorias discretas, aplicando intervalos de categoria adequados para compor um novo mapa de categorias de comportamento hidrológico similar em termos de conteúdo de água e de condutividade hidráulica sobre a bacia. Classificamos três condições distintas de comportamento da umidade no solo. Na região mais baixa do terreno, com valores de TWI mais elevados, foi atribuída uma classe no mapa que representa as áreas úmidas (TWI $\geq 11,50$). Uma segunda região de corte dos valores de TWI originou uma classe

intermediária denominada de Vertentes, representando as áreas das encostas onde notamos a formação de escoamento superficial concentrado ($8,00 \leq \text{TWI} < 11,50$). Depois, temos a classe que representa predominantemente ocupação com os Argissolos, perfazendo a maior área sobre a qual estima-se condutividade hidráulica maior em suas encostas ($2,11 \leq \text{TWI} < 8,00$). Uma quarta classe de atuação da umidade é formada pelas encostas sobre condição de floresta natural ou cultivada sobre os Neossolos, do qual estima-se que a condutividade seja também elevada e que raramente possa ser contribuinte para o escoamento superficial. Tanto no mapa de usos como no de classes de comportamento hidrológico, também foram incluídas as feições das estradas, devido sua importante contribuição na produção de sedimentos sobre a bacia (MINELLA *et al.*, 2007; PAOLO *et al.*, 2015). A área ocupada pelos Cambissolos que tem menor percentual de participação territorial e que ocorre em pequenas manchas isoladas inseridas sobre outras classes de solos ou em áreas de transição entre os Argissolos e Neossolos, foram desconsideradas no novo mapa hidrológico. As classes finais para representar o comportamento hidrológico dos solos foram: Neossolo, Argissolo, Várzeas, Vertentes e Estradas (Figura 30).

Figura 30 - Mapa de TWI e mapa TWI classificado

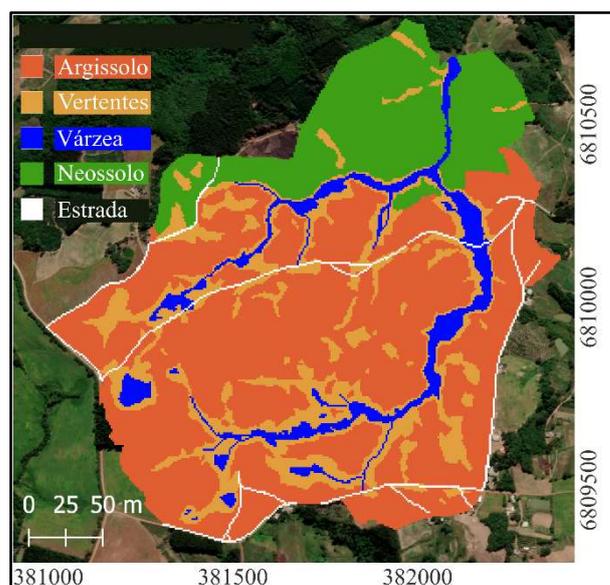


Fonte: Elaborado pelo autor.

A determinação das classes de solo a partir do TWI não é perfeita pela aplicação direta do algoritmo. Em alguns casos em que a extensão da classe do mapa de TWI subestimou ou superestimou a área de solo com as características observadas da classe na bacia, um ajuste manual foi realizado sobre as células, bem como eliminar locais com células isoladas, ou unir células em locais onde o comportamento hidrológico era de caráter contínuo

no terreno. Desta forma, através do corte em valores específicos do mapa de TWI, compomos áreas que deram origem a um novo mapa de atribuição de valores iniciais de conteúdo de água no solo e da condutividade hidráulica saturada para refletir o comportamento hidrológico na paisagem em função do relevo (Figura 31). Este tipo de configuração para calibração dos eventos no LISEM leva em consideração particularidades do relevo que são afetados fortemente pela oscilação do nível do lençol freático ou pela rápida saturação, processos esses poucos explorados até o momento nessa bacia.

Figura 31 - Mapa de classes de comportamento hidrológico proposto



Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir da proposição do mapa de comportamento hidrológico, os parâmetros ligados à caracterização dos processos de infiltração de água no solo foram determinados com referências a partir das fontes listadas na Tabela 6. Como estima-se que os valores de condutividade hidráulica saturada sejam pouco alterados durante o processo de calibração dos eventos, sendo que atuaremos majoritariamente sobre os valores de conteúdo de água no mapa de regiões de similaridade hidrológica para alcançar o ajuste ideal, ele passa a ser o principal responsável por este ajuste, razão pela qual os valores iniciais propostos foram aplicados para todos os eventos da base. Não foram usados métodos de predição do valor de conteúdo de água do solo para a condição inicial dos eventos, mas sim a simples busca do melhor valor do parâmetro por tentativa e erro, visto que não será avaliado o processo de validação do modelo frente a estas estimativas iniciais. A Tabela 7 apresenta os valores.

Conteúdo de água inicial e coesão foram os parâmetros alterados durante as calibrações, eventualmente a condutividade hidráulica quando necessário.

Tabela 6 - Origem das fontes de referência dos parâmetros de entrada de solo

Parâmetro	Determinação	Fonte
Porosidade total	Medido	de Barros et al. (2021); Schlesner (2017)
Umidade inicial	Estimado	Schlesner (2017)
Condutividade hidráulica saturada	Medido	Dalbiano (2013)
Coesão	Medido	Dalbiano (2013)
Profundidade	Estimado	Schlesner (2017)
D50	Medido	Moro (2011); Dalbiano (2013); Barros et al. (2021); Schlesner (2017)
D90	Medido	Schlesner (2017)
Tensão matricial	Estimado	Schlesner (2017)

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 7 - Parâmetros de calibração hidrológica iniciais propostos

SOLO	PT ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$)	UI ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$)	KSAT (mm.h^{-1})	CO (kPa)	PSI	PS (mm)	D50 (μm)	D90 (μm)
Argissolo	0.500	0.300	150	50	100	800	40	100
Talvegue	0.500	0.350	100	50	100	1500	40	100
Várzea	0.500	0.400	100	40	100	1000	40	100
Neossolo	0.500	0.300	100	40	100	400	40	100
Estradas	0.450	0.300	20	20	100	400	40	100

PT – Porosidade total; UI – Umidade inicial; KSAT – Condutividade hidráulica saturada; CO – Coesão do solo; PSI – Tensão matricial; OS – Profundidade do solo; D50 – Granulometria D50; D90 – Granulometria D90.

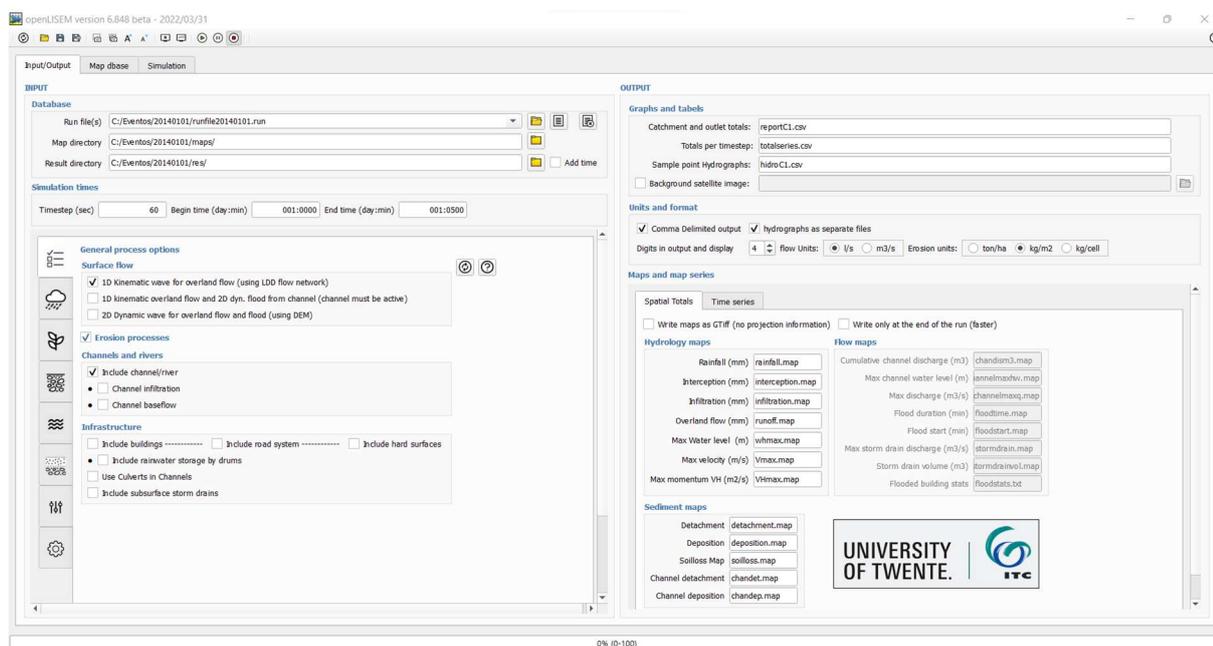
Fonte: Elaborado pelo autor.

5.4 PREPARAÇÃO DO MODELO E CALIBRAÇÃO DOS EVENTOS

5.4.1 Configurações iniciais do modelo

A partir das planilhas dos eventos com os dados hidrológicos organizou-se as pastas de arquivos de entrada para o modelo LISEM no computador. A preparação dos mapas de entrada do LISEM a partir dos mapas básicos (MNE, solo, uso, área), são processados por um script gerado com diversas informações sobre as características dos eventos em forma de tabelas, com auxílio do programa PCRaster e Nutshell. As principais configurações gerais nas abas na seção Input/Output (Figura 32) foram ajustadas conforme valores presentes na Tabela 8. Destacamos que os valores dos coeficientes para cálculo da erosividade foram obtidos com base nas equações propostas em função do período, conforme Ramon et al. (2017).

Figura 32 - Tela principal do modelo LISEM



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 8 - Configurações padrão do LISEM para a modelagem.

ABA	Variável	Situação
Opções gerais	1D kinematic wave	Habilitado
	Erosion processes	Habilitado
	Include channel/river	Habilitado
Rainfall and Evapotranspiration	Raingauge station file	Habilitado apontando a pasta
Interception	Canopy openness factor	1.0
	Canopy storage equation	Crops: $S = 0.935 + 0.498 * LAI - 0.00575 * LAI^2$
Infiltration	Green and Ampt model (1 layer)	Impermeable lower soil boundary
Splash detachment	Kinetik energy rainfall	$KE = 14.551 * intensity^{1.139}$
Flow detachment transport	Settling velocity	Stokes/Zanke (1977)
Overlad flow	Detachment efficiency	$Y = 1 / (0.89 + 0.56 * Cohesion)$
	Suspended sediment transport	Govers
Channel	Detachment efficiency	$Y = 0.79 \exp(-0.85 * Cohesion)$
	Suspended sediment transport	Govers
CALibration factors	Todas opções	Padrão 1.00

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.4.2 Rotina de calibração dos eventos.

Após a preparação dos dados dos eventos e configuração do modelo, os eventos foram simulados um a um, atribuindo os valores de parâmetros iniciais propostos. O foco principal deste trabalho foi realizar a calibração em resposta aos fatores controladores das áreas hidrologicamente sensíveis, acreditando-se que elas tenham alto impacto na calibração dos eventos. Espera-se que a representação das estruturas hidrologicamente formadoras do

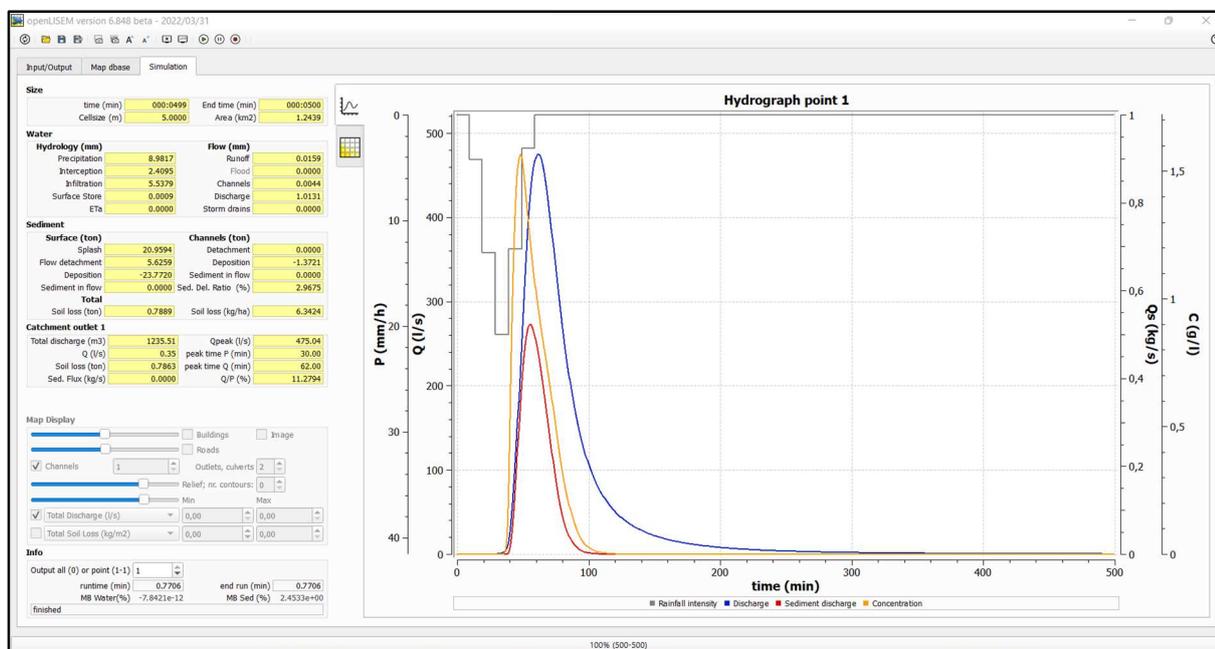
escoamento ligadas à superfície do solo e do relevo proporcionem melhor representação na calibração dos valores de umidade inicial do solo e condutividade hidráulica do solo que possuem maior impacto sobre os hidrogramas. A calibração inicialmente procurou ajustar os hidrogramas, buscando o melhor valor de NSE para variáveis de controle hidrológico, vazão, vazão de pico e descarga líquida total dos eventos, alterando primordialmente na umidade antecedente aos eventos no solo e, se necessário, alterar valores de condutividade hidráulica saturada. Estas alterações obedeceram a seguinte ordem de prioridade no ajuste: primeiramente sobre as Estradas, em seguida sobre a Várzea, depois sobre as Vertentes e por fim sobre os Argissolos e Neossolos (encostas). Ela partiu, portanto, dos locais mais baixos da paisagem, e mais próximos do canal principal até os locais mais elevados da paisagem. As estradas, por serem caracterizadas pela pouca profundidade e baixa permeabilidade, e por estarem diretamente conectadas com os canais e rede de drenagem, contribuem primeiro com a formação do escoamento. Em seguida, infere-se que a região da várzea produza o acúmulo inicial de umidade que pode chegar à saturação ou não.

A calibração da condutividade hidráulica foi quando possível, mantida nos valores nominais estipulados para as diversas estruturas e solos. Caso atingida a calibração adequada do evento atuando somente sobre a umidade do solo e não sobre a condutividade, mantendo seus valores principalmente sobre as encostas agrícolas, infere-se que foi seja possível demonstrar que o escoamento gerado no evento pode ser oriundo desta escala hierárquica de ocorrência de processos. Neste caso, a condutividade foi alterada seguindo também a ordem prioritária de estradas, Várzea, Vertentes e depois encostas. Naturalmente, existem processos de infiltração e formação do escoamento sobre as encostas de forma variável e distribuída sobre a bacia, ao qual não podemos determinar com exatidão qual seja a participação de cada uma destas regiões. Apenas, hipoteticamente, podemos inferir se é possível que tais regiões de fragilidade hidrológica consideradas, vertentes, estradas e várzea, podem gerar as condições para a formação do hidrograma.

Após a calibração hidrológica, voltamos a atenção para a calibração de sedimentos. Da mesma forma se procurou o melhor ajuste do sedimentogramas simulado com o observado, em termos de CSS e descarga sólida total. A ordem de prioridade do ajuste da coesão do solo, variável de maior impacto na calibração de sedimentos, obedeceu a mesma hierarquia utilizada na calibração dos hidrogramas (Estradas, Várzea, Vertentes, Argissolos, Neossolos). Barros et al. (2014) identificou que os fatores de coesão e estabilidade de agregados apresentaram dificuldade para representar os processos de desagregação.

Todos os demais parâmetros de calibração, ligados ao solo ou à cobertura vegetal foram mantidos fixos nas simulações para todo conjunto de eventos. Rodadas consecutivas por tentativa e erro foram realizadas até concluir a calibração do evento com sucesso, ou até atingir patamares de parâmetros fora do contexto de significado físico. Isto ocorreu de forma eventual na calibração dos sedimentos, onde houve tentativas de compensar o exaurimento ou a falta de oferta de sedimentos intra e entre eventos pela alteração de valores de coesão. Nestes casos, a partir de certos valores a calibração foi encerrada, mesmo com metas de valores de eficiência não atingidos. Ao finalizar a simulação, o modelo apresenta os hidrogramas e sedimentogramas da simulação do evento, tanto em tela como na forma de tabelas em arquivos de saída. Informações sobre os dados temporizados sobre a vazão instantânea, concentração de sedimentos em suspensão, descarga líquida total, produção de sedimentos total, altura da lâmina de escoamento, pode ser fornecido para pontos específicos selecionados e principalmente no exutório. Uma tela de saída da modelagem de evento é mostrada na Figura 33. O modelo registra arquivos de saída no formato de valores separados por vírgulas (CSV) para: totais da bacia e exutório (reportC1.csv), totais das séries contínuas do evento por *timestep* (totalseries.csv) e hidrograma e sedimentogramas dos pontos escolhidos (hidroC1.csv).

Figura 33 - Tela de saída de simulação de evento.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Junto aos hidrogramas que fornecem dados de escoamento superficial e sedimentogramas, com a CSS no fluxo, também temos o total de sedimentos exportados

representando a produção de sedimentos na bacia. Estes arquivos são manipulados no software R para compor o banco de dados dos eventos e registrar na forma de gráficos e tabelas, os resultados das simulações. Os resultados das variáveis erosivas, como infiltração, vazão superficial, velocidade do fluxo, perda de sedimentos, deposição de sedimentos, concentração de sedimentos em suspensão etc. em cada célula são também armazenados em arquivos raster com a situação final da distribuição geográfica da erosão sobre a bacia.

5.4.3 Avaliação da eficiência geral do modelo

Para comparar o desempenho da simulação ao final de cada rodada, é realizada a comparação dos dados do evento observado com os dados simulados pelo modelo. Um script em R usando o pacote *ggof*, busca os arquivos de resultados na pasta res do evento e processando os dados os compara com os dados da planilha de entrada do evento em questão. É feita uma análise comparativa dos hidrogramas e sedimentogramas observados e simulados, com cálculo de diversos indicadores de desempenho da modelagem, como o NSE (NASH; SUTCLIFFE, 1970) e Pbias.

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

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.

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

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

O coeficiente de eficiência NSE avalia a eficiência da calibração do modelo quanto ao formato do hidrogramas e do sedimentogramas, que pode variar de $-\infty$ a 1, sendo que segundo Moriasi et al. (2007), com o valor 1 temos um perfeito ajuste entre os dados calculados e observados, acima de 0,75 são considerados muito bons, entre 0,65 e 0,75 bons, e valores abaixo de zero são considerados ruins. A percentagem de Pbias avalia a superestimativa ou subestimativa dos dados simulados das seguintes variáveis: volume escoado superficialmente, vazão de pico, tempo de ocorrência do pico da vazão, coeficiente de escoamento superficial, e produção de sedimentos e CSS máxima. Segundo Moriasi (2007), valores próximos a zero, tem melhor estimativa dos dados, coeficientes $< \pm 10\%$ são

considerados muito bons, $\pm 10\% \leq P_{bias} < \pm 15\%$ bons, $\pm 15\% \leq P_{bias} < \pm 25\%$ satisfatório, e $\geq \pm 25$ insatisfatório. Para valores da calibração da produção de sedimentos temos que os coeficientes $< \pm 15\%$ são muito bons, $\pm 15\% \leq P_{bias} < \pm 30\%$ bons, $\pm 30\% \leq P_{bias} < \pm 55\%$ satisfatório, e $\geq \pm 55$ insatisfatório.

5.4.4 Avaliação da eficiência predição espacial da erosão do modelo

A predição espacial da erosão simulada pelo modelo pode ser verificada através dos mapas de saída do LISEM arquivados na pasta *res*, sendo os principais o mapa de desagregação (*detachment.map*), mapa de deposição (*deposition.map*), perda de solo (*soilloss.map*), precipitação (*rainfall.map*), interceptação (*interception.map*), infiltração no solo (*infiltration.map*), desagregação nos canais (*chandet.map*), deposição nos canais (*chandep.map*) entre outros. A partir dos mapas de saída que totalizam os processos em cada célula, é possível realizar estatísticas zonais de acordo com critérios territoriais como o mapa de solos ou de uso. Com o uso do pacote raster em um script do software R, foi programado uma rotina de captura dos valores estatísticos dos mapas de saída dos eventos para determinar sobre cada tipo de solo, os valores de infiltração de água no solo, desagregação e deposição de sedimentos sobre a bacia simulados pelo LISEM. Os resultados foram tabelados e gerado um gráfico do tipo *boxplot*, para comparativo do comportamento dos processos segundo cada classe de uso e solo.

Como não foram realizadas mensurações a campo de nenhuma variável relacionada com estas perdas para validação espacial do modelo, podemos inferir apenas sobre o comportamento da modelagem em relação às observações de campo sobre o fenômeno erosivo e buscar correlações empíricas. Para tanto, as visitas na bacia por ocasião da coleta dos eventos e após eventos de expressiva magnitude, trouxeram informações das evidências dos processos erosivos, que foram registrados fotograficamente e por anotações em mapas manualmente.

6 RESULTADOS

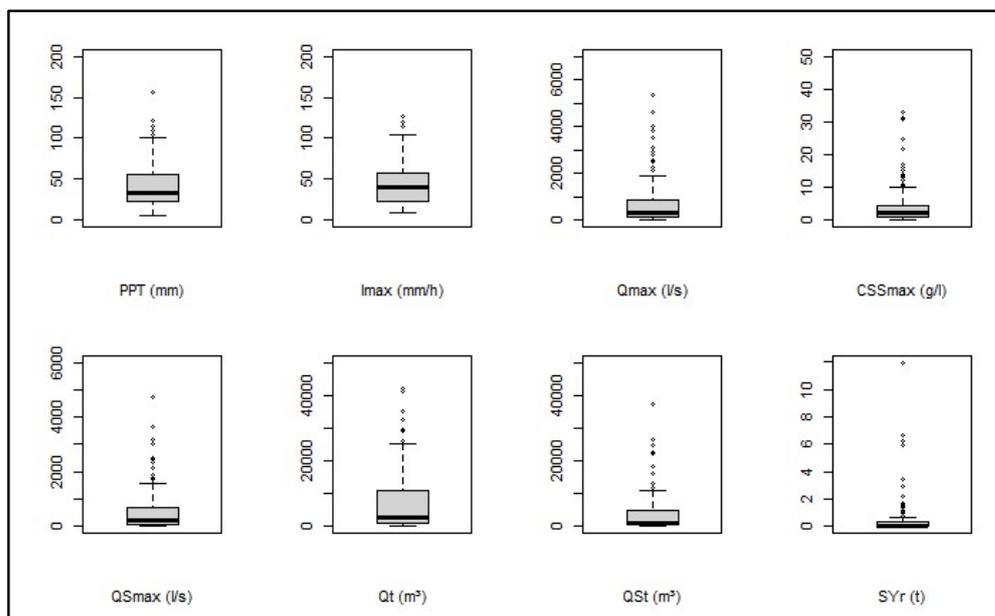
6.1 CARACTERIZAÇÃO DOS EVENTOS MONITORADOS

A partir do conjunto de dados obtidos da base de monitoramento contínuo, foi possível selecionar para a modelagem 150 eventos de precipitação-vazão ocorridos entre 2014 e 2022, apresentando variabilidade de condições entre eventos de baixo e alto escoamento, curta e longa duração, intensidades máximas de precipitação altas e baixas, diferentes condições de conteúdo de água no solo e ocorridos nas diversas épocas do ano. As variáveis analisadas compreendem informações sobre precipitação, intensidade máxima da precipitação em 30 minutos, tempo de pico da precipitação, vazão de pico; pico de escoamento superficial, tempo de pico da vazão, descarga líquida total, descarga líquida superficial total, descarga líquida subsuperficial total, concentração de sedimentos em suspensão superficial máxima, descarga de sedimentos total e tempo de pico da concentração de sedimentos em suspensão máxima. A lista completa dos eventos selecionados para a modelagem, com os dados organizados e depurados, está na Tabela 9.

6.2 ANÁLISES ESTATÍSTICAS DOS EVENTOS

O boxplot da Figura 34 apresenta um resumo da variabilidade destas variáveis entre os eventos da base.

Figura 34 - Resumo da amplitude das principais variáveis dos eventos monitorados



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 9 - Características dos eventos observados pelo monitoramento

Evento	PPT (mm)	I30 (mm.h ⁻¹)	PT_PPT (min)	QT_max (L.s ⁻¹)	Qs_max (L.s ⁻¹)	PT_Qs (min)	QT (m ³)	QTs (m ³)	QTss (m ³)	CSSs (g.L ⁻¹)	SYs (t)	PT_CSSs (min)
20140101	8.98	20.78	20	527	480	60	1356	759	597	1.62	0.78	60
20140408	37.95	127.18	10	1433	1214	20	7736	3770	3966	11.01	14.55	30
20140521	53.36	19.75	300	1022	697	310	11619	5268	6351	0.44	1.52	320
20140605	67.80	50.43	80	3543	2342	440	64554	22482	42071	5.28	9.51	200
20141212	32.10	57.78	10	869	767	50	3890	1733	2157	2.83	2.30	40
20150224	25.95	53.74	30	744	678	60	2438	1565	874	2.90	1.55	50
20150420	59.53	55.88	120	797	639	190	15182	6661	8521	1.79	2.56	150
20150611	57.82	30.12	330	1405	1045	360	12177	6304	5873	1.12	2.61	350
20150720	54.99	24.88	310	1868	1336	330	14898	7736	7162	0.77	2.67	330
20150919	96.57	61.80	980	2574	1783	1000	42258	18463	23795	1.19	2.59	1050
20151021	23.80	41.00	30	658	502	80	6527	2463	4063	1.21	1.18	80
20151022	15.79	46.65	20	1123	849	40	12893	5067	7827	1.98	2.86	30
20151222	32.46	76.87	50	1407	1215	80	8211	3946	4265	2.72	3.16	60
20151228	18.79	56.36	20	543	460	50	2449	1128	1321	0.32	0.10	100
20160320	50.08	94.27	70	1230	1049	100	5496	3096	2399	3.63	4.56	90
20160325	100.98	24.63	130	1332	793	450	41148	16286	24863	0.20	1.10	330
20160423	32.10	31.49	130	577	441	230	4131	2264	1867	0.63	0.79	220
20160424	57.91	43.35	150	993	808	180	19130	8612	10518	0.94	1.33	170
20161017	64.06	81.41	60	2799	2347	80	17351	10210	7142	28.91	66.74	60
20161018	24.34	22.29	70	1863	1389	100	11449	5301	6148	1.28	2.94	80
20180121	41.30	77.78	220	149	123	250	1027	385	642	8.91	1.17	260
20180122	40.40	70.05	230	391	341	260	3046	1341	1706	12.22	5.54	260
20180123	52.20	69.97	170	441	294	210	7035	3002	4033	8.47	3.80	190
20180209	33.80	45.44	110	78	63	160	556	226	329	0.90	0.09	170
20180220	27.74	42.65	80	150	130	110	950	406	543	1.15	0.22	110
20180226	26.59	95.97	100	478	438	120	1605	752	837	6.31	2.96	120
20180315	38.07	43.42	120	236	208	140	1431	601	828	2.72	0.78	140
20180318	29.04	67.53	100	55	46	110	326	155	171	0.36	0.03	130
20180414	50.52	26.92	180	138	112	210	2651	1073	1578	0.72	0.15	200
20180518	41.65	23.36	20	79	42	650	2610	1004	1605	0.28	0.05	140
20180519	28.04	14.14	200	114	63	280	3976	1436	2539	0.37	0.11	230
20180611	19.60	42.64	190	77	56	220	1005	433	573	1.57	0.19	230
20180624	13.42	15.85	410	71	49	490	1463	554	909	0.19	0.04	460
20180629	14.80	14.43	110	93	67	230	991	422	569	0.34	0.07	190
20180720	22.09	9.01	90	48	35	260	871	323	548	0.14	0.02	220
20180724	103.49	24.59	1750	409	237	1290	32635	11841	20793	0.22	0.42	580
20180820	46.59	11.28	260	119	62	370	9193	3341	5852	0.60	0.22	350
20180824	22.44	66.60	40	1467	1188	60	7099	2965	4097	17.35	34.38	40
20180831	64.45	15.13	770	677	524	2010	24079	8887	15192	12.15	13.95	1990
20180915	40.05	82.05	100	297	229	150	3248	1577	1670	1.89	1.40	120
20180924	32.37	27.99	120	95	61	210	1857	816	1041	0.30	0.09	200
20181001	29.81	20.97	140	791	578	330	22123	8208	13915	3.78	2.74	150
20181012	56.11	83.14	240	2126	1760	280	11772	4896	6758	6.45	16.55	270
20181018	21.20	28.22	220	158	122	240	2862	1104	1758	1.61	0.33	240
20181031	56.14	103.59	140	486	392	160	10875	4757	6117	2.95	3.64	160
20181103	51.60	101.01	110	2231	1885	130	13565	5663	7901	22.72	59.72	120
20181123	91.00	39.76	160	740	542	1140	12501	5386	7115	4.83	2.20	200
20181130	65.20	69.12	110	3136	2431	260	14790	8413	6375	7.59	16.87	130
20181219	19.70	25.12	150	118	93	170	1073	406	667	5.75	0.71	170
20181221	36.70	52.85	20	992	827	60	7290	3004	4246	2.02	1.68	40
20190104	41.00	72.00	200	102	75	230	982	404	578	3.47	0.49	240
20190106	32.00	90.00	50	417	354	70	1599	815	783	8.62	3.60	70
20190107	13.00	36.00	70	91	63	110	1077	330	747	0.66	0.05	120
20190111	32.00	90.00	30	686	621	50	2481	1113	1369	14.72	7.31	50
20190114	31.10	48.00	140	228	187	180	1100	529	571	2.21	0.70	180
20190117	18.70	42.00	80	138	106	100	2075	765	1310	0.68	0.10	100
20190224	44.40	39.60	280	47	27	320	3299	1110	2190	0.13	0.02	500
20190308	90.20	90.00	750	324	270	770	6146	2341	3805	9.48	2.78	770
20190427	19.60	28.80	80	209	184	100	1016	425	591	3.83	0.59	100
20190524	31.80	14.40	140	48	32	330	753	298	455	0.37	0.05	320
20190527	41.80	45.60	60	257	210	80	1659	704	956	14.42	3.34	80
20190530	14.40	16.80	110	69	46	180	505	164	340	0.35	0.03	150
20190628	34.40	43.20	90	288	224	130	1651	815	836	2.98	1.33	110
20190726	7.60	13.20	50	38	26	120	446	168	278	0.16	0.01	110
20190730	14.20	19.20	40	45	31	110	539	191	348	0.10	0.01	120
20190808	16.00	24.00	110	95	73	150	730	314	416	1.13	0.16	140
20190901	61.20	27.60	200	154	115	430	1142	525	617	0.55	0.12	290
20191002	22.00	21.60	120	65	45	310	1257	469	788	0.40	0.05	320
20191005	37.60	55.20	70	399	342	90	1259	727	532	9.55	3.96	100
20191013	45.60	114.00	40	212	187	100	1011	432	579	5.21	1.07	100
20191016	60.80	55.20	140	302	272	150	1628	910	718	3.70	1.07	150
20191017	28.40	56.40	40	187	150	150	835	371	465	2.28	0.34	60

Evento	PPT (mm)	I30 (mm.h ⁻¹)	PT_PPT (min)	QT_max (L.s ⁻¹)	Qs_max (L.s ⁻¹)	PT_Qs (min)	QT (m ³)	QTs (m ³)	QTss (m ³)	CSSs (g.L ⁻¹)	SYs (t)	PT_CSSs (min)
20191021	20.20	16.80	80	54	41	180	663	229	434	0.31	0.02	180
20191027	45.60	26.40	150	116	91	270	917	385	532	0.81	0.18	260
20191030	36.40	48.00	150	159	136	180	1309	539	770	2.36	0.36	170
20191104	122.34	80.52	900	668	492	980	6931	3026	3904	3.65	2.10	920
20191107	60.40	42.24	80	246	216	110	2628	1090	1538	1.64	0.60	110
20200110	31.60	79.20	80	639	592	130	1653	893	760	6.74	3.50	130
20200129	35.80	68.40	30	115	101	70	586	235	351	1.58	0.21	80
20200204	17.20	25.20	60	20	16	180	212	89	123	0.25	0.01	230
20200225	67.20	94.80	390	750	653	410	1622	1064	558	6.62	3.74	400
20200406	31.40	26.40	120	29	16	340	644	229	415	0.04	0.01	340
20200413	4.90	12.60	20	24	17	90	359	121	238	0.05	0.00	90
20200522	99.00	34.32	820	109	76	850	2978	1153	1825	0.88	0.22	870
20200605	45.76	22.44	600	83	62	650	1405	592	813	0.87	0.15	650
20200613	25.30	50.40	50	102	85	70	1060	384	676	1.52	0.17	90
20200629	91.40	48.00	550	255	224	580	4914	2090	2824	2.52	1.31	560
20200630	48.00	60.00	60	1434	1160	80	17780	6653	11127	8.29	15.79	80
20200705	41.80	28.20	500	225	149	510	5279	2009	3270	1.60	0.71	520
20200707	156.80	36.00	970	4016	3004	970	69301	26667	42634	23.11	62.41	970
20200711	74.60	37.80	750	1842	1438	980	15362	6954	8408	4.60	11.21	980
20200716	62.00	36.00	290	323	257	310	10746	4142	6604	2.57	1.08	320
20200728	33.00	27.60	100	91	56	540	2539	933	1606	1.80	0.18	130
20200811	64.10	27.60	350	119	69	370	2783	925	1858	0.52	0.08	370
20200906	24.80	18.60	290	60	39	320	1222	386	836	0.75	0.06	330
20200927	19.00	25.20	90	143	96	120	1335	413	922	3.59	0.42	120
20201128	17.40	32.40	120	101	78	160	865	333	532	3.84	0.54	150
20201202	83.20	72.00	370	1433	1269	390	8003	3507	4496	12.02	16.61	390
20201213	21.80	32.40	50	49	32	250	565	201	364	0.20	0.02	270
20201217	43.40	48.00	90	348	298	100	1206	589	617	3.98	1.32	100
20201219	11.40	13.20	140	55	30	190	532	162	370	0.20	0.01	180
20210105	11.40	13.20	140	33	17	200	650	174	476	0.06	0.00	200
20210124	14.70	21.60	160	37	30	210	249	90	159	0.40	0.01	200
20210126	40.70	48.00	390	445	368	420	2222	1126	1096	2.24	1.12	410
20210128	31.40	31.20	140	310	214	160	3173	1077	2097	1.46	0.47	160
20210129	21.50	24.60	730	180	110	760	8644	2958	5686	0.78	0.26	90
20210130	31.40	68.40	30	857	757	50	5422	2185	3237	1.44	1.28	60
20210131	19.10	31.80	90	264	204	120	2800	1104	1697	0.62	0.18	110
20210204	32.50	40.80	100	215	171	120	3274	1248	2026	0.43	0.12	130
20210223	23.70	22.80	380	78	64	420	584	225	360	0.20	0.03	380
20210304	12.20	14.40	210	25	11	230	423	151	272	0.04	0.01	250
20210326	10.50	16.80	140	84	68	170	619	302	317	0.72	0.13	180
20210521	78.80	34.80	430	686	457	500	16117	6305	9812	0.71	1.51	530
20210528	114.10	43.20	290	3519	2531	450	55660	22356	33305	3.52	21.89	360
20210605	26.10	49.20	80	192	150	120	1128	440	687	1.84	0.32	120
20210610	26.20	38.40	200	268	181	230	4484	1866	2618	0.41	0.33	230
20210624	23.90	10.80	70	97	59	240	1453	563	890	0.45	0.11	240
20210626	41.00	79.20	140	5371	4746	160	22083	11057	11026	5.30	34.40	160
20210627	61.00	43.20	170	3818	3206	190	28967	10399	18568	1.26	5.19	190
20210824	49.20	25.20	1010	420	260	1050	12455	5047	7407	0.48	0.69	140
20210907	76.40	62.40	390	1218	993	420	8533	3887	4646	6.39	6.47	400
20210913	31.00	40.80	260	238	199	280	1464	593	870	2.00	0.37	280
20210930	29.70	56.40	120	308	252	150	2354	964	1390	0.76	0.42	150
20211003	22.00	96.00	70	998	871	90	3767	1872	1895	2.63	3.19	90
20211006	17.20	52.80	60	258	233	80	706	384	321	2.84	0.62	80
20211015	26.40	15.00	160	145	107	200	2094	803	1291	0.53	0.19	180
20211214	33.70	61.80	120	230	189	160	1272	503	770	0.95	0.27	150
20220118	36.22	43.20	140	281	247	170	1440	607	833	0.95	0.40	180
20220123	50.60	68.40	40	442	393	70	2601	1184	1417	0.99	0.81	90
20220126	42.50	120.00	70	1056	925	100	3713	2267	1446	2.23	3.15	100
20220222	18.58	16.56	110	63	50	200	853	310	542	0.12	0.02	220
20220225	31.18	23.76	210	146	118	230	1515	576	939	0.37	0.12	230
20220311	28.16	23.76	110	95	70	180	861	413	449	0.22	0.05	170
20220323	109.78	58.08	610	4603	3664	630	29395	13022	16373	15.44	119.46	620
20220403	25.52	13.20	240	93	53	270	1722	686	1036	0.17	0.06	270
20220404	41.58	18.48	90	553	353	240	15417	5718	9699	1.49	3.05	250
20220426	89.10	58.08	70	1531	1161	630	25868	9920	15948	8.67	29.50	590
20220428	38.06	22.44	90	969	678	350	9845	4375	5470	3.54	5.62	350
20220430	60.94	21.12	90	689	339	670	34988	13272	21716	1.73	2.64	330
20220502	95.04	33.00	70	2916	1728	890	104378	37381	66997	3.84	14.22	910
20220504	14.96	10.56	180	573	280	220	26157	8425	17732	0.13	0.34	230
20220514	22.22	18.48	100	209	122	230	4954	1756	3198	0.72	0.22	120
20220528	74.14	56.76	870	2150	1546	900	68027	24885	43142	2.43	6.50	890
20220606	43.78	27.72	200	2238	1590	230	25354	10797	14557	2.50	7.55	230
20220617	64.24	56.76	130	439	327	150	7062	3073	3989	1.89	1.53	140
20220621	57.20	11.88	330	980	635	930	24055	10170	13886	0.56	1.84	930

Evento	PPT (mm)	I30 (mm.h ⁻¹)	PT_PPT (min)	QT_max (L.s ⁻¹)	Qs_max (L.s ⁻¹)	PT_Qs (min)	QT (m ³)	QTs (m ³)	QTss (m ³)	CSSs (g.L ⁻¹)	SYs (t)	PT_CSSs (min)
20220622	10.56	23.76	690	399	192	710	16364	4922	11442	0.22	0.74	320
20220712	27.72	40.92	110	169	111	160	2232	932	1300	0.63	0.19	160
20220714	29.70	15.84	400	425	298	450	9153	3507	5646	0.49	0.54	430
20220716	39.38	50.16	750	2479	2118	780	15087	7074	8013	3.67	10.11	770

PPT: Precipitação; I30: intensidade máxima chuva em 30 min; PT_PPT: Tempo de pico da precipitação; QTmax: vazão de pico; Qs_max: Escoamento superficial; PT_Qs: tempo de pico da vazão; QT: descarga líquida total; QTs: descarga líquida superficial total; QTss: descarga líquida subsuperficial total; CSSs: concentração de sedimentos em suspensão superficial; SYs: Produção de sedimentos superficial total; PT_CSSs: tempo de pico da CSS. Fonte: Elaborado pelo autor;

A Análise de Componentes Principais (ACP) aplicada sobre os dados dos eventos são apresentados na Tabela 10. A principal componente identificada é composta por vazão de pico, que associada com o escoamento superficial de pico explicam diretamente 58,2% da variabilidade dos eventos. A segunda componente é formada por intensidade máxima da chuva, que em conjunto com a descarga total explicam 16,7% da variabilidade restante dos eventos.

Tabela 10 - Análise dos componentes principais das variáveis dos eventos.

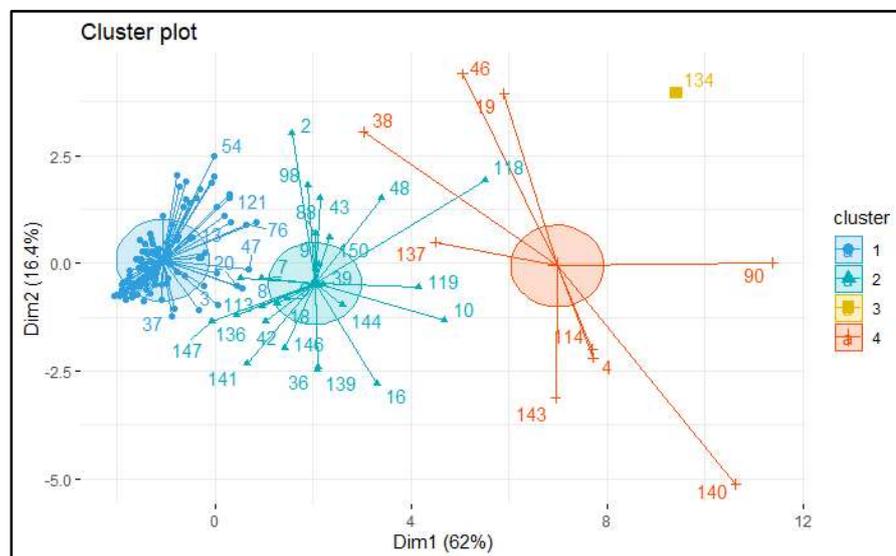
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7
PPT	0.35192	-0.16260	-0.59110	-0.52340	0.42838	-0.20694	-0.00191
I30	0.20470	<u>0.71581</u>	-0.48973	0.24987	-0.08911	0.36794	0.01025
QT_max	<u>0.45937</u>	-0.13139	0.06648	0.42322	0.08934	-0.19772	0.73559
CSSs	0.35046	0.44449	0.31161	-0.42761	-0.43376	-0.45981	0.00748
SYs	0.40615	0.04682	0.50308	-0.27149	0.34659	0.62113	-0.00968
Qs_max	<u>0.45164</u>	-0.05712	0.09495	0.47538	0.18410	-0.27331	-0.67018
QT	0.36255	<u>-0.49079</u>	-0.21705	-0.04396	-0.67704	0.33278	-0.09747
Standard deviations	2.01758	1.08066	0.83168	0.77267	0.53028	0.43517	0.04692

PC1 a PC7: Componentes principais 1 a 7; PPT: precipitação total (mm); I30: intensidade máxima da precipitação (mm.h⁻¹); QT_max: vazão de pico (L.s⁻¹); CSSs: concentração de sedimentos suspensão máxima (g.L⁻¹); produção de sedimentos total SYs: produção de sedimentos total (ton); Qs_max: escoamento superficial máximo (L.s⁻¹); QT: descarga líquida total (m³). Fonte: Elaborado pelo autor.

A análise de cluster (Figura 35) indica a presença de quatro principais grupos de eventos, segundo suas duas principais variáveis que respondem pelo poder explicativo dos eventos. Esta análise agrupa eventos com similaridades entre si dentro do mesmo grupo, e a diferenciação que existe entre os grupos, formando a menor soma dos quadrados dos desvios. Considerando as principais variáveis hidrológicas e de sedimentos apuradas dos eventos, foi possível agrupá-los em 4 categorias distintas, cujas médias das variáveis estão descritas na Tabela 11. Os eventos se diferenciam pela média de descarga líquida por evento e pela média de descarga sólida por evento. A partir da classificação obtida, dos 150 eventos monitorados tivemos 124 deles com baixo volume de precipitação (média de 35,96 mm) e baixa intensidade máxima (média de 42.70 mm.h⁻¹) que foram responsáveis pela perda média de

2,80 toneladas de sedimentos por evento, com vazões de pico médias de escoamento total de 373,45 L.s⁻¹ e estimado superficial de 295,94 L.s⁻¹.

Figura 35 - Gráfico de agrupamento por clusters dos dados dos eventos



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 11 - Classificação por cluster dos eventos monitorados, com valores médios das variáveis por grupo

Cluster	NE	PPT (mm)	Imax (mm.h ⁻¹)	Qmax (L.s ⁻¹)	CSSmax (g.L ⁻¹)	SYt (Ton)	Runmax (L.s ⁻¹)	Qt (m ³)	QSt (m ³)
1	124	35.96	42.70	373.45	2.987	2,804	295.940	3837017	1629162
2	19	63.86	41.65	2088.46	4.958	22,723	1580.868	30888356	12185082
3	1	109.78	58.08	4602.71	21.651	301,492	3663.599	29395254	13022127
4	6	79.83	62.68	2493.31	23.178	94,231	1885.466	39593671	15467553

NE – número de eventos; PPT – Precipitação; Imax – Intensidade máxima da chuva; Qmax – Vazão máxima; CSSmax – Concentração de sedimentos em suspensão máxima; SYt – Produção de sedimentos total; Runmax – Pico de escoamento superficial máximo; Qt – Descarga líquida total; Qst – Escoamento superficial total; Qsst – Escoamento superficial total. Fonte: Elaborado pelo autor.

O grupo dois possui 19 eventos muito semelhantes ao grupo 1 em termos de intensidade máxima de precipitação (42,55 mm), mas com volume de precipitação ligeiramente maior (média de 63,86 mm), e CSS máxima média de 4,95 g/l com perda média de 22,72 toneladas de sedimentos. Tem uma média menor de descarga líquida associada com uma alta descarga sólida. Este grupo produziu descarga de sedimentos total cerca de oito vezes maior que o grupo 1 em função da CSS média ter sido o dobro e associado com volume total escoado cerca de sete vezes maior que a existente no cluster 1. O grupo três é composto de apenas um evento específico, que tem precipitação de 109,78 mm com intensidade máxima de 58,08 mm.h⁻¹, entretanto com alto pico de CSS máxima (21,65 g.L⁻¹) resultando somente

neste evento, em perda de 29.395,25 m³ de água e 301,49 toneladas de sedimentos. Por fim, no grupo quatro, 6 eventos com vazão média de pico 2.493,31 L.s⁻¹ e CSS média de 23,17 g.L⁻¹ foram responsáveis pela perda de 94,23 toneladas de sedimentos. Dentre os 150 eventos, os grupos 1 e 2, de pequeno volume de escoamento foram responsáveis por 26,6% e 39,2% das perdas de água e por 14,7% e 25,8% das perdas de sedimentos computados. Já o grupo 4 foi responsável pela perda total de 32,0% da água e e de 41,2% dos sedimentos computados. Apresenta alta média de descarga líquida por evento associada com menor média de descarga sólida. Finalmente, apenas um dos eventos, em 23/03/2022, foi responsável por 2,2% das perdas de água, mas de 18,3% de todos os sedimentos perdidos entre os 150 monitorados. Na Tabela 12 temos a estatística de descarga líquida e sólida dos grupos de eventos.

Tabela 12 - Descarga líquida e sólida dos grupos de eventos observados.

Evento	NE	DLT (m ³)	DLM (m ³)	DST (ton)	DSM (ton)
Grupo 1	115	353097	3.070	242	2,1
Grupo 2	25	521330	20.853	425	17,0
Grupo 3	1	29395	29.395	301	301,5
Grupo 4	9	425803	47.311	678	6,8

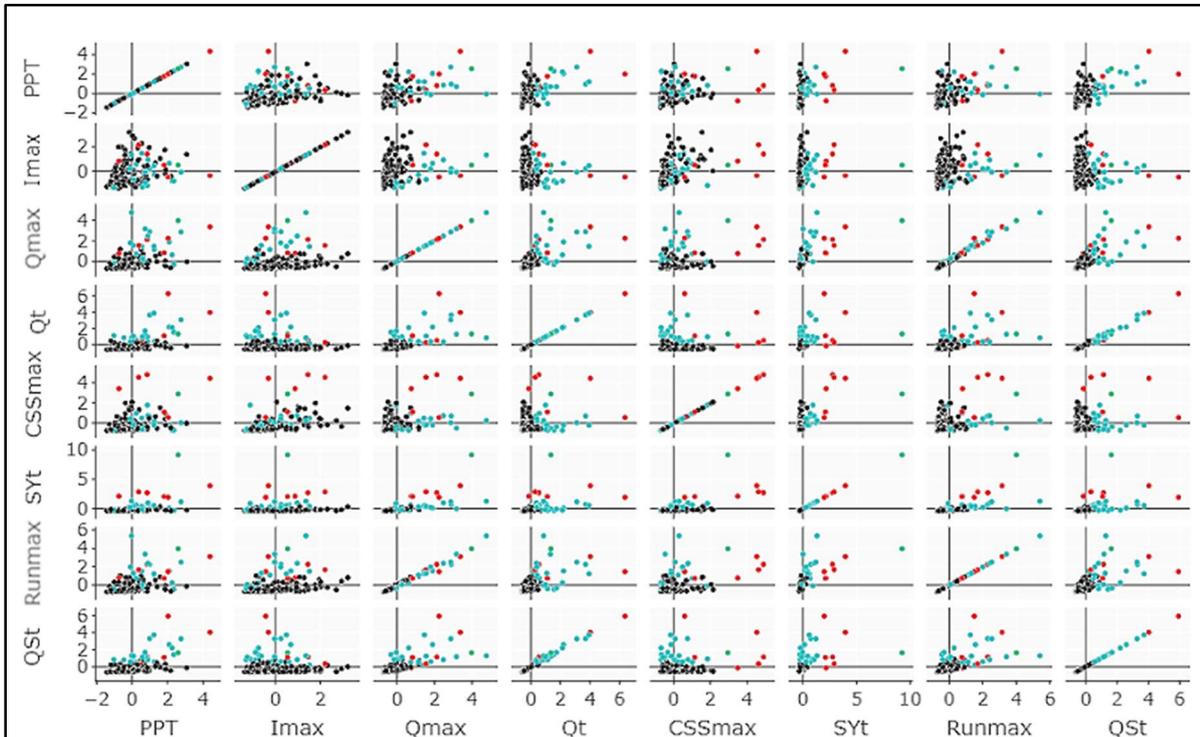
NE: Número de eventos; DLT: descarga líquida total; DLM: descarga líquida média; DST: descarga sólida total; DSM: descarga sólida média. Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 36 apresenta um *scatterplot* relacionando os dados padronizados de volume e intensidade de precipitação com as variáveis vazão de pico, vazão total, CCS máxima, produção de sedimentos total, escoamento superficial máximo e e escoamento subsuperficial total. Para os eventos do grupo 1 (pontos pretos no gráfico) e 2 (pontos ciano no gráfico) tivemos menor correlação entre precipitação e vazão total, vazão superficial e subsuperficial, pela baixa inclinação da reta de correlação. Nos eventos do grupo 3 (pontos verdes no gráfico) e grupo 4 (pontos vermelhos no gráfico) surgem correlações positivas mais evidentes, como por exemplo, intensidade máxima e vazão máxima, e intensidade máxima com escoamento superficial gerado.

Em relação aos sedimentos, temos pouca correlação entre precipitação e produção de sedimentos total, mas melhor entre precipitação e CSS máxima e mesmo entre intensidade máxima e CSS máxima. Finalmente, observamos pouca correlação entre vazão total e CSS e produção de sedimentos, sendo menor nos eventos de baixo volume de escoamento e um pouco maior nos eventos de médio e grandes escoamentos.

Figura 36 - Relações entre variáveis PPT, I_{max}, Q_{max}, Q_t, CSS_{max}, SY_t, Run_{max} e Q_{St}.

(Preto: Grupo 1, Ciano: Grupo2, Verde: Grupo 3, Vermelho: Grupo 4)



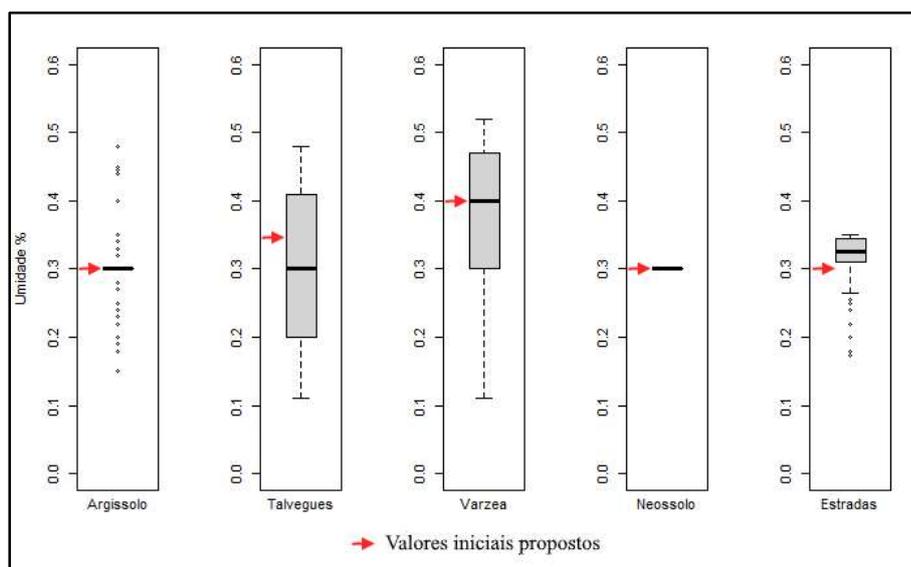
Fonte: Elaborado pelo autor.

6.3 RESULTADO DA CALIBRAÇÃO HIDROLÓGICA DOS EVENTOS

A Tabela 13 apresenta os valores de precipitação dos eventos, os valores e chuva antecedente de 1 e 2 dias, a condição de umidade antecedente considerada, e os valores calibrados para conteúdo de água de cada uma das áreas hidrológicas onde foi atuado. Foram mantidos os valores iniciais de condutividade hidráulica saturada estipulados de 150 mm.h^{-1} para os Argissolos e Neossolos, 100 mm.h^{-1} para os vertentes e várzea, 50 mm.h^{-1} para as estradas, a não ser em casos excepcionais. A Figura 37 apresenta os valores de alteração do conteúdo de água nas regiões hidrológicas durante a calibração dos eventos. Para o escoamento superficial também observamos que nos eventos com baixo escoamento o desempenho foi maior em relação aos grandes, pois estes últimos apresentam maior complexidade dos hidrogramas e aumento das incertezas relacionadas com diferentes fatores do ambiente na calibração, incluindo incertezas sobre a infiltração na bacia e o efeito das áreas de fragilidade hidrológica como representadas no modelo. A relação tempo de pico observado e simulado apresentou muito bom desempenho na modelagem dos pequenos e

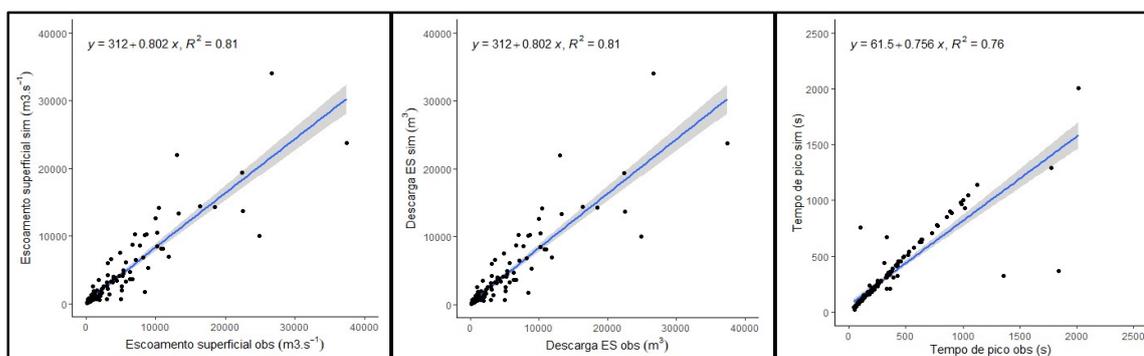
médios eventos, sendo menor na dos grandes eventos (Figura 38). Isto provavelmente pela complexidade dos grandes eventos que apresentam muitos picos ao longo de sua ocorrência, sendo que pode haver equívocos sobre qual dos picos foi considerado na análise. O erro na modelagem do tempo de pico é maior nos eventos de maior precipitação e de mais longa duração, pois existe o escoamento gerado em pontos mais distantes do exutório, sobre as encostas, onde a dinâmica do escoamento depende da resistência oferecida ao fluxo pelas características de vegetação e de rugosidade, calibradas através dos valores de n de Manning, que nesta modelagem não foram calibrados. Os eventos médios e pequenos, apresentaram bom resultado pela proximidade dos fluxos gerados pelas estruturas próximas ao canal e exutório. Já a Tabela 14 apresenta os valores finais dos produtos das simulações dos eventos.

Figura 37 - Amplitude de valores de umidade antecedente calibrados para os eventos



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 38 - Vazão de pico, descarga líquida superficial e tempo de pico da vazão simulados x observados.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 13 - Valores calibrados de conteúdo de água sobre as zonas hidrológicas nos eventos

Evento	PPT (mm)	PPT_1 (mm)	PPT_2 (mm)	Argissolo	Sat. (m/m)	Vertentes	Sat. (m/m)	Varzea	Sat. (m/m)	Estradas	Sat. (m/m)	Condição
20140101	8.98	4.30	9.90	0.400	0.800	0.475	0.990	0.517	0.994	0.350	1.000	S
20140408	37.95	0.00	0.00	0.300	0.600	0.435	0.906	0.465	0.894	0.342	0.977	S
20140521	53.36	3.90	3.90	0.300	0.600	0.410	0.854	0.435	0.837	0.335	0.957	S
20140605	67.80	82.60	82.60	0.300	0.600	0.460	0.958	0.480	0.923	0.348	0.994	MU
20141212	32.10	0.00	35.40	0.300	0.600	0.450	0.938	0.470	0.904	0.340	0.971	S
20150224	25.95	0.00	0.00	0.300	0.600	0.450	0.938	0.480	0.923	0.347	0.991	S
20150420	59.53	7.30	7.30	0.300	0.600	0.430	0.896	0.460	0.885	0.345	0.986	S
20150611	57.82	0.30	45.40	0.300	0.600	0.410	0.854	0.420	0.808	0.335	0.957	S
20150720	54.99	0.00	0.00	0.300	0.600	0.440	0.917	0.470	0.904	0.345	0.986	S
20150919	96.57	0.00	0.00	0.300	0.600	0.400	0.833	0.420	0.808	0.335	0.957	S
20151021	23.80	5.30	6.90	0.400	0.800	0.465	0.969	0.460	0.885	0.343	0.980	S
20151022	15.79	29.10	30.70	0.300	0.600	0.480	1.000	0.475	0.913	0.347	0.991	U
20151222	32.46	15.30	15.30	0.300	0.600	0.450	0.938	0.480	0.923	0.347	0.991	U
20151228	18.79	0.10	0.10	0.300	0.600	0.463	0.965	0.475	0.913	0.348	0.994	S
20160320	50.08	0.70	3.10	0.300	0.600	0.420	0.875	0.440	0.846	0.345	0.986	S
20160325	100.98	29.50	29.50	0.300	0.600	0.390	0.813	0.400	0.769	0.330	0.943	MU
20160423	32.10	10.50	14.10	0.300	0.600	0.440	0.917	0.440	0.846	0.345	0.986	U
20160424	57.91	32.10	42.60	0.300	0.600	0.453	0.944	0.440	0.846	0.348	0.994	MU
20161017	64.06	17.10	23.20	0.300	0.600	0.450	0.938	0.420	0.808	0.340	0.971	U
20161018	24.34	93.80	110.90	0.400	0.800	0.470	0.979	0.505	0.971	0.349	0.997	MU
20180121	41.30	0.80	0.80	0.190	0.380	0.190	0.396	0.270	0.519	0.240	0.686	S
20180122	40.40	42.10	42.10	0.190	0.380	0.190	0.396	0.340	0.654	0.315	0.900	MU
20180123	52.20	41.20	82.50	0.240	0.480	0.240	0.500	0.460	0.885	0.350	1.000	MU
20180209	33.80	0.00	0.00	0.300	0.600	0.180	0.375	0.190	0.365	0.265	0.757	S
20180220	27.74	18.50	19.70	0.300	0.600	0.240	0.500	0.350	0.673	0.310	0.886	U
20180226	26.59	4.70	4.70	0.300	0.600	0.240	0.500	0.470	0.904	0.347	0.991	S
20180315	38.07	1.10	1.10	0.300	0.600	0.200	0.417	0.390	0.750	0.325	0.929	S
20180318	29.04	0.00	0.00	0.300	0.600	0.200	0.417	0.280	0.538	0.240	0.686	S
20180414	50.52	0.10	0.10	0.300	0.600	0.200	0.417	0.300	0.577	0.285	0.814	S
20180518	41.65	0.00	0.00	0.300	0.600	0.200	0.417	0.270	0.519	0.300	0.857	S
20180519	28.04	41.65	41.65	0.300	0.600	0.200	0.417	0.350	0.673	0.330	0.943	MU
20180611	19.60	8.10	11.20	0.300	0.600	0.200	0.417	0.330	0.635	0.305	0.871	U
20180624	13.42	0.00	4.20	0.300	0.600	0.200	0.417	0.370	0.712	0.335	0.957	S
20180629	14.80	0.00	0.00	0.350	0.700	0.340	0.708	0.493	0.948	0.335	0.957	S
20180720	22.09	0.00	0.00	0.300	0.600	0.240	0.500	0.475	0.913	0.340	0.971	S
20180724	103.49	0.40	0.40	0.230	0.460	0.280	0.583	0.420	0.808	0.320	0.914	S
20180820	46.59	7.80	7.80	0.330	0.660	0.350	0.729	0.420	0.808	0.330	0.943	S
20180824	22.44	7.20	7.50	0.350	0.700	0.460	0.958	0.510	0.981	0.345	0.986	S
20180831	64.45	4.70	4.70	0.445	0.890	0.400	0.833	0.400	0.769	0.340	0.971	S
20180915	40.05	2.40	2.40	0.445	0.890	0.380	0.792	0.440	0.846	0.295	0.843	S
20180924	32.37	19.40	19.40	0.445	0.890	0.390	0.813	0.455	0.875	0.275	0.786	U
20181001	29.81	1.30	25.60	0.480	0.960	0.468	0.975	0.519	0.998	0.347	0.991	U
20181012	56.11	0.00	0.20	0.340	0.680	0.425	0.885	0.470	0.904	0.340	0.971	S
20181018	21.20	0.00	0.00	0.340	0.680	0.425	0.885	0.480	0.923	0.340	0.971	S
20181031	56.14	0.00	0.00	0.300	0.600	0.340	0.708	0.480	0.923	0.345	0.986	S
20181103	51.60	1.30	1.40	0.300	0.600	0.410	0.854	0.518	0.996	0.348	0.994	S
20181123	91.00	0.00	0.00	0.320	0.640	0.340	0.708	0.345	0.663	0.340	0.971	S
20181130	65.20	0.60	20.40	0.320	0.640	0.420	0.875	0.492	0.946	0.348	0.994	U
20181219	19.70	28.90	36.70	0.320	0.640	0.400	0.833	0.380	0.731	0.330	0.943	MU
20181221	36.70	41.70	61.40	0.320	0.640	0.400	0.833	0.495	0.952	0.348	0.994	MU
20190104	41.00	0.00	0.00	0.180	0.360	0.180	0.375	0.180	0.346	0.220	0.629	S
20190106	32.00	0.00	0.00	0.280	0.560	0.280	0.583	0.340	0.654	0.325	0.929	S
20190107	13.00	31.80	31.80	0.280	0.560	0.300	0.625	0.280	0.538	0.325	0.929	MU
20190111	32.00	14.10	15.00	0.280	0.560	0.280	0.583	0.495	0.952	0.280	0.800	U
20190114	31.10	3.40	12.90	0.280	0.560	0.250	0.521	0.260	0.500	0.292	0.834	U
20190117	18.70	2.70	12.40	0.320	0.640	0.320	0.667	0.440	0.846	0.340	0.971	U
20190224	44.40	0.00	0.00	0.320	0.640	0.320	0.667	0.440	0.846	0.340	0.971	S
20190308	90.20	6.70	6.70	0.320	0.640	0.310	0.646	0.293	0.563	0.320	0.914	S
20190427	19.60	37.20	37.20	0.320	0.640	0.340	0.708	0.470	0.904	0.347	0.991	MU
20190524	31.80	0.90	2.30	0.250	0.500	0.250	0.521	0.260	0.500	0.270	0.771	S
20190527	41.80	0.00	0.40	0.220	0.440	0.230	0.479	0.200	0.385	0.320	0.914	S
20190530	14.40	1.70	2.90	0.220	0.440	0.230	0.479	0.315	0.606	0.318	0.909	S
20190628	34.40	0.00	19.80	0.220	0.440	0.230	0.479	0.310	0.596	0.300	0.857	U
20190726	7.60	0.20	0.50	0.220	0.440	0.230	0.479	0.330	0.635	0.340	0.971	S
20190730	14.20	0.00	0.20	0.220	0.440	0.230	0.479	0.300	0.577	0.333	0.951	S
20190808	16.00	0.00	0.00	0.220	0.440	0.230	0.479	0.320	0.615	0.320	0.914	S
20190901	61.20	50.30	50.30	0.200	0.400	0.200	0.417	0.200	0.385	0.200	0.571	MU
20191002	22.00	0.00	0.00	0.150	0.300	0.110	0.229	0.110	0.212	0.323	0.923	S
20191005	37.60	45.40	55.70	0.190	0.380	0.190	0.396	0.400	0.769	0.348	0.994	MU
20191013	45.60	0.00	0.00	0.190	0.380	0.190	0.396	0.240	0.462	0.280	0.800	S
20191016	60.80	0.00	0.30	0.190	0.380	0.190	0.396	0.320	0.615	0.320	0.914	S
20191017	28.40	60.80	60.80	0.190	0.380	0.190	0.396	0.280	0.538	0.320	0.914	MU
20191021	20.20	0.00	0.00	0.190	0.380	0.190	0.396	0.280	0.538	0.310	0.886	S

Tabela 13 - Valores calibrados de conteúdo de água sobre as zonas hidrológicas nos eventos

Evento	PPT (mm)	PPT_1 (mm)	PPT_2 (mm)	Argissolo	Sat. (m/m)	Vertentes	Sat. (m/m)	Varzea	Sat. (m/m)	Estradas	Sat. (m/m)	Condição
20191027	45.60	0.00	0.00	0.190	0.380	0.190	0.396	0.240	0.462	0.270	0.771	S
20191030	36.40	7.10	7.10	0.190	0.380	0.190	0.396	0.325	0.625	0.310	0.886	S
20191104	122.34	6.30	8.20	0.190	0.380	0.190	0.396	0.325	0.625	0.310	0.886	S
20191107	60.40	0.40	1.00	0.190	0.380	0.190	0.396	0.340	0.654	0.315	0.900	S
20200110	31.60	6.50	6.50	0.300	0.600	0.300	0.625	0.490	0.942	0.348	0.994	S
20200129	35.80	0.00	0.00	0.280	0.560	0.200	0.417	0.260	0.500	0.305	0.871	S
20200204	17.20	0.00	0.00	0.200	0.400	0.200	0.417	0.220	0.423	0.255	0.729	S
20200225	67.20	4.60	4.60	0.300	0.600	0.200	0.417	0.300	0.577	0.305	0.871	S
20200406	31.40	3.70	3.70	0.200	0.400	0.200	0.417	0.250	0.481	0.250	0.714	S
20200413	4.90	0.00	0.00	0.300	0.600	0.200	0.417	0.390	0.750	0.338	0.966	S
20200522	99.00	0.00	0.00	0.300	0.600	0.200	0.417	0.250	0.481	0.180	0.514	S
20200605	45.76	1.50	1.50	0.300	0.600	0.200	0.417	0.220	0.423	0.250	0.714	S
20200613	25.30	0.00	5.70	0.300	0.600	0.200	0.417	0.300	0.577	0.290	0.829	S
20200629	91.40	0.00	0.00	0.300	0.600	0.200	0.417	0.240	0.462	0.240	0.686	S
20200630	48.00	91.40	91.40	0.300	0.600	0.200	0.417	0.490	0.942	0.348	0.994	MU
20200705	41.80	5.70	5.70	0.300	0.600	0.200	0.417	0.430	0.827	0.315	0.900	S
20200707	156.80	24.40	67.30	0.300	0.600	0.440	0.917	0.510	0.981	0.345	0.986	MU
20200711	74.60	0.30	0.30	0.300	0.600	0.400	0.833	0.480	0.923	0.335	0.957	S
20200716	62.00	0.00	0.00	0.300	0.600	0.200	0.417	0.450	0.865	0.345	0.986	S
20200728	33.00	21.70	26.60	0.300	0.600	0.200	0.417	0.300	0.577	0.290	0.829	U
20200811	64.10	0.00	0.00	0.300	0.600	0.200	0.417	0.150	0.288	0.173	0.494	S
20200906	24.80	7.10	7.10	0.300	0.600	0.200	0.417	0.300	0.577	0.290	0.829	S
20200927	19.00	0.00	0.00	0.300	0.600	0.200	0.417	0.390	0.750	0.325	0.929	S
20201128	17.40	0.00	4.50	0.300	0.600	0.200	0.417	0.310	0.596	0.315	0.900	S
20201202	83.20	0.00	0.00	0.300	0.600	0.300	0.625	0.470	0.904	0.348	0.994	S
20201213	21.80	2.50	2.50	0.300	0.600	0.280	0.583	0.295	0.567	0.285	0.814	S
20201217	43.40	0.00	0.00	0.300	0.600	0.200	0.417	0.290	0.558	0.280	0.800	S
20201219	11.40	0.00	0.00	0.300	0.600	0.200	0.417	0.390	0.750	0.325	0.929	S
20210105	11.40	0.50	0.50	0.300	0.600	0.200	0.417	0.380	0.731	0.318	0.909	S
20210124	14.70	0.40	0.70	0.280	0.560	0.280	0.583	0.300	0.577	0.310	0.886	S
20210126	40.70	0.00	14.70	0.300	0.600	0.200	0.417	0.390	0.750	0.320	0.914	U
20210128	31.40	16.80	57.50	0.300	0.600	0.380	0.792	0.420	0.808	0.345	0.986	MU
20210129	21.50	31.40	48.20	0.300	0.600	0.380	0.792	0.477	0.917	0.347	0.991	MU
20210130	31.40	21.50	52.90	0.300	0.600	0.380	0.792	0.477	0.917	0.347	0.991	MU
20210131	19.10	31.40	52.90	0.300	0.600	0.380	0.792	0.487	0.937	0.347	0.991	MU
20210204	32.50	0.00	0.00	0.300	0.600	0.380	0.792	0.450	0.865	0.320	0.914	S
20210223	23.70	0.00	0.00	0.300	0.600	0.200	0.417	0.280	0.538	0.290	0.829	S
20210304	12.20	9.70	15.00	0.300	0.600	0.200	0.417	0.300	0.577	0.280	0.800	U
20210326	10.50	10.50	10.70	0.300	0.600	0.200	0.417	0.335	0.644	0.336	0.960	U
20210521	78.80	13.10	13.10	0.300	0.600	0.200	0.417	0.390	0.750	0.325	0.929	U
20210528	114.10	0.00	0.00	0.300	0.600	0.400	0.833	0.400	0.769	0.310	0.886	S
20210605	26.10	0.00	0.00	0.300	0.600	0.200	0.417	0.390	0.750	0.322	0.920	S
20210610	26.20	1.70	5.80	0.300	0.600	0.300	0.625	0.370	0.712	0.320	0.914	S
20210624	23.90	0.00	0.00	0.280	0.560	0.280	0.583	0.280	0.538	0.295	0.843	S
20210626	41.00	40.90	64.80	0.440	0.880	0.460	0.958	0.490	0.942	0.348	0.994	MU
20210627	61.00	63.10	104.00	0.440	0.880	0.460	0.958	0.490	0.942	0.348	0.994	MU
20210824	49.20	0.90	0.90	0.300	0.600	0.400	0.833	0.424	0.815	0.347	0.991	S
20210907	76.40	8.10	8.10	0.300	0.600	0.200	0.417	0.400	0.769	0.323	0.923	S
20210913	31.00	0.00	0.00	0.300	0.600	0.200	0.417	0.400	0.769	0.320	0.914	S
20210930	29.70	0.00	11.70	0.300	0.600	0.300	0.625	0.410	0.788	0.335	0.957	U
20211003	22.00	0.00	29.70	0.400	0.800	0.450	0.938	0.490	0.942	0.348	0.994	U
20211006	17.20	6.30	6.30	0.300	0.600	0.300	0.625	0.430	0.827	0.345	0.986	S
20211015	26.40	4.20	4.20	0.300	0.600	0.300	0.625	0.350	0.673	0.312	0.891	S
20211214	33.70	0.00	0.30	0.270	0.540	0.270	0.563	0.270	0.519	0.280	0.800	S
20220118	36.22	0.00	6.00	0.300	0.600	0.300	0.625	0.300	0.577	0.320	0.914	S
20220123	50.60	0.00	0.00	0.300	0.600	0.200	0.417	0.390	0.750	0.325	0.929	S
20220126	42.50	0.00	1.30	0.300	0.600	0.420	0.875	0.435	0.837	0.346	0.989	S
20220222	18.58	6.30	9.90	0.300	0.600	0.330	0.688	0.360	0.692	0.310	0.886	S
20220225	31.18	30.90	30.90	0.300	0.600	0.300	0.625	0.300	0.577	0.290	0.829	MU
20220311	28.16	0.00	0.00	0.300	0.600	0.300	0.625	0.300	0.577	0.290	0.829	S
20220323	109.78	10.30	10.30	0.400	0.800	0.420	0.875	0.420	0.808	0.310	0.886	U
20220403	25.52	1.30	1.30	0.300	0.600	0.300	0.625	0.340	0.654	0.300	0.857	S
20220404	41.58	63.10	64.40	0.300	0.600	0.400	0.833	0.500	0.962	0.342	0.977	MU
20220426	89.10	0.00	0.00	0.300	0.600	0.400	0.833	0.420	0.808	0.315	0.900	S
20220428	38.06	0.20	17.30	0.300	0.600	0.432	0.900	0.480	0.923	0.320	0.914	U
20220430	60.94	0.00	38.06	0.300	0.600	0.462	0.963	0.482	0.927	0.320	0.914	MU
20220502	95.04	60.94	97.44	0.300	0.600	0.465	0.969	0.485	0.933	0.335	0.957	MU
20220504	14.96	155.98	192.48	0.300	0.600	0.470	0.979	0.500	0.962	0.349	0.997	MU
20220514	22.22	0.00	0.00	0.300	0.600	0.400	0.833	0.483	0.929	0.347	0.991	S
20220528	74.14	4.30	16.10	0.300	0.600	0.415	0.865	0.415	0.798	0.342	0.977	U
20220606	43.78	23.80	29.50	0.300	0.600	0.460	0.958	0.480	0.923	0.345	0.986	U
20220617	64.24	0.00	0.00	0.300	0.600	0.365	0.760	0.385	0.740	0.342	0.977	S
20220621	57.20	0.00	0.00	0.300	0.600	0.430	0.896	0.470	0.904	0.345	0.986	S

Tabela 13 - Valores calibrados de conteúdo de água sobre as zonas hidrológicas nos eventos

Evento	PPT (mm)	PPT_1 (mm)	PPT_2 (mm)	Argissolo	Sat. (m/m)	Vertentes	Sat. (m/m)	Varzea	Sat. (m/m)	Estradas	Sat. (m/m)	Condição
20220622	10.56	57.20	57.20	0.300	0.600	0.470	0.979	0.500	0.962	0.348	0.994	MU
20220712	27.72	0.00	0.00	0.300	0.600	0.200	0.417	0.390	0.750	0.325	0.929	S
20220714	29.70	0.00	27.10	0.300	0.600	0.450	0.938	0.482	0.927	0.348	0.994	MU
20220716	39.38	17.40	25.90	0.300	0.600	0.450	0.938	0.480	0.923	0.347	0.991	MU

PPT: Precipitação; PPT_1: Precipitação de 1 dia antecedente; PPT_2: precipitação de 2 dias antecedentes; Sat: Saturação; Condição: S – Seco, U-Úmido, MU-Muito úmido. Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 14 - Resultados de saída do modelo para os eventos

EVENTO	PPT (mm)	INTER (mm)	INFILT (mm)	DESC SIM (m ³)	DESC OBS (m ³)	TX ESC SIM (%)	Qmax SIM (L s ⁻¹)	Qmax OBS (L s ⁻¹)
20140101	8.98	2.33	5.60	1255.29	758.80	11.45	483.36	480.09
20140408	37.95	2.50	32.58	3132.52	3770.03	6.74	1335.57	1213.79
20140521	53.36	2.50	47.47	4080.00	5267.87	6.26	787.51	696.70
20140605	67.80	2.50	53.95	13715.09	22482.44	16.57	1462.54	2341.54
20141212	32.10	2.50	26.70	3503.18	1732.58	8.94	901.71	766.83
20150224	25.95	2.50	21.64	1911.28	1564.68	6.02	702.03	677.99
20150420	59.54	2.50	49.78	8705.35	6660.87	11.98	814.13	638.58
20150611	57.83	2.50	51.29	4712.70	6304.17	6.67	1046.50	1044.52
20150720	54.99	2.50	45.16	8618.23	7736.41	12.83	1559.42	1336.35
20150919	96.16	2.50	81.45	14309.37	18463.11	12.19	2136.28	1782.87
20151021	23.80	2.49	19.14	2581.34	2463.49	8.89	551.90	501.54
20151022	15.79	2.48	11.23	2504.69	5066.83	13.00	914.10	849.42
20151222	32.47	2.50	26.69	3956.93	3946.26	9.99	1367.36	1215.04
20151228	18.79	2.49	15.06	1262.32	1128.42	5.49	406.00	459.68
20160320	50.08	2.50	43.87	4247.17	3096.44	6.94	1079.27	1048.76
20160325	100.97	2.50	86.57	14433.49	16285.53	11.71	820.75	793.18
20160423	32.11	2.50	28.20	1618.59	2264.03	4.13	428.50	441.01
20160424	57.91	2.50	46.90	10297.45	8612.16	14.57	807.04	808.17
20161017	63.27	2.50	51.68	10510.35	10209.74	13.60	2725.81	2346.94
20161018	24.08	2.50	17.33	4940.79	5301.03	16.79	1289.77	1388.76
20180121	41.30	2.50	38.45	426.13	385.07	0.85	108.88	123.39
20180122	40.40	2.50	37.16	900.73	1340.50	1.83	340.67	340.55
20180123	52.20	2.50	47.09	3160.73	3002.34	4.96	614.32	294.50
20180209	33.80	2.50	30.99	374.15	226.00	0.91	66.32	62.62
20180220	27.74	2.50	24.83	492.39	406.26	1.45	122.90	130.31
20180226	26.59	2.50	23.28	958.62	752.38	2.95	420.50	438.37
20180315	38.07	2.50	34.84	888.43	600.68	1.91	216.93	208.17
20180318	29.05	2.50	26.39	181.12	155.16	0.51	41.73	46.45
20180414	50.51	2.50	47.23	931.45	1072.78	1.51	111.32	112.02
20180518	41.66	2.50	38.50	803.76	1004.30	1.58	41.13	42.06
20180519	28.04	2.50	25.03	626.12	1436.45	1.83	63.45	62.88
20180611	19.60	2.49	16.91	243.71	432.87	1.02	56.14	56.09
20180624	13.42	2.45	10.74	264.44	554.30	1.61	48.70	48.54
20180629	14.80	2.47	12.00	389.96	421.88	2.16	60.11	66.65
20180720	22.09	2.49	19.07	639.19	323.42	2.37	58.90	34.66
20180724	103.50	2.50	95.30	6945.75	11841.47	5.50	231.53	236.72
20180820	46.61	2.50	98.42	1335.17	3340.69	2.35	72.42	62.28
20180824	22.44	2.49	17.37	3094.55	2964.67	11.30	1099.31	1187.59
20180831	64.43	2.50	57.61	5242.24	8887.09	6.67	407.56	524.02
20180915	40.05	2.50	36.67	1066.80	1577.34	2.18	235.29	229.40
20180924	32.37	2.50	29.34	646.55	815.96	1.64	68.77	61.46
20181001	29.81	2.50	21.66	6846.62	8207.91	18.82	503.37	577.80
20181012	56.10	2.50	47.37	7560.78	4895.80	11.04	1803.61	1760.31
20181018	21.21	2.49	18.15	682.95	1104.06	2.64	118.71	122.29
20181031	56.15	2.50	50.27	4125.29	4757.34	6.02	393.09	391.93
20181103	51.60	2.50	44.00	6147.31	5663.02	9.76	1643.62	1885.39
20181123	91.01	2.50	84.78	4485.96	5385.61	4.04	450.95	541.80
20181130	65.20	2.50	54.15	10148.03	8412.58	12.74	2513.28	2431.24
20181219	19.70	2.49	16.87	411.88	406.24	1.71	89.84	93.46
20181221	36.70	2.50	31.98	2691.31	3003.52	6.01	858.15	826.56
20190104	41.00	2.50	38.25	307.50	404.48	0.61	88.11	75.18
20190106	32.00	2.50	28.90	731.88	815.18	1.87	365.76	353.93
20190107	13.00	2.45	10.39	194.34	329.99	1.22	63.88	63.28
20190111	32.00	2.50	28.07	1732.99	1112.53	4.44	677.66	620.75
20190114	31.10	2.50	28.20	476.36	528.74	1.25	188.64	187.46
20190117	18.70	2.49	15.84	455.55	765.44	2.00	119.16	105.90
20190224	44.40	2.50	40.44	1781.16	1109.83	3.29	113.24	27.19
20190308	90.20	2.50	85.77	2358.17	2341.46	2.14	319.10	270.10
20190427	19.60	2.49	16.68	519.22	425.39	2.17	169.40	183.93
20190524	31.80	2.50	29.02	343.79	298.27	0.89	28.52	32.42
20190527	41.40	2.50	38.12	959.02	703.55	1.90	210.43	210.30
20190530	14.40	2.46	11.78	177.83	164.42	1.01	48.99	46.39
20190628	34.40	2.50	31.38	627.35	814.77	1.49	245.34	224.14
20190726	7.60	2.25	5.24	132.37	167.89	1.43	25.48	26.21
20190730	14.20	2.46	11.51	261.00	190.91	1.51	29.48	30.55
20190808	16.00	2.48	13.32	245.98	314.40	1.26	81.34	72.69
20190901	61.20	2.50	58.11	711.29	524.83	0.95	152.23	114.64
20191002	22.00	2.49	19.15	427.81	469.06	1.59	59.60	44.93
20191005	37.60	2.50	34.25	1037.59	727.43	2.26	298.61	342.26
20191013	37.66	2.50	34.68	587.17	432.15	1.28	206.29	186.74
20191016	60.80	2.50	57.07	1492.16	910.27	2.01	284.42	271.67
20191017	28.40	2.50	25.42	582.46	370.53	1.68	165.23	149.62

Tabela 14 - Resultados de saída do modelo para os eventos

EVENTO	PPT (mm)	INTER (mm)	INFILT (mm)	DESC SIM (m ³)	DESC OBS (m ³)	TX ESC SIM (%)	Qmax SIM (L s ⁻¹)	Qmax OBS (L s ⁻¹)
20191021	20.00	2.49	17.27	279.51	229.31	1.14	41.91	41.24
20191027	45.60	2.50	42.50	723.33	384.99	1.30	91.88	90.93
20191030	36.40	2.50	33.30	730.59	538.99	1.64	112.28	136.00
20191104	122.34	2.50	114.94	5955.93	3026.47	3.99	611.88	492.46
20191107	60.40	2.50	56.71	1452.88	1090.21	1.97	254.43	216.16
20200110	38.07	2.50	33.42	2605.99	893.11	5.61	601.10	591.66
20200129	35.80	2.50	32.74	675.48	234.98	1.55	87.54	101.27
20200204	17.20	2.48	14.63	100.04	88.97	0.48	13.76	16.16
20200225	67.20	2.50	63.39	1569.06	1064.49	1.91	573.33	653.13
20200406	31.40	2.50	28.72	216.07	228.77	0.56	15.60	16.44
20200413	4.90	1.93	2.92	55.38	120.93	0.93	11.12	16.92
20200522	99.00	2.50	95.16	1634.11	1153.11	1.35	160.25	75.86
20200605	45.76	2.50	42.76	611.86	592.28	1.10	103.17	61.76
20200613	25.30	2.50	22.55	309.03	384.29	1.00	93.88	85.36
20200629	91.40	2.50	87.40	1837.72	2090.00	1.65	229.51	223.55
20200630	48.00	2.50	42.55	3586.87	6652.89	6.12	1264.47	1159.55
20200705	41.80	2.50	38.36	1141.59	2008.76	2.24	223.72	148.51
20200707	156.80	2.50	126.37	34057.05	26666.85	17.80	2525.36	3003.72
20200711	74.60	2.50	63.64	10236.71	6954.31	11.24	1671.91	1438.38
20200716	62.00	2.50	56.38	3801.66	4142.34	5.02	230.43	257.05
20200728	33.00	2.50	30.07	521.62	933.19	1.30	95.17	55.86
20200811	64.10	2.50	61.09	621.52	924.97	0.79	66.46	69.49
20200906	24.80	2.49	22.06	291.92	385.63	0.96	41.74	39.01
20200927	19.00	2.49	16.21	356.34	413.31	1.54	109.20	96.15
20201128	17.40	2.48	14.71	252.13	333.00	1.19	88.24	77.93
20201202	83.20	2.50	75.32	6544.42	3506.51	6.44	1278.13	1269.00
20201213	21.80	2.49	19.16	172.21	200.72	0.65	29.19	32.18
20201217	43.40	2.50	40.29	745.85	589.07	1.41	309.95	298.33
20201219	11.40	2.42	8.86	132.29	162.08	0.95	39.35	30.10
20210105	11.40	2.42	8.89	104.87	173.95	0.75	19.34	17.07
20210124	14.70	2.47	12.11	141.06	90.11	0.79	32.18	29.53
20210126	40.70	2.50	37.43	934.46	1126.29	1.88	321.22	367.83
20210128	31.40	2.50	28.21	846.12	1076.61	2.21	209.91	214.19
20210129	21.50	2.49	18.43	693.14	2958.06	2.64	113.51	109.57
20210130	31.40	2.50	27.55	1644.41	2184.55	4.29	840.07	757.48
20210131	19.10	2.49	16.00	730.21	1103.53	3.13	279.21	203.65
20210204	32.50	2.50	29.32	822.66	1248.17	2.07	192.99	170.58
20210223	23.70	2.49	20.99	263.73	224.73	0.91	68.70	64.13
20210304	12.20	2.43	9.70	64.94	151.26	0.44	13.20	10.84
20210326	10.50	2.39	7.94	193.41	302.47	1.51	64.81	67.61
20210521	78.80	2.50	73.30	3650.95	6305.20	3.80	325.94	457.21
20210528	114.10	2.50	95.61	19324.22	22355.53	13.87	3081.51	2531.21
20210605	26.10	2.50	23.16	538.48	440.48	1.69	168.13	150.33
20210610	26.20	2.50	23.27	531.79	1866.39	1.66	218.12	180.81
20210624	23.90	2.49	21.16	297.19	563.08	1.02	62.08	59.33
20210626	41.00	2.50	31.84	8090.29	11056.82	16.17	3961.82	4746.04
20210627	61.00	2.50	46.79	14205.86	10399.03	19.08	3175.16	3205.76
20210824	49.20	2.50	45.09	1923.93	5047.31	3.20	284.23	260.47
20210907	76.40	2.50	70.87	3685.18	3887.17	3.95	938.62	993.19
20210913	31.00	2.50	27.95	667.31	593.42	1.76	248.84	199.48
20210930	29.70	2.50	26.60	733.23	963.95	2.02	274.19	251.67
20211003	22.00	2.49	18.34	1392.98	1872.04	5.19	730.86	871.24
20211006	17.20	2.48	14.35	436.45	384.30	2.08	200.22	233.17
20211015	26.40	2.50	23.51	477.17	803.01	1.48	80.47	106.67
20211214	33.70	2.50	30.81	475.36	502.80	1.16	167.04	188.63
20220118	36.22	2.50	33.05	814.16	606.93	1.84	277.18	246.60
20220123	50.60	2.50	47.07	1259.92	1183.60	2.04	402.36	392.84
20220126	42.50	2.50	38.11	2211.35	2267.11	4.26	922.86	925.24
20220222	18.58	2.49	15.89	248.61	310.46	1.10	55.67	49.91
20220225	31.18	2.50	28.30	470.13	575.61	1.24	102.95	118.14
20220311	28.16	2.50	25.35	371.92	412.81	1.08	76.28	69.97
20220323	109.78	2.50	89.22	21959.02	13022.13	16.39	4045.35	3663.60
20220404	41.58	2.50	36.37	3299.71	5718.22	6.50	312.78	352.65
20220426	89.10	2.50	76.25	12554.08	9919.61	11.54	1863.12	1160.88
20220428	38.06	2.50	32.74	3352.17	4375.30	7.21	694.87	677.76
20220430	60.94	2.50	47.51	13315.81	13271.96	17.90	901.16	338.69
20220502	94.82	2.50	72.60	23739.23	37381.42	20.51	1168.28	1728.27
20220504	14.96	2.47	10.97	1756.97	8424.98	9.62	276.44	279.61
20220514	22.22	2.49	18.95	930.21	1756.18	3.43	145.53	121.83
20220528	74.14	2.50	63.44	9989.10	24884.61	11.04	1955.13	1545.98
20220606	43.56	2.50	34.36	8085.77	10796.88	15.21	1464.71	1590.00
20220617	64.02	2.50	59.66	2181.58	3073.44	2.79	293.15	327.33

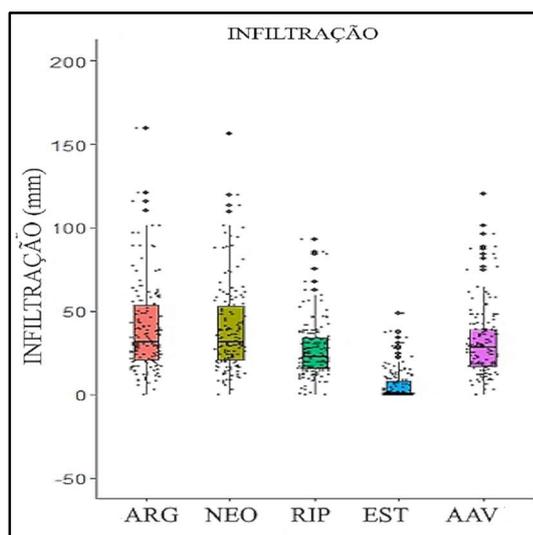
Tabela 14 - Resultados de saída do modelo para os eventos

EVENTO	PPT (mm)	INTER (mm)	INFILT (mm)	DESC SIM (m ³)	DESC OBS (m ³)	TX ESC SIM (%)	Qmax SIM (L s ⁻¹)	Qmax OBS (L s ⁻¹)
20220621	57.20	2.50	47.79	8415.71	10169.54	12.05	501.72	635.36
20220622	10.56	2.39	7.62	629.64	4922.30	4.88	171.02	191.81
20220712	27.72	2.50	24.73	595.49	931.90	1.76	119.87	110.63
20220714	29.70	2.50	24.53	3219.91	3506.51	8.88	248.80	297.72
20220716	41.14	2.50	33.36	6404.21	7074.07	12.75	2314.40	2118.26

PPT: Precipitação; INTER: Intercepção; INFILT: Infiltração; DESC SIM: Descarga líquida simulada; DESC OBS: Descarga líquida observada; TX ESC SIM: Taxa de escoamento simulado; Qmax SIM: Vazão de pico simulado; Qmax OBS: Vazão de pico observado. Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 39 apresenta um boxplot dos valores totais de infiltração para cada evento. Temos que para os Argissolos e Neossolos, a amplitude dos valores de infiltração sobre as áreas obedeceu aos valores esperados em função da chuva ocorrida, onde a infiltração da precipitação ocorreu nesses locais quando a sua intensidade foi menor que os valores de condutividade hidráulica atribuídos aos solos.

Figura 39 - Infiltração simulada sobre os solos nos eventos



Fonte: Elaborado pelo autor.

Já para as estradas, que foram os primeiros locais onde alteramos valores de umidade do solo na calibração tivemos menores infiltrações, seja pela rápida saturação do seu raso perfil ou pela baixa condutividade hidráulica estimada sobre as estradas. As vertentes, intermediário entre as encostas de Argissolos e a região da Várzea, apresentou infiltração intermediária entre estes. A Várzea apresentou infiltração menor, visto que se trata de área de baixada em que a estimativa do processo de infiltração é menor por conta da umidade mais elevada ou a saturação do perfil durante os eventos acontece. Obviamente, os resultados não permitem a validação da quantidade e da localização da infiltração pontual sobre a bacia,

sendo que a generalização do processo obtida na modelagem é uma simplificação necessária de ser considerada na análise dos resultados. Porém, a partir dos valores estimados de condutividade hidráulica saturada dos solos sobre cada tipo de solo, os resultados podem ser considerados adequados do ponto de vista da observação.

6.4 RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO DOS SEDIMENTOS

A Tabela 15 apresenta os valores calibrados para variáveis de coesão do solo. Considerando as inúmeras variáveis que influenciam os processos de desagregação, transporte e deposição sobre a bacia e a variabilidade da oferta de sedimentos prontamente erodíveis e transportáveis presentes sobre os caminhos preferenciais do escoamento, os resultados foram considerados aceitáveis.

A modificação dos valores de coesão do solo durante a calibração (Figura 40), obedeceu a mesma ordem de prioridade: estradas, várzea, vertentes, Argissolo e Neossolo. Foi necessário atuar predominantemente sobre as estradas e as várzeas, com limites entre 5 e 70 kPa. Estes níveis estão entre o intervalo considerado adequado para as situações de uso que se encontram os solos. Optamos por não aumentar a coesão acima de 70 kPa, mesmo que não atingido o ajuste necessário. Isso fez com que os resultados não fossem tão bons para grande parte dos eventos. Para aqueles em que a disponibilidade de sedimentos encontrada no evento observado ficou próxima do que o modelo encontrou em relação ao fluxo concentrado estimado pelo modelo, os resultados foram mais adequados. Também agimos sobre os valores de estradas e várzeas de forma conjunta, oportunizando que a desagregação não fosse apenas concentrada em uma única estrutura, mas sim em todas onde ocorresse o escoamento sobre a bacia.

O desempenho para simulação da CSS máxima simulada em relação ao observado apresentou desempenho razoável, com eventos pequenos e médios com boa correlação e eventos de maior carga de sedimentos com alguns outliers, resultando $r^2 = 0,73$ (Figura 41). Para a descarga sólida total o desempenho foi menos acurado, tendo $r^2 = 0,58$. Isso se deve à fraca correlação existente entre vazão de pico máximo e CSS máxima nos eventos, que tiveram apenas $r^2 = 0,25$, em função provavelmente da variabilidade de oferta de sedimentos entre os eventos.

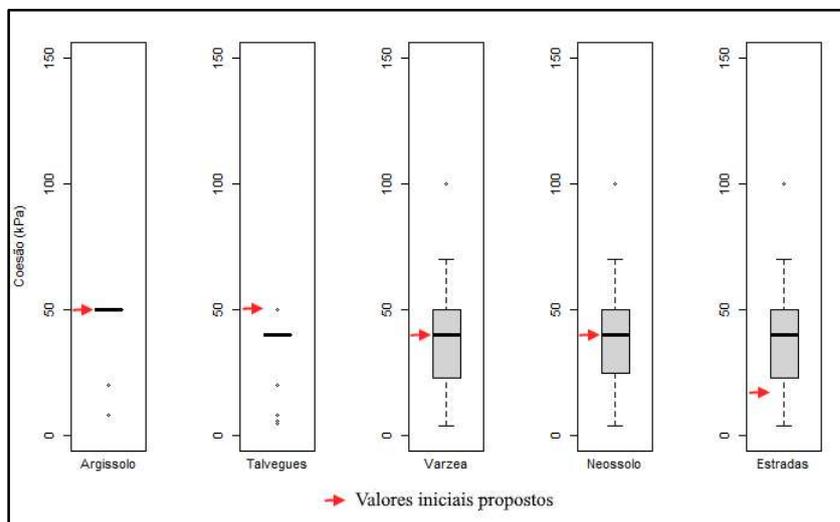
Tabela 15 - Valores de coesão do solo calibrados sobre as áreas hidrológicas

Evento	Argissolo	Vertentes	Várzea	Neossolo	Estradas	Canal O1	Canal O0	Canal EST
20140101	50	40	30	30	30	30	30	30
20140408	50	40	15	15	15	15	15	15
20140521	50	40	60	60	60	60	60	60
20140605	50	40	50	50	50	50	50	50
20141212	50	40	45	45	45	45	45	45
20150224	50	40	35	35	35	35	35	35
20150420	50	40	50	50	50	50	50	50
20150611	50	40	60	60	60	60	60	60
20150720	50	40	50	50	50	50	50	50
20150919	50	40	50	50	50	50	50	50
20151021	50	40	50	50	50	50	50	50
20151022	50	40	70	70	70	70	70	70
20151222	50	40	50	50	50	50	50	50
20151228	50	40	70	70	70	70	70	70
20160320	50	40	50	50	50	50	50	50
20160325	50	40	70	70	70	70	70	70
20160423	50	40	70	70	70	70	70	70
20160424	50	40	70	70	70	70	70	70
20161017	50	40	50	50	50	50	50	50
20161018	50	40	70	70	70	70	70	70
20180121	20	20	5	5	5	5	5	5
20180122	8	8	12	12	12	12	12	12
20180123	8	8	40	40	20	40	40	20
20180209	50	50	30	30	30	30	30	30
20180220	50	40	45	45	45	45	45	45
20180226	50	40	25	25	25	25	25	25
20180315	50	40	30	30	30	30	30	30
20180318	50	40	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3
20180414	50	40	60	60	60	60	60	60
20180518	50	40	50	50	40	50	50	40
20180519	50	40	50	50	50	50	50	50
20180611	50	40	25	25	25	25	25	25
20180624	50	40	40	40	40	40	40	40
20180629	50	40	25	25	25	25	25	25
20180720	50	40	30	30	30	30	30	30
20180724	50	40	70	70	70	70	70	70
20180820	50	40	40	30	30	40	30	30
20180824	50	40	5	5	5	5	5	5
20180831	50	40	10	10	10	10	10	10
20180915	50	40	10	50	20	1000	500	100
20180924	50	40	20	40	40	40	40	20
20181001	50	40	20	20	10	40	40	40
20181012	50	40	10	50	20	1000	500	100
20181018	50	40	10	50	20	60	60	60
20181031	50	40	50	50	50	50	50	50
20181103	50	40	5	5	5	5	5	5
20181123	50	40	15	15	15	15	15	15
20181130	50	40	20	20	20	20	20	20
20181219	50	40	8	8	8	8	8	8
20181221	50	40	50	50	50	50	50	50
20190104	8	6	6	6	6	6	6	6
20190106	8	6	20	20	20	20	20	20
20190107	8	6	50	50	50	50	50	50
20190111	8	5	8	8	8	8	8	8
20190114	8	20	40	40	40	40	40	40
20190117	8	5	100	100	100	100	100	100
20190224	8	5	100	100	100	100	100	100
20190308	8	5	20	20	20	20	20	20
20190427	8	5	18	18	18	18	18	18
20190524	8	5	10	10	10	10	10	10
20190527	8	8	8	7	6	10	6	6
20190530	8	8	35	35	35	35	35	35
20190628	8	8	28	28	28	28	28	28
20190726	8	8	25	25	25	25	25	25
20190730	8	8	45	45	45	45	45	45
20190808	8	8	35	35	35	35	35	35
20190901	8	8	25	25	25	30	30	30
20191002	8	8	35	35	35	35	35	35
20191005	8	8	15	15	15	15	15	15
20191013	8	8	16	16	16	16	16	16
20191016	8	8	35	35	35	35	35	35
20191017	8	8	40	30	30	40	30	30
20191021	8	8	30	30	30	30	30	30

Evento	Argissolo	Vertentes	Várzea	Neossolo	Estradas	Canal O1	Canal O0	Canal EST
20191027	8	8	30	30	30	30	30	30
20191030	8	8	35	35	35	35	35	35
20191104	8	8	35	35	35	35	35	35
20191107	8	8	50	50	50	50	50	50
20200110	50	40	13	13	13	13	13	13
20200129	50	40	15	15	15	15	15	15
20200204	50	40	4	4	4	4	4	4
20200225	50	40	30	30	30	30	30	30
20200406	50	40	25	25	25	25	25	25
20200413	50	40	27	27	27	27	27	27
20200522	50	40	30	30	30	30	30	30
20200605	50	40	35	35	35	35	35	35
20200613	50	40	30	30	30	30	30	30
20200629	50	40	35	35	35	35	35	35
20200630	50	40	10	10	10	10	10	10
20200705	50	40	45	45	45	45	45	45
20200707	50	40	5	5	5	5	5	5
20200711	50	40	20	20	20	20	20	20
20200716	50	40	23	23	23	23	23	23
20200728	50	40	20	20	20	20	20	20
20200811	50	40	23	23	23	23	23	23
20200906	50	40	30	30	30	30	30	30
20200927	50	40	15	15	15	15	15	15
20201128	50	40	18	18	18	18	18	18
20201202	50	40	10	10	10	10	10	10
20201213	50	40	50	50	50	50	50	50
20201217	50	40	25	25	25	25	25	25
20201219	50	40	50	50	50	50	50	50
20210105	50	40	40	40	40	40	40	40
20210124	50	40	40	40	40	40	40	40
20210126	50	40	40	40	40	40	40	40
20210128	50	40	50	50	50	50	50	50
20210129	50	40	50	50	50	50	50	50
20210130	50	40	70	70	70	70	70	70
20210131	50	40	70	70	70	70	70	70
20210204	50	40	70	70	70	70	70	70
20210223	50	40	50	50	50	50	50	50
20210304	50	40	15	15	15	15	15	15
20210326	50	40	30	30	30	30	30	30
20210521	50	40	50	50	50	50	50	50
20210528	50	40	50	50	50	50	50	50
20210605	50	40	50	50	50	50	50	50
20210610	50	40	50	50	50	50	50	50
20210624	50	40	30	30	30	30	30	30
20210626	50	40	60	60	60	60	60	60
20210627	50	40	60	60	60	60	60	60
20210824	50	40	50	50	50	50	50	50
20210907	50	40	20	20	20	20	20	20
20210913	50	40	40	40	40	40	40	40
20210930	50	40	60	60	60	60	60	60
20211003	50	40	50	50	50	50	50	50
20211006	50	40	50	50	50	50	50	50
20211015	50	40	50	50	50	50	50	50
20211214	50	40	60	60	60	60	60	60
20220118	50	40	70	70	70	70	70	70
20220123	50	40	70	70	70	70	70	70
20220126	50	40	70	70	70	70	70	70
20220222	50	40	50	50	50	50	50	50
20220225	50	40	70	70	70	70	70	70
20220311	50	40	70	70	70	70	70	70
20220323	50	40	40	40	40	40	40	40
20220403	50	40	70	70	70	70	70	70
20220404	50	40	20	20	20	20	20	20
20220426	50	40	50	50	50	50	50	50
20220428	50	40	30	30	30	30	30	30
20220430	50	40	70	70	70	70	70	70
20220502	50	40	70	70	70	70	70	70
20220504	50	40	70	70	70	70	70	70
20220514	50	40	50	50	50	50	50	50
20220528	50	40	60	60	60	60	60	60
20220606	50	40	50	50	50	50	50	50
20220617	50	40	40	40	40	40	40	40
20220621	50	40	50	50	50	50	50	50
20220622	50	40	50	50	50	50	50	50
20220712	50	40	50	50	50	50	50	50

Evento	Argissolo	Vertentes	Várzea	Neossolo	Estradas	Canal O1	Canal O0	Canal EST
20220714	50	40	50	50	50	50	50	50
20220716	50	40	50	50	50	50	50	50

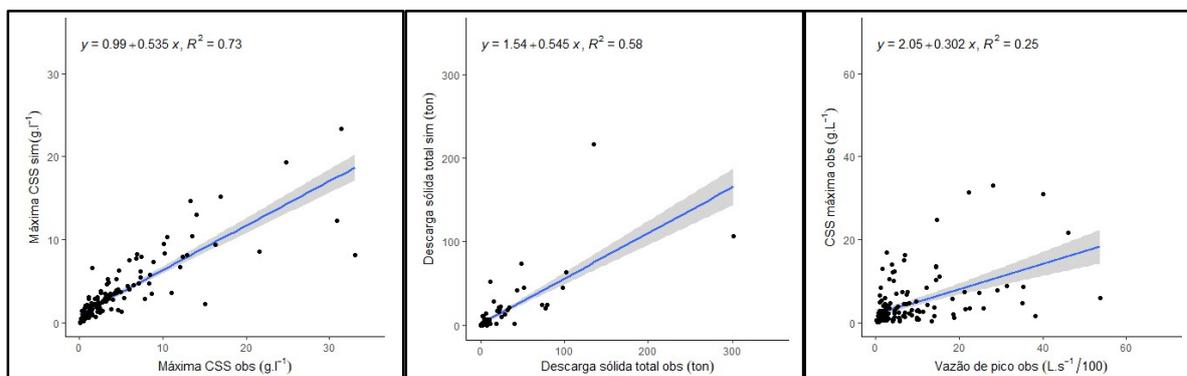
Figura 40 - Amplitude de calibração da coesão do solo nos eventos simulados



Fonte: Elaborado pelo autor

A partir dos mapas de saída das variáveis hidrológicas e erosivas que o LISEM compila ao fim de cada simulação, foi realizada uma estatística por regiões hidrológicas, para verificar o comportamento da infiltração, desagregação e deposição simulada pelo modelo. Esses resultados são derivados da simulação e não há medições diretas para avaliar a qualidade ou veracidade dos resultados. Entretanto, as visitas e observação a campo desses processos foi considerado factível. As estruturas formadoras do escoamento nas encostas, e locais de deposição nas partes baixas do relevo são evidências concretas e indicativo que esses processos vêm operando a longo prazo considerando a ocorrência dos eventos

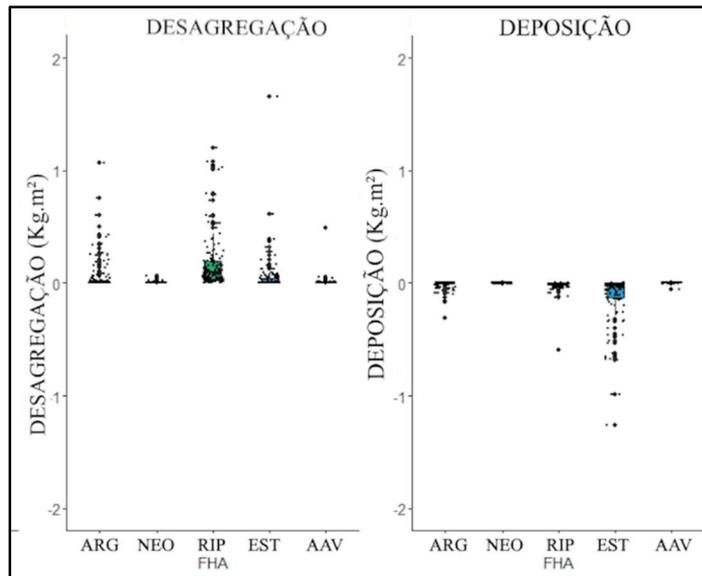
Figura 41 – Relações entre CSS_{obs} x CSS_{sim} , SY_{obs} x SY_{sim} , $Runoff_{obs}$ x CSS_{obs}



Fonte: Elaborado pelo autor

A desagregação do solo simulada pelo modelo está representada no boxplot da Figura 42. A desagregação nos Neossolos e nos Argissolos causada pelo escoamento superficial foi de pequena magnitude, segundo as simulações.

Figura 42 - Desagregação e deposição sobre as áreas hidrológicas Argissolos (ARG), Neossolos (NEO), zona ripária (RIP), estradas (EST) e áreas de afluência variável (AAV) pela modelagem



Fonte: Elaborado pelo autor.

A erosão bruta simulada pelo escoamento superficial nas encostas perfaz 74,05 % da erosão total por este meio, das estradas 20,13% e dos canais 5,70%. Do total depositado, 71,44% de deposição foi sobre as encostas, 26,73% sobre os canais, e 1,83% nas estradas. Não temos valores de deposição apenas pela fração de sedimentos aportada pelo splash. Assim, a exportação de sedimentos simulada foi de 42,11% do total desagregado (splash + escoamento) para fora da bacia (Tabela 16). O modelo calcula a desagregação e deposição sobre três aspectos: desagregação pelo splash, desagregação e deposição pelo fluxo nas encostas, e desagregação e deposição pelo fluxo nos canais.

A desagregação pelo splash é calculada sobre toda área da bacia formada por encostas (Argissolo, Neossolo, vertentes e estradas), sendo que os sedimentos se unem ao fluxo do escoamento superficial da célula. Sua resposta é função dos parâmetros de cobertura do solo ligados à vegetação e intensidade e volume da precipitação. Sua desagregação estimada pelo modelo foi 2.299.582 Kg. para o conjunto de eventos. Para o grupo 1, temos erosão média pelo splash de aproximadamente 0,008 kg.m⁻². Para grupo 2, 0,025 kg.m⁻².

Grupo 3, 0,019 kg.m⁻², e grupo 4, 0,031 kg.m⁻². Já para o escoamento superficial temos cálculo da desagregação e deposição sobre as encostas e nos canais. Sobre as encostas, 6,22% da desagregação pelo ES é gerada sobre as encostas agrícolas e florestais (Argissolo e Neossolo), 31,02% são gerados nas áreas de vertentes representadas no modelo, 12,64% sobre as estradas e 7,69% sobre a região da Várzea próxima do canal. Estes valores estão correlacionados com a infiltração sobre as áreas de encosta, que produziram pouco escoamento superficial, por serem áreas de topo de encosta, mais planas e menos potencializadoras do ES. Já nas vertentes, a desagregação foi em torno de 10 vezes maior por ser esta área a de maior declividade, onde ocorre a maior potência de fluxo concentrada de ES, proporcionando maior desagregação pela declividade e pelo acúmulo de água gerado e concentrado a partir das encostas acima. As estradas têm o mesmo tipo de comportamento, de concentrar fluxo e potência de escoamento, gerando duas vezes mais sedimentos que nas encostas. A Várzea gera mais sedimentos que as encostas e um pouco menos que nos vertentes, com alto volume de ES concentrado, mas já numa situação de relevo mais plano que desacelera o processo de desagregação e aumenta a deposição. Os sedimentos oriundos do splash, tendem a ser mais finos e facilmente transportados, se espalham pela bacia, podendo ser depositados em qualquer uma das estruturas. Os canais representam a menor parcela de desagregação no modelo, mas cumprem importante papel na deposição.

Tabela 16 - Totais de desagregação, deposição e exportação de sedimentos sobre a bacia, considerando os 150 eventos simulados.

Zonas	Desagregação		Deposição	
	kg	%	kg	%
Canais	221.151	5,70	956.172	26,73
Estradas	780.812	20,13	65.548	1,83
Argissolo	194.884	5,02	31.717	0,89
Talvegue	1.916.579	49,42	563.198	15,75
Neossolo	189.790	4,79	34.846	0,97
Várzea	574.969	14,82	1.925.106	53,82
Totais	3.878.185	100,00	3.576.587	100,00
Exportação			2.601.180*	42,11

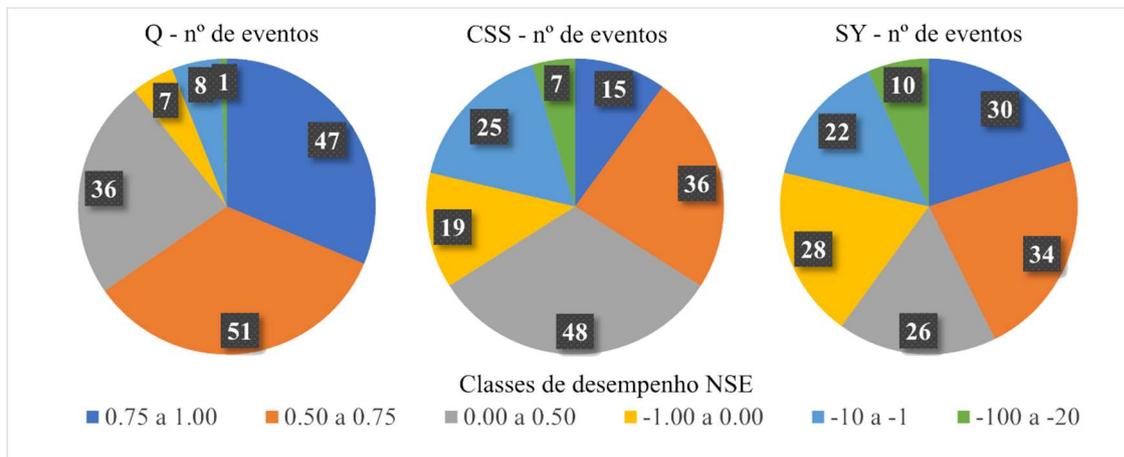
* Considerando erosão e deposição pelo Splash. Fonte: Elaborado pelo autor.

6.5 EFICIENCIA GERAL DA CALIBRAÇÃO DOS EVENTOS

O desempenho geral da calibração dos 150 eventos simulados para as variáveis de vazão de pico, concentração de sedimentos em suspensão e produção de sedimentos está demonstrado na Figura 43. Para a vazão de pico simulada, dentre os 150 eventos simulados no trabalho, 98 (65%) apresentaram NSE entre 0.5 e 1.00. Já 36 (24%) obtiveram NSE entre 0

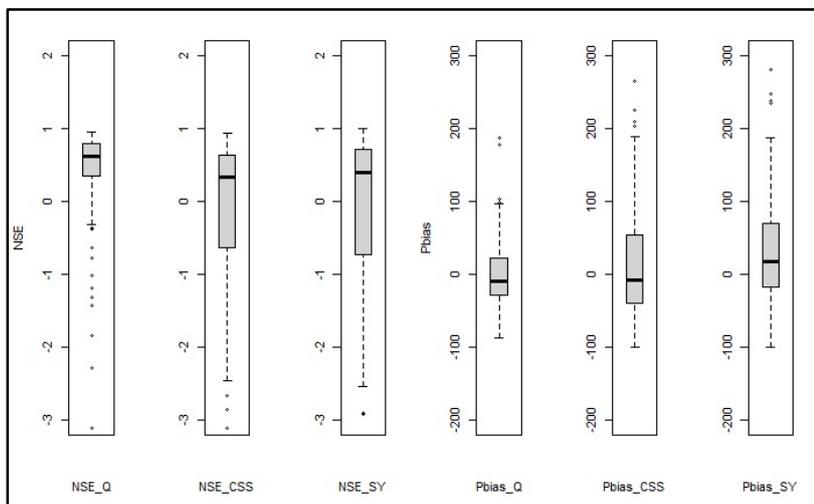
e 0.5 para hidrograma simulado, uma quantidade expressiva de eventos com bom resultado. Para a concentração de sedimentos em suspensão tivemos 48 (31%) dos 150 eventos simulados com NSE entre 0 e 0.5, considerados satisfatórios, 36 (24%) com NSE entre 0.5 e 0.75, e 15 (10%) com NSE acima de 0,75, considerados bons e muito bons; os restantes 17 (34%) com NSE < 0, são considerados insatisfatórios. Para a produção de sedimentos simulados, tivemos 64 (43%) dos eventos com NSE > 0.5, 26 (17%) deles ≥ 0 , e 60 deles (40%) com NSE < 0. A Tabela 17 apresenta os valores finais de desempenho da modelagem para todos os 150 eventos simulados, e a Figura 44 apresenta um resumo da amplitude dos valores alcançados de NSE e Pbias para cada uma das variáveis vazão, CSS e SY.

Figura 43 – Número de eventos por classe de NSE no desempenho da modelagem



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 44 - Resultados de eficiência NSE e Pbias para vazão (Q), concentração de sedimentos em suspensão (CSS) e produção de sedimentos (SY) dos eventos.



Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 17 - Resultados de eficiência da simulação

Evento	NSE Q	Pbias Q	r ² Q	NSE CSS	Pbias CSS	r ² CSS	NSE SY	Pbias SY	r ² SY
20140101	0.65	58.30	0.71	0.50	-10.20	0.44	0.57	3.20	0.38
20140408	0.23	-18.40	0.18	-0.10	56.40	0.25	-0.60	5.90	0.01
20140521	0.54	-22.50	0.50	-1.08	4.20	0.29	-3.50	52.30	0.25
20140605	0.33	-38.20	0.29	-1.09	203.60	0.04	-0.71	123.80	0.07
20141212	0.35	102.90	0.59	0.48	67.60	0.64	0.64	51.90	0.71
20150224	0.73	22.90	0.73	0.88	1.20	0.86	0.02	71.90	0.50
20150420	0.43	31.10	0.64	-0.80	134.90	0.30	-1.17	182.50	0.30
20150611	0.82	-25.30	0.68	-0.19	56.40	0.46	0.29	41.90	0.56
20150720	0.74	11.50	0.75	-19.31	264.30	0.19	-24.03	452.90	0.17
20150919	0.62	-22.20	0.63	-49.55	435.40	0.03	-301.57	1019.80	0.03
20151021	0.59	5.40	0.66	-1.55	97.00	0.31	-0.08	97.50	0.48
20151022	0.53	-50.20	0.47	-0.35	63.20	0.46	-0.62	44.80	0.41
20151222	0.75	-0.10	0.71	0.64	51.90	0.69	-0.38	104.50	0.47
20151228	0.81	10.80	0.73	-52.27	415.10	0.01	-171.90	875.70	0.05
20160320	0.80	36.20	0.78	0.82	40.50	0.84	0.71	37.00	0.73
20160325	0.61	-11.30	0.57	-96.28	882.90	0.00	-86.17	863.20	0.02
20160423	0.51	-29.00	0.34	-1.20	53.70	0.24	-0.97	16.10	0.12
20160424	0.36	20.30	0.60	-21.87	781.70	0.13	-16.65	763.20	0.13
20161017	0.85	2.70	0.86	0.06	-42.70	0.02	0.35	-32.50	0.15
20161018	0.89	-18.70	0.76	-0.27	97.40	0.47	0.26	66.00	0.57
20180121	0.59	11.20	0.70	0.55	-11.10	0.47	0.49	24.30	0.42
20180122	0.91	-32.60	0.84	0.73	-22.90	0.74	0.80	-3.60	0.70
20180123	-1.19	6.50	0.36	0.60	26.10	0.53	-0.11	57.60	0.17
20180209	0.38	65.40	0.59	0.72	-38.20	0.51	0.74	-9.40	0.59
20180220	0.82	22.20	0.78	0.70	-40.20	0.56	0.84	-9.30	0.79
20180226	0.88	26.30	0.87	0.94	-11.60	0.91	0.98	-1.10	0.90
20180315	0.79	47.70	0.74	0.92	-1.80	0.82	0.98	17.30	0.92
20180318	0.79	16.60	0.80	0.70	-35.10	0.55	0.46	-11.40	0.49
20180414	0.77	-12.60	0.66	0.68	-14.30	0.60	0.94	-14.10	0.91
20180518	0.26	-19.50	0.50	-0.25	-32.00	0.11	-0.52	-5.40	0.19
20180519	-0.13	-56.10	0.42	0.75	-50.30	0.69	0.78	-44.80	0.66
20180611	0.57	-43.50	0.51	0.39	-67.50	0.24	0.62	-58.40	0.40
20180624	0.58	-54.00	0.55	0.51	-63.90	0.37	0.62	-51.30	0.41
20180629	0.93	-6.80	0.90	0.71	-17.80	0.70	0.74	0.10	0.76
20180720	-1.84	98.90	0.38	-8.46	183.40	0.24	-66.61	683.90	0.10
20180724	0.22	-41.30	0.41	-2.67	48.20	0.17	-3.67	92.60	0.17
20180820	-1.32	-59.90	0.32	0.23	-44.70	0.26	0.27	-36.80	0.15
20180824	0.62	4.70	0.46	0.41	-8.50	0.27	0.63	-28.30	0.39
20180831	0.57	-40.90	0.42	0.08	-55.70	0.01	0.10	-82.90	0.02
20180915	0.52	-34.00	0.47	-0.04	-78.20	0.17	0.15	-65.70	0.15
20180924	0.52	-22.20	0.53	-0.63	-57.20	0.04	-0.20	-50.90	0.05
20181001	0.75	-16.20	0.66	-0.34	59.50	0.00	-0.02	55.00	0.08
20181012	0.86	54.40	0.89	0.48	98.40	0.64	0.89	30.90	0.84
20181018	0.60	-37.70	0.59	0.05	-21.70	0.56	0.40	19.10	0.58
20181031	0.55	-14.10	0.65	0.47	-42.50	0.32	0.77	-36.00	0.60
20181103	0.84	9.60	0.71	0.40	67.30	0.41	0.82	7.30	0.62
20181123	0.60	-16.70	0.50	-1.74	224.70	0.24	-2.37	187.80	0.23
20181130	0.77	20.40	0.77	0.10	67.90	0.49	-4.30	149.30	0.25
20181219	0.77	2.60	0.78	0.85	-10.10	0.67	0.95	-0.70	0.82
20181221	0.95	-10.00	0.90	0.63	26.00	0.68	0.45	50.50	0.60
20190104	0.49	-22.40	0.82	0.72	-6.40	0.51	0.83	0.10	0.81
20190106	0.89	-10.30	0.75	0.89	10.60	0.89	0.99	-3.40	0.94
20190107	0.64	-22.80	0.84	0.63	-44.50	0.64	0.70	3.90	0.69
20190111	0.62	56.10	0.70	0.46	-7.90	0.24	0.43	-17.00	0.17
20190114	0.91	-9.90	0.86	0.70	-43.10	0.50	0.71	-30.50	0.54
20190117	0.13	-40.20	0.59	0.50	-28.00	0.70	0.53	15.40	0.62
20190224	-17.91	63.20	0.22	-9.86	4.40	0.00	-423.47	540.20	0.00
20190308	0.81	0.40	0.84	0.49	73.90	0.65	0.51	116.10	0.65
20190427	0.73	21.70	0.75	0.44	69.90	0.62	0.45	39.70	0.37
20190524	0.49	16.10	0.61	0.66	-39.50	0.56	0.65	-17.40	0.49
20190527	0.59	35.30	0.60	0.16	177.10	0.56	0.69	80.00	0.75
20190530	0.78	8.60	0.79	0.81	-34.40	0.70	0.44	-6.00	0.65
20190628	0.83	-22.60	0.77	0.84	-26.40	0.72	0.79	-15.70	0.75
20190726	0.83	-19.20	0.85	0.45	-58.10	0.41	0.63	-44.60	0.43
20190730	0.23	38.40	0.54	0.27	-44.20	0.35	0.67	-8.90	0.62
20190808	0.89	-20.80	0.88	0.72	-47.00	0.56	0.78	-28.00	0.70
20190901	-0.31	35.80	0.39	-7.66	38.20	0.02	-36.97	280.20	0.04
20191002	0.22	-8.20	0.65	0.67	-38.60	0.61	0.49	14.50	0.62
20191005	0.71	42.90	0.77	0.79	10.50	0.62	0.76	-0.70	0.54
20191013	0.49	36.10	0.62	0.60	-11.40	0.46	0.40	18.30	0.35
20191016	0.59	64.20	0.67	0.62	73.00	0.68	0.48	86.30	0.65
20191017	0.44	56.50	0.61	0.14	-5.10	0.29	-1.09	66.20	0.30
20191021	0.50	22.00	0.62	0.26	1.50	0.42	0.34	32.20	0.50
20191027	0.39	88.00	0.60	0.77	20.00	0.78	0.77	38.10	0.80
20191030	0.79	36.10	0.79	0.88	-9.90	0.82	0.74	-4.50	0.69
20191104	0.58	96.80	0.65	0.70	71.60	0.69	-1.44	165.40	0.39

Tabela 17 - Resultados de eficiência da simulação

Evento	NSE Q	Pbias Q	r ² Q	NSE CSS	Pbias CSS	r ² CSS	NSE SY	Pbias SY	r ² SY
20191107	0.77	33.30	0.74	0.64	25.80	0.70	0.45	50.70	0.61
20200110	0.18	186.40	0.60	0.76	74.00	0.77	0.77	34.00	0.59
20200129	-0.38	176.90	0.45	0.36	16.30	0.33	0.38	50.30	0.35
20200204	0.63	13.00	0.67	-0.31	-69.90	0.08	-0.12	-48.00	0.12
20200225	0.62	46.90	0.61	0.32	99.80	0.57	0.29	60.90	0.43
20200406	0.72	-4.90	0.78	-4.32	-90.20	0.00	-0.85	-79.20	0.03
20200413	0.31	-53.40	0.45	-4.65	-95.00	0.02	-0.26	-91.10	0.03
20200522	-0.78	42.50	0.46	-4.10	8.10	0.03	-42.53	235.30	0.06
20200605	0.04	3.90	0.57	0.47	-64.70	0.49	-0.60	8.10	0.42
20200613	0.30	-18.70	0.66	0.31	-69.20	0.20	0.29	-10.80	0.58
20200629	0.50	-11.40	0.66	0.48	-10.40	0.67	-0.90	63.40	0.35
20200630	0.35	-46.10	0.32	0.32	54.30	0.58	0.31	14.50	0.39
20200705	0.39	-43.10	0.47	0.44	-43.00	0.39	0.73	-29.20	0.61
20200707	0.37	27.00	0.57	-3.54	820.80	0.05	-0.19	247.20	0.03
20200711	0.67	47.40	0.74	0.49	57.90	0.62	0.56	92.00	0.67
20200716	0.52	-7.90	0.63	-1.22	111.20	0.28	-0.03	100.10	0.26
20200728	0.25	-43.90	0.60	-0.57	-34.20	0.01	-2.90	33.00	0.01
20200811	0.54	-33.10	0.57	-7.28	54.90	0.26	-4.87	106.70	0.29
20200906	0.50	-23.80	0.61	0.38	-50.50	0.38	-0.20	-22.10	0.22
20200927	0.75	-11.80	0.85	0.89	-29.20	0.73	0.91	-13.80	0.75
20201128	0.85	-23.80	0.91	0.48	-68.10	0.29	0.76	-44.40	0.56
20201202	0.61	87.40	0.67	0.53	103.90	0.49	0.66	20.40	0.47
20201213	0.52	-13.30	0.63	-0.94	-76.40	0.12	-0.30	-43.20	0.55
20201217	0.73	27.60	0.73	0.59	-11.80	0.71	0.65	42.80	0.70
20201219	-0.64	-18.00	0.56	0.33	-23.90	0.71	-0.73	49.40	0.47
20210105	0.26	-39.20	0.80	-0.50	-44.50	0.54	-0.89	10.20	0.42
20210124	0.21	57.30	0.54	0.57	-61.30	0.43	-0.04	-2.80	0.35
20210126	0.88	-17.20	0.80	0.73	2.50	0.73	0.74	26.60	0.72
20210128	0.94	-21.50	0.91	0.64	29.80	0.69	0.72	29.70	0.77
20210129	-1.43	-76.50	0.31	0.12	-39.30	0.52	0.60	-18.30	0.71
20210130	0.68	-23.40	0.80	0.16	9.70	0.54	0.54	49.90	0.61
20210131	0.61	-32.80	0.91	0.39	17.10	0.61	-0.32	90.10	0.48
20210204	0.65	-33.70	0.69	-5.53	41.30	0.29	-7.02	157.30	0.25
20210223	0.85	17.80	0.80	-1.46	-49.40	0.18	-4.31	74.50	0.29
20210304	-1.02	-55.50	0.25	-6.40	-100.00	0.00	-2.49	-100.00	0.00
20210326	0.72	-36.30	0.58	0.13	-63.20	0.32	0.70	-46.50	0.57
20210521	0.62	-41.90	0.58	-1.37	22.90	0.30	-0.04	16.10	0.26
20210528	0.75	-13.50	0.71	-3.81	189.30	0.16	-6.49	237.20	0.23
20210605	0.67	23.00	0.70	0.26	-26.40	0.32	0.53	22.50	0.55
20210610	-0.36	-71.20	0.32	-4.91	-14.00	0.33	-7.06	45.30	0.26
20210624	0.33	-46.50	0.49	0.05	-65.90	0.29	0.56	-49.70	0.53
20210626	0.88	-26.80	0.69	0.32	90.80	0.57	0.89	30.40	0.79
20210627	0.78	37.20	0.76	-62.28	1000.10	0.10	-40.43	904.80	0.12
20210824	-0.01	-61.80	0.37	-1.38	-24.80	0.16	-1.33	-16.00	0.34
20210907	0.82	-4.60	0.66	0.71	42.70	0.55	0.96	5.20	0.89
20210913	0.20	12.90	0.58	0.19	2.60	0.56	-0.06	122.40	0.49
20210930	0.88	-23.20	0.83	-0.90	25.20	0.44	-1.43	80.10	0.38
20211003	0.85	-25.70	0.64	0.72	-10.80	0.71	0.91	-27.60	0.74
20211006	0.88	14.40	0.89	0.80	-43.70	0.65	0.87	-19.20	0.66
20211015	0.70	-40.20	0.51	0.59	-57.90	0.43	0.59	-57.60	0.34
20211214	0.88	-5.10	0.89	0.73	-52.00	0.61	0.84	-17.50	0.78
20220118	0.64	34.70	0.69	0.16	12.00	0.54	-0.37	69.20	0.42
20220123	0.83	5.80	0.82	-0.68	43.90	0.45	-1.08	102.10	0.40
20220126	0.95	0.20	0.91	0.60	0.80	0.72	0.77	30.30	0.72
20220222	0.84	-19.30	0.85	-3.11	-24.80	0.43	-2.91	66.50	0.34
20220225	0.93	-18.00	0.79	0.56	-37.70	0.69	0.78	-19.80	0.81
20220311	0.79	-8.50	0.84	-0.31	-34.60	0.52	-0.55	10.70	0.43
20220323	0.69	68.80	0.70	0.65	-25.80	0.40	0.86	-10.30	0.66
20220403	0.17	-45.90	0.52	-0.51	-62.80	0.30	-0.39	-40.50	0.43
20220404	0.43	-42.00	0.47	0.28	-30.70	0.29	0.29	-38.40	0.14
20220426	0.32	27.10	0.58	0.34	-61.30	0.15	0.72	-29.90	0.47
20220428	0.90	-23.20	0.79	0.16	-48.80	0.07	0.32	-61.30	0.13
20220430	-2.28	0.50	0.44	-0.04	53.50	0.24	-3.76	179.90	0.23
20220502	0.54	-36.40	0.49	-0.53	166.50	0.39	0.60	70.10	0.53
20220504	-3.10	-79.10	0.20	-5.66	-52.60	0.36	-1.86	-45.10	0.42
20220514	0.03	-46.30	0.57	0.52	-36.60	0.47	0.82	-28.40	0.71
20220528	0.35	-59.60	0.46	-2.45	18.70	0.37	-2.53	99.70	0.35
20220606	0.85	-24.60	0.75	0.44	51.60	0.61	0.81	36.10	0.74
20220617	0.55	-28.60	0.50	0.15	24.30	0.56	0.29	20.00	0.56
20220621	0.82	-18.40	0.74	0.23	37.80	0.57	0.61	27.50	0.67
20220622	-3.89	-87.20	0.07	-11.34	-81.80	0.03	-2.32	-84.80	0.07
20220712	0.73	-35.80	0.63	0.83	0.50	0.83	0.81	0.40	0.83
20220714	0.86	-7.80	0.76	0.40	-21.70	0.70	0.65	-11.30	0.56
20220716	0.90	-17.80	0.92	0.63	20.50	0.65	0.59	66.90	0.62

NSE Q: Nash Sutcliffe para vazão; NSE CSS: Nash Sutcliffe para concentração de sedimentos em suspensão; NSE SY: Nash Sutcliffe para produção de sedimentos. Fonte: Elaborado pelo autor

7 DISCUSSÃO

7.1 DIRETRIZES E LIMITAÇÕES DA MODELAGEM COM LISEM.

Buscamos neste trabalho investigar questões recorrentes na modelagem com o modelo erosivo LISEM, um modelo referenciado como de grande potencial, quando bem calibrado, para simular bacias onde a característica seja a erosão hídrica promovida pelo escoamento superficial (TAKKEN *et al.*, 2005). Embora tenhamos conhecimento acerca dos processos de perdas mensurados no exutório da bacia hidrográfica, continua sendo um desafio entender como ocorre a transferência de água e sedimentos entre a bacia vertente e o exutório (DE BARROS, Cláudia Alessandra Peixoto *et al.*, 2021). A bacia foi objeto do projeto *Soil Under Global Change* (SOGLO) desenvolvido com parcerias entre pesquisadores da universidade europeia KU Leuven e a Universidade Federal de Santa Maria, que deram origem a vários estudos, entre eles dois relacionados com os processos hidrológicos, um sobre o monitoramento e comportamento da umidade do solo (ROBINET *et al.*, 2018b), e outro sobre a modelagem conceitual dos processos hidrológicos superficiais e subsuperficiais (ROBINET *et al.*, 2018a). Além de aspectos das encostas, como umidade e condutividade hidráulica, os processos de conectividade que ocorrem na escala intermediária entre as encostas e a rede de drenagem parecem ser a chave para avançar na modelagem (WOHL; MAGILLIGAN; RATHBURN, 2017). O modelo tem capacidade de em um só conjunto de simulação de processos, avaliar o comportamento das encostas, da rede de drenagem, do canal principal, auxiliar na investigação da conectividade hidrossedimentológica em bacias e de diferentes processos erosivos das encostas (GRUM *et al.*, 2017).

As pesquisas envolvendo o uso do modelo procuraram identificar soluções para a sua correta calibração através de melhorias na qualidade e resolução espacial das variáveis de entrada e na verificação das habilidades de seu aparato de equações em representar os processos hidrológicos da bacia (HESSEL, 2005; JETTEN; GOVERS; HESSEL, 2003). Mas deparamo-nos com o desafio de obter informações para alimentar o modelo perante a enorme variabilidade espacial da condição natural dos fatores controladores e no elevado nível de incertezas ainda presentes nos resultados da modelagem a partir destas abordagens (HUANG; LEE, 2009; LAUDON *et al.*, 2007). Em contraponto à busca de melhor discretizar características de aspectos físicos pontuais do meio físico relacionados com os dados de entrada ao modelo, como características de plantas, de solos e aspectos ligados ao uso e manejo, buscamos focar as atenções sobre a identificação de processos (MINELLA *et al.*,

2010; PARSONS, 2019; WALLING; ZHANG, 2004). Tanto processos hidrológicos de formação do escoamento como de conectividade de água e sedimentos, com olhar sistêmico sobre a bacia, sendo ela um sistema integrado onde encontramos vários órgãos estruturais com aspectos funcionais que contribuem para os processos hidrológicos da bacia e que vão além da atuação de células individualmente (BRACKEN *et al.*, 2013; XIAO *et al.*, 2022). Sob a ótica de Troch *et al.* (2009), o autor conduz justamente ao raciocínio desta mudança de paradigma, que tem sido alentada para a hidrologia moderna. A visão tradicional de que os processos hidrológicos em escala de bacia podem ser modelados e compreendidos a partir do entendimento dos processos em pequena escala, tem sido substituída por uma visão de entendimento que observa os processos considerando a heterogeneidade da paisagem. Segundo ele, apesar da grande variabilidade das propriedades da paisagem, existe estrutura e organização entre as escalas espaciais e temporais, que uma vez compreendidas como e porque acontecem, podem auxiliar a modelagem. Nos valendo desta visão, procuramos identificar estas estruturas e a organização espacial dos fatores controladores da erosão hídrica na paisagem da bacia de Arvorezinha.

7.2 SOBRE OS EVENTOS DE PRECIPITAÇÃO.

O bom desempenho das simulações é corroborado pela qualidade dos dados de monitoramento, pelo grande número de eventos considerados, de diferentes magnitudes de volume, intensidade, condições de umidade antecedentes, duração, épocas do ano, situação dos cultivos sobre a bacia, entre outros. Em termos de precipitação incidente, entendemos que volume e intensidade da chuva afeta a forma como o escoamento é formado. Sobre os 150 eventos selecionados para a modelagem, temos distintos grupos de comportamento da precipitação. A análise de cluster gerou grupos em função do conjunto de variáveis analisadas. A AC identificou que os eventos apresentam comportamentos diferenciados em função da intensidade de precipitação, sendo a principal componente explicativa da geração do escoamento. podendo evidenciar comportamentos em função destas características, como do efeito das áreas úmidas e das formadoras diretas de escoamento em relação a eventos de menor, média e maior intensidade.

O expressivo número de eventos simulados de diferentes comportamentos da precipitação é um diferencial no contexto de modelagem de pequenas bacias hidrográficas, o que traz maior confiabilidade para corroborar as hipóteses apresentadas sob um universo maior de condições ambientais (DE MENEZES; MINELLA; TASSI, 2020). A variabilidade de condições de eventos permite explorar melhor os fatores controladores como entrada ao modelo, entretanto, a resposta das simulações é majoritariamente em níveis considerados

pouco satisfatórios. Além disso, a simulação de pouco número de eventos não traz confiabilidade sobre a origem dos processos e dos fatores controladores associados. Temos também as próprias deficiências estruturais do modelo em representar certos processos pela inadequada representação dos fatores da paisagem na entrada. Parte dos processos ocorrentes na bacia não são contemplados na modelagem, pelas habilidades do modelo (GOVERS *et al.*, 2011; MCMILLAN *et al.*, 2011).

Pela Tabela 12 podemos avaliar o comportamento dos eventos em cada grupo em particular. Entre os eventos, temos o grupo 1 no qual temos eventos de menor geração de escoamento. Estes eventos, provavelmente não geraram escoamento significativo nas encostas, mas ainda assim, são responsáveis pela geração de escoamento nas áreas de fragilidade. Estes eventos tiveram importância para calibrar os eventos e testar o funcionamento da área de drenagem expandida e estradas, bem como da condição de umidade das Várzeas. Já os eventos de média magnitude do grupo 2, certamente além das condições propiciadas pelas regiões mais baixas do relevo, tiveram influência do escoamento na área de Vertentes e encostas agrícolas. Os eventos dos grupos 3 e 4, de maior intensidade e volume de precipitação certamente tiveram contribuição de todas as áreas da bacia, inclusive das encostas agrícolas nos Argissolos e nos Neossolos. Estes eventos apresentam os valores observados, incluindo escoamento superficial e subsuperficial combinados.

Para avaliar o escoamento superficial, necessitamos avaliar o comportamento da precipitação incidente, da atenuação da precipitação por aspectos de cobertura e características de superfície do solo, da infiltração de água no solo, do meio de propagação do escoamento superficial após formado e possíveis condições de conectividade dos fluxos e sedimentos ao longo do caminho até o exutório (MINELLA *et al.*, 2007). A atenuação da precipitação pela vegetação e características da superfície são consideradas pelo modelo, mas ele é pouco ou menos sensível ao ajuste dos parâmetros ligados a elas. A investigação sobre a distribuição espacial dos usos (MINELLA *et al.*, 2018; MORO, 2011a), do manejo, rugosidade, características de armazenamento na superfície e valores de parâmetros associados na calibração, mesmo que bem representados e com melhor fidelidade em relação à resolução espacial, trouxeram poucos avanços nos resultados dos índices de desempenho. É o caso por exemplo do relevo, onde métodos de determinação e resolução espacial dos mapas de entrada foram investigados (DE BARROS, C A P *et al.*, 2021; HESSEL, 2005). Também obtivemos avanços para a identificação e qualificação de processos hidrológicos em paralelo ao escoamento superficial e de métodos para quantificá-los com maior acurácia. Temos por exemplo, o uso de filtros matemáticos para a separação do escoamento subsuperficial do

superficial, operação necessária ao usar o LISEM devido sua limitação em representar bem a conectividade dos fluxos subsuperficiais no solo (BERNARDI, 2018a). Estes temas inclusive dominam as pesquisas pela comunidade científica e que se propõem em trazer melhoria nos resultados bem como melhor conhecimento dos processos e aspectos envolvidos na infiltração da água no solo, formação do escoamento superficial e subsuperficial. Embora o LISEM ofereça rotinas básicas para propagação de fluxos subsuperficiais, é uma condição de bacias ao qual ele não se propõe a ser utilizado pela sua deficiente condição de representar tais processos, sendo ele especializado na simulação de processos superficiais. Melhoria no seu desempenho pode ser obtida pela melhor identificação das origens e proporções da mistura de escoamentos presentes em bacias onde o modelo será aplicado, melhorando a assertividade dos modelos de separação matemáticos (AMEIJEIRAS-MARIÑO *et al.*, 2018; ROBINET *et al.*, 2018a; RUSJAN; MIKOŠ, 2015; ZHAO *et al.*, 2013).

Para evoluir na modelagem da infiltração de água no solo e formação de escoamento pelo modelo, conteúdo de água no solo, condutividade hidráulica saturada e aspectos de conectividade dos fluxos superficiais em sistemas de bacia, são ações com melhor potencial de resultados, tanto pela magnitude de valores quanto pela sua distribuição espacial (DOS SANTOS *et al.*, 2021; NOORDUIJN *et al.*, 2023; ROBINET *et al.*, 2018b). Determinação destas variáveis são amplamente pesquisadas na literatura, sendo temas que apresentam grande desafio para serem quantificados e parametrizados nos modelos. Temos avanços substanciais no entendimento dos processos hidrológicos que ocorrem nos solos, mas autores apontam lacunas na forma de representar a transferência de matéria e propagação dos fluxos destes processos entre a micro e pequena escalas para escalas maiores (FENICIA *et al.*, 2014; MINELLA *et al.*, 2018). Neste ponto, investigamos mais atentamente qual é o elo na modelagem que falta desenvolver para melhorar a capacidade preditiva dos modelos de base física e distribuída como o LISEM. Em função da pouca compreensão e limitada capacidade técnica e financeira para mensuração da conectividade em bacias, o uso de modelos avançados de base física e distribuída tem importante papel a cumprir na modelagem e estudo de processos erosivos (VAN DE GIESEN *et al.*, 2011). Apesar das suas limitações para representar processos subsuperficiais com detalhes, ele é muito competente em representar os superficiais a que se propõe, sendo bem equipado para representá-los explorando uma das suas principais habilidades que é discretizar na modelagem a condição da paisagem da bacia. Mas além da capacidade técnica do modelo propriamente, outro fator é muito importante no sucesso da modelagem, a habilidade do operador na percepção dos processos na bacia e a sua capacidade de alimentar adequadamente o modelo (SEIBERT; MCDONNELL, 2002;

TODINI, 2007). Envolve a arte desenvolvida pelo operador em traduzir aspectos sobre a bacia e processos hidrológicos para dentro do modelo, sendo que esta afirmação não tem caráter de diferenciar as capacidades individuais dos operadores, mas sim de enaltecer o fato de que grande parte do sucesso na modelagem depende da identificação, adaptação e inserção das características da bacia para dentro do modelo, que tem muito potencial para isso ainda a ser explorado.

Tradicionalmente para a modelagem do escoamento no LISEM, os parâmetros são fornecidos ao modelo através de tabelas cujos valores são atrelados às classes dos mapas base de usos (camada superficial) e de tipos de solos (segunda camada). Dalbianco (2013) e Barros et al. (2014) através de cuidadosa caracterização das camadas e propriedades do solo, levaram a calibração de valores de Ksat mais adequadas em simulações com o modelo. Entretanto, nesta abordagem, temos forte generalização da espacialidade de parâmetros como conteúdo de água no solo e condutividade hidráulica saturada, considerando que todas as células que pertencem a um determinado uso ou tipo de solo sobre a encosta possuem os mesmos valores de parâmetros, o que nem sempre é verdadeiro. Dalbianco (2013a) em tese de doutorado, com foco em caracterizar a infiltração de água no solo, investigou a variabilidade espacial das propriedades físico-hídricas do solo, e com isso avaliou o desempenho do modelo, mas não houve clara identificação do desempenho da aplicação desta variabilidade nas modelagens, ou pelo menos, com elevada incerteza intrínseca. Neste estudo retiramos o foco de investigação sobre características muito pontuais sobre solo, uso e cobertura, e sobre como lidar com a variabilidade espacial dos parâmetros, por desconhecermos a complexidade das interações destes fatores na paisagem. Em contraponto, focamos o olhar para a estrutura e funcionalidade de sistemas no contexto de escala intermediária entre encostas e canais e na escala macro de bacia, considerando que o relevo tem forte influência sobre os processos mais importantes de formação do escoamento superficial. Como a variabilidade espacial dos fatores é um desafio para ser mensurado e de alto custo para ser detalhado nos modelos, aliamos simplificações do sistema com a necessária manutenção da representação das estruturas ao qual temos maior domínio de sua funcionalidade e que tem alto impacto na hidrologia de superfície.

Este trabalho representa apenas uma das possíveis visões conceituais de modelagem, mas com forte atenção para representação dos processos hidrológicos na escala de bacia. Estes processos, sendo importante justificar a estratégia utilizada, envolvem muitos aspectos qualitativos e quantitativos que são intangíveis, não são possíveis de mensurar facilmente seu comportamento, mas eles são notados na bacia nos eventos (PANDE *et al.*, 2012; PANDEY; CHOWDARY; MAL, 2007). Para responder as questões motivadoras da execução deste

estudo, sobre a calibração de valores de condutividade hidráulica nas encostas fora dos padrões de contexto, formulamos as hipóteses apresentadas, direcionando os esforços para melhor identificar e representar os processos e estruturas envolvidas na formação do escoamento superficial direto no contexto de bacia. Esta representação, notadamente negligenciada nos trabalhos anteriores específicos de modelagem sobre a bacia, tem evoluído e obtido resultados (BATISTA *et al.*, 2019; SILVA *et al.*, 2021), podendo ser a resposta para melhorar os índices de desempenho. A identificação e o mapeamento de locais diferenciados quanto ao comportamento para infiltração de água no solo são de difícil execução à campo, sendo que grande parte de sua identificação depende de observação visual, comprovando sua existência e sua atuação (AGUILERA *et al.*, 2022; BIDDOCU *et al.*, 2017) . Entretanto, ferramentas metodológicas podem ser utilizadas no processo, como o uso de índices topográficos e algoritmos matemáticos e computacionais para sua representação e a própria modelagem como ferramenta de tomada de decisões. Com modelagem associada com monitoramento, o LISEM com equacionamento competente com base em sólidas evidências científicas para sua concepção, é uma ferramenta que permitem unir os diferentes processos erosivos individuais em um só conjunto de simulação, onde podemos inferir sobre possíveis processos de conectividade que possam estar ocorrendo entre as encostas e a rede de drenagem, e entre estas e o canal principal e o exutório (MINELLA; MERTEN, 2012b; POURGHASEMI *et al.*, 2020; SYTSMA *et al.*, 2020).

7.3 REPRESENTAÇÃO DAS ESTRUTURAS HIDROLÓGICAS FRÁGEIS.

A criteriosa observação dos processos hidrológicos da bacia, com um olhar sistêmico sobre o conjunto da paisagem nas diferentes escalas, possibilitou a identificação mais acurada da formação do escoamento superficial e subsuperficial na bacia e do papel das estruturas hidrologicamente frágeis no processo. A representação destas estruturas que tem importante impacto nos processos de infiltração na escala intermediária entre as encostas e o canal principal, permitiu compreender melhor representar os processos de formação e transferência do escoamento (BUTTLE, 1994; FREI; FLECKENSTEIN, 2014; REID *et al.*, 2007; WILLIAMSON *et al.*, 2015; YOO *et al.*, 2014). A bacia é formada por relevo acentuado e vales encaixados que propiciam rápida resposta na condução do ES entre as encostas e o exutório. O relevo atua nos processos hidrológicos no solo, impacta na distribuição da umidade no solo, na textura da camada superficial, no acúmulo de matéria orgânica, no processo erosivo e profundidade das camadas e do perfil. As estruturas hidrologicamente frágeis, foram identificadas com auxílio de ferramentas de análise do relevo e pelo monitoramento direto com observações a campo. A representação das áreas de baixa

permeabilidade e sujeitas à saturação e formação do escoamento superficial no modelo, permitiu a menor necessidade de alterar os valores de condutividade hidráulica nas encostas agrícolas para valores abaixo do seu estimado. Pelo levantamento topográfico preciso, foi possível gerar índices topográficos que auxiliaram o mapeamento de áreas sujeitas à concentração e saturação pela umidade, como preconizado por Minella (2012a). O relevo e posição geográfica na paisagem promovem a concentração de umidade no perfil do solo, proporcionando um gradiente de umidade entre as partes mais altas das encostas e as depressões do relevo. Uma mesmo solo sob condições de relevo acentuado apresenta perfis com características hidrológicas diferentes ao longo do seu sentido longitudinal e transversal. Portanto, a distribuição do conteúdo de água no solo na paisagem sofre influência do relevo, posição topográfica, formato das encostas e cobertura vegetal.

7.3.1 Comportamento das encostas

Além da condição natural, esculpida pela erosão na natureza, temos a ação antrópica pela agricultura e manejo das áreas das propriedades, que procuram facilitar o trabalho com máquinas agrícolas nas culturas. Um estudo publicado por Minella (MINELLA *et al.*, 2007), aplicou a técnica do fingerprint comparando duas pequenas bacias agrícolas (Agudo e Arvorezinha) de características ligeiramente diferentes, mas que obtiveram resultados semelhantes de fontes de sedimentos, sendo em Agudo, lavouras (68,3%), estradas (28,1%) e rede fluvial (3,6%), e em Arvorezinha, lavouras (55,5%), estradas (37,6%) e rede fluvial (6,9%). O método adotado foi eficaz na discretização das fontes, sendo as lavouras as principais contribuintes. A investigação sobre a ação climática e antrópica sobre esta pequena bacia hidrográfica rural, foi abordada por Minella (2018) com auxílio de procedimentos estatísticos. Foram computados dados climáticos e áreas superficiais ocupadas pelo uso e manejo sobre a bacia, no entanto, não foi considerado a distribuição espacial destes fatores na análise, o que é considerado importante do ponto de vista dos processos hidrológicos ligados à erosão. As ações de manejo causam diminuição da rugosidade superficial sobre as encostas, favorecendo o escoamento, e a formação de planícies aluviais pelo soterramento de baixadas e sobre matas ciliares. Estes locais não eram tão frequentes, mas o manejo nos últimos anos mais intenso através de trabalho com aplainamento do solo por máquinas pesadas tem sido realizado na bacia. Os Argissolos ofereceram nos resultados, pouca ou nenhuma deposição, por serem as regiões mais altas do relevo onde se iniciam os processos de escoamento superficial e de erosão. Neossolos da mesma forma, pela sua alta declividade, tanto na encosta como no contato com a rede de drenagem, e tipo de cobertura vegetal, oferecem menor probabilidade de desagregação e deposição. Lopes (2008) aplicou o modelo *Century* para

avaliar a dinâmica do carbono orgânico do solo submetido ao uso agrícola e florestal. Demonstrou que a monocultura do fumo causou um decréscimo de 60% do COS e, áreas cultivadas desde 1925, e de 28% em áreas cultivadas a partir de 1985. A desagregação pelo escoamento no modelo, é resposta direta do escoamento superficial, através da equação da potência de fluxo. Se nas encostas agrícolas estimamos bons níveis de infiltração de água no solo pela alta condutividade hidráulica, esperamos pouca formação de escoamento superficial nestas encostas. O principal aporte de sedimentos desta área se deve ao impacto da gota pelo splash, onde a translocação dos sedimentos é feita a poucas distâncias. Mello (2006) estudou o efeito do sistema de manejo (plantio convencional, cultivo mínimo e plantio direto) sobre os atributos do solo, movimentação de sedimentos e exportação de carbono orgânico sobre a bacia. Concluiu que a maior perda de carbono, efeito do formato da encosta e transporte de sedimentos ocorreu em sistema de cultivo convencional, seguido do cultivo mínimo e em menor escala no plantio direto.

Eventualmente, sob condições de pouco volume de escoamento nas encostas, a desagregação acontece nas linhas de maior fluxo concentrado, seguindo as canchadas das encostas. Nas encostas agrícolas, nos pontos de concentração do fluxo do escoamento superficial, a profundidade geralmente também é menor, ou atingindo a própria rocha, ou uma camada compactada alguns centímetros abaixo da superfície. Estas são vias de tráfego de água prioritariamente de forma concentrada, e não laminar. A extensão da rede de drenagem sobre as encostas, retira a água do sistema para ser direcionado por canais, que pela sua configuração de alta coesão, resulta em pouca desagregação. Mas atua como um ótimo condutor do escoamento gerado à montante dele. Neste caso, o processo erosivo pelo escoamento superficial pode estar sendo subestimado sobre as encostas agrícolas. As vertentes e as estradas têm o mesmo tipo de comportamento, sendo que a declividade nestes locais favorece o escoamento superficial, e as estruturas presentes ali favorecem a condução de água e sedimentos, se aproximando muito do comportamento de canais. A extensão da rede de drenagem no modelo proposto também colabora para que nestes locais dificulte a deposição ou mesmo não ofereça oportunidade de reinfiltração da água.

A qualidade do modelo digital de elevação preparado e usado no modelo corrobora para que o processo tenha boa representação. Do ponto de vista hidrológico, sem considerar outras estruturas que podem promover a desaceleração do escoamento, como medidas conservacionistas, vegetação ripária protetora dos canais, que podem melhorar esta atuação, a modelagem representou com sucesso o processo. Através da extensão da rede de drenagem sobre a região das vertentes além dos domínios da Várzea e do canal do rio, representamos

melhor o processo descrito de escoamento sobre as linhas das vertentes nas encostas, respeitando aspectos de dimensões de seção transversal. Estas são estruturas, esculpidas pelo relevo ou pela ação humana, que podem eventualmente sofrer um manejo de preparo do solo que restabelece a condição de solo poroso normal, mas que nos primeiros eventos de chuva assume novamente a condição de se aproximar de um canal quando da formação do novo escoamento e exaurimento do solo ali existente. A cultura de tabaco, é desenvolvida sobre camalhões que reproduzem tal comportamento, bem como as áreas sobre plantio direto, onde o trânsito de máquinas é mais intenso, assumem o papel de um solo compactado na superfície. O escoamento nas estradas se assemelha muito ao comportamento do fluxo concentrado sobre estruturas de canais. Estas estruturas apresentam, baixa condutividade hidráulica, apresentam ciclos mais rápidos de umedecimento e secagem, e são fontes de sedimentos e formação do escoamento superficial em qualquer situação de magnitude dos eventos, desde os pontos mais baixos até locais elevados nas encostas. Esta estrutura de rede de drenagem tem um comportamento de certa forma perene, já bem definido pelo relevo, sofrendo alterações eventuais nas encostas por conta do manejo agrícola, mas quase sempre presentes e contribuindo para a formação do escoamento ao longo de todo ano.

7.3.2 Rede de drenagem expandida

Em função das características de rápida resposta da bacia para com o escoamento superficial, entendemos que com auxílio da representação do sistema de drenagem com as estruturas expandidas no modelo estamos reproduzindo melhor a condição natural do meio para o escoamento. Ao expandirmos a estrutura de drenagem com canais e representação de áreas sujeitas à saturação na bacia, estamos promovendo maior conectividade entre as encostas e os canais. Isto facilita a condução e formação de volume de água de escoamento no modelo, que rapidamente encontra um caminho mais direto com o exutório. A rede de drenagem expandida foi representada, numa primeira tentativa, com um mapa de canais mais amplo sobre as encostas que se mostrou exagerado para os pequenos eventos, causando mais escoamento do que o observado. Um segundo mapa, com a redução da amplitude de atuação da rede de drenagem, limitando as áreas impermeáveis, obteve-se o correto ajuste que contemplou a maior parte dos eventos. A melhor resposta da simulação da vazão de pico indica que a representação das estruturas formadoras do escoamento, principalmente pela expansão da rede de drenagem, teve ação positiva no comportamento da vazão sobre as estruturas de canais. Estas estruturas têm caráter mais perene, impondo condições que pouco se alteram ao longo dos eventos, contribuindo para que o fluxo de pequenos e médios eventos seja melhor representado.

Outra estrutura de comprovado alto impacto sobre a conectividade dos fluxos sobre a bacia são as estradas. As estradas na bacia não foram planejadas considerando a formação do relevo para uma melhor preservação ambiental. Assim, elas cortam a bacia, dividindo as encostas e recolhendo e conduzindo os fluxos no intermédio entre as encostas agrícolas e o canal principal em muitos pontos. Ao captar água das encostas, pelas suas características de serem fontes de renovação de sedimentos pelo manejo, pouco permeáveis e como estruturas com canais escoadouros laterais impermeáveis As estradas tiveram a maior contribuição por serem importantes estruturas do ponto de vista de conexão e condução dos fluxos entre as encostas para o canal principal, com grande concentração de fluxo, declividade acentuada, serem configuradas como estruturas sem cobertura vegetal, aceleradoras do escoamento, comportamento este no modelo que muito se aproxima dos processos observados em campo. As estradas, quando integradas ao sistema da rede de drenagem geral da bacia, melhoram a representação da conectividade estabelecida por elas dentro do contexto de bacia, com comportamento semelhante ao de um canal.

7.3.3 Representação de áreas sujeitas à concentração de água no solo.

As regiões limítrofes dos canais principais têm contribuição para a formação do volume e conectividade do escoamento superficial nos eventos, representando uma parcela maior de participação destas áreas do que julgada previamente. (DE ROO, 1998; MINELLA; MERTEN, 2012a). O uso do TWI como fonte de referência para delinear esta região se mostrou adequada, com boa aproximação da delimitação das principais regiões sujeitas ao alagamento observadas na bacia. Isto foi obtido pelo ajuste fino no ponto de corte dos valores de TWI para compor o mapa da área. A resposta deste processo é caracterizada pela vazão de pico mais acentuada, e volume de escoamento superficial maior. Já para a Várzea, temos o que parece ser o comportamento mais semelhante entre o modelado e o observado na bacia. A Várzea, por ser a região que recebe o maior fluxo de escoamentos, pela concentração de canais conectores entre as encostas e o canal principal, é aquela que apresenta os maiores valores de desagregação. Mas pela diminuição da declividade e diminuição da potência de fluxo, favorece também o processo de deposição. A deposição simulada nestes locais foi alta, refletindo o processo de deposição de sedimentos e desaceleração dos fluxos pelo relevo. Os próprios canais principais e as regiões limítrofes da Várzea, recebe uma precipitação direta de boa parte do volume escoado. Alguns pontos de conectividade entre as encostas e o canal principal, assumem comportamento perene, como valetas e canais já bem consolidados, por serem o caminho preferencial natural escolhido pela água para se inserir ao canal. Avanços no sentido de investigar a conectividade da água como meio de transporte de sedimentos entre a

encosta e canal foram realizados sobre a bacia, como origem das fontes de sedimentos (MINELLA *et al.*, 2007), balanço de sedimentos (MINELLA; WALLING; MERTEN, 2014), mistura de componentes dos fluxos (BARROS *et al.*, 2020), transferência de poluentes (DE BASTOS *et al.*, 2021), (BARROS *et al.*, 2014), impacto das entradas (SILVA *et al.*, 2021), mobilidade e transferência de carbono (MORO, 2011a), cenários conservacionistas (MINELLA *et al.*, 2018), entre outros.

7.4 EFICIÊNCIA DA SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA

O bom desempenho das simulações é corroborado pela qualidade dos dados de monitoramento, pelo grande número de eventos considerados, de diferentes magnitudes de volume, intensidade, condições de umidade antecedentes, duração, épocas do ano, situação dos cultivos sobre a bacia, entre outros. Não realizamos a análise de todos os eventos simulados individualmente, mas usamos alguns exemplos para evidenciar a complexidade de condições inseridas no contexto da modelagem, bem como os bons resultados e as deficiências apresentadas. Tivemos um bom desempenho na calibração, principalmente nos eventos de pequena e média magnitude, com menor assertividade para os de grande magnitude para alguns eventos, notadamente os mais complexos em termos de picos de precipitação e forma do hidrograma. De forma geral houve a tendência de formação de picos de vazão com mais rápida ascensão e mais rápida recessão pelo modelo, com picos de formato mais agudo do que o observado, o que pode ser causado pela calibração insuficiente de outros parâmetros ligados ao escoamento como n de Manning que não foi atuado neste trabalho. A considerável quantia de eventos monitorados e simulados deste estudo, enriquece o conhecimento obtido sobre a modelagem, que se somam aos estudos anteriores de Moro (2011b), Dalbianco (2013a), simulando 20 eventos, Barros (2012), onde simulou 10 eventos, Schlesner (2017) com 20 eventos, Silva (2021) com 8 eventos.

Da mesma forma que alimentar o modelo depende da percepção do operador, analisar o desempenho da modelagem também envolve certa subjetividade pois avaliar o impacto de diferentes arranjos espaciais de variáveis é difícil de interpretar numericamente, não temos medições pontuais para validar matematicamente a ação da conectividade por exemplo, mas apenas seus índices de eficiência da modelagem que podem ser comparados com os resultados encontrados no exutório através de variáveis nem sempre correlacionadas com o fenômeno. Mesmo o modelo tendo ferramentas de detalhamento da informação dos resultados de forma espacial sobre a bacia, não temos observações quantificadas a campo, temos apenas observações subjetivas sobre a intensidade e local de ocorrência dos processos. Considerando estas limitações, procuramos replicar estruturas e processos nos mapas de

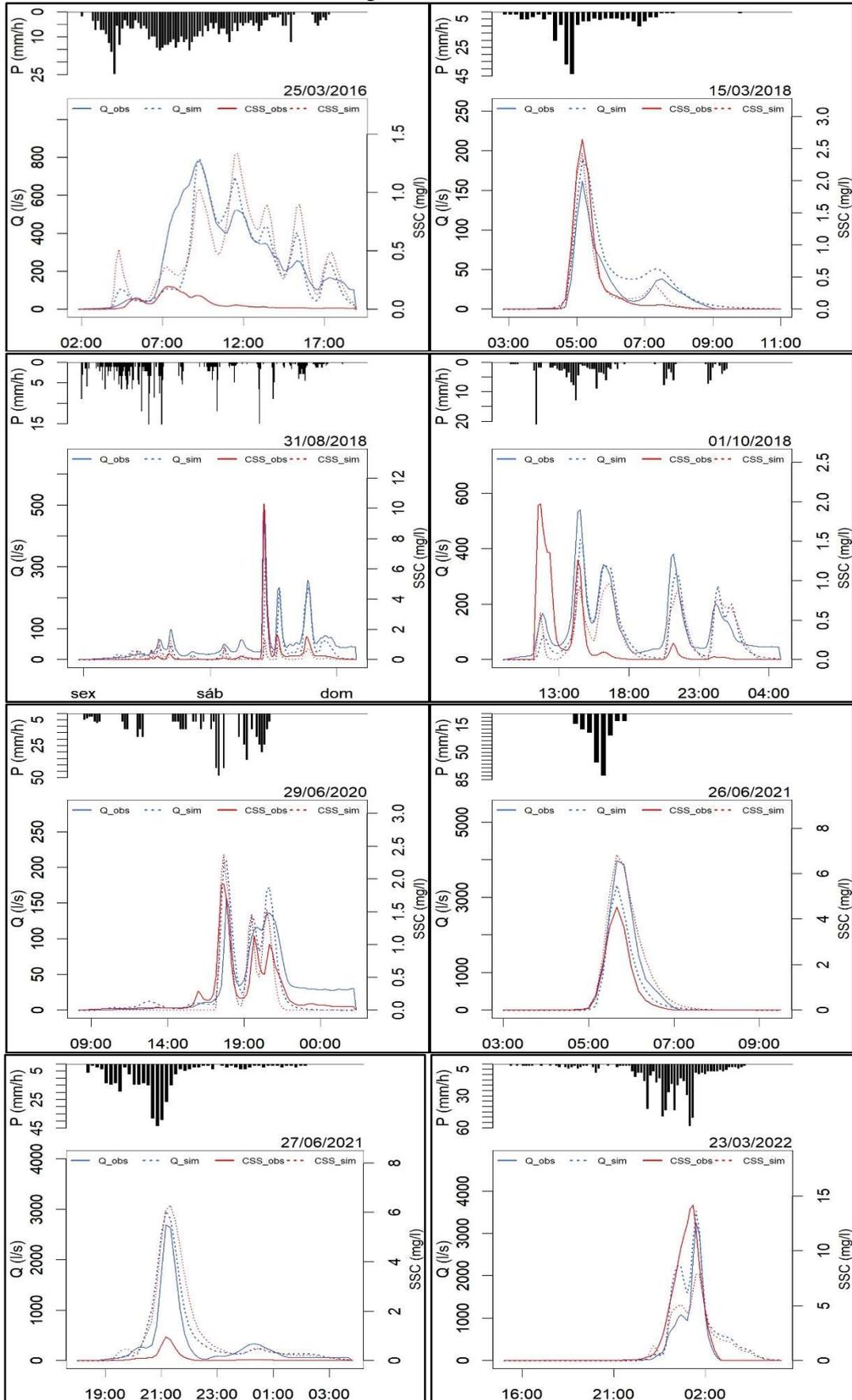
entrada do modelo LISEM com base na observação destas à campo nos eventos, e pelas manifestações da erosão deixados na bacia após eventos pontuais ou como resultado de vários eventos consecutivos. Estas observações reúnem evidências de regiões que comprovadamente são caminhos preferenciais na superfície, mais sujeitos à erosão pelo escoamento e onde existe acúmulo de deposição de sedimentos.

Além disso, a grande variabilidade de condições entre os eventos leva a efeitos diversos sobre o escoamento, nem sempre relacionados com a adoção dos tratamentos propostos, mas devidos a outros fatores e variáveis não analisadas. Embora a vazão de pico tenha participação de escoamento subsuperficial nos eventos, é maior a probabilidade de existência de escoamento superficial originado a partir de pontos mais próximos dos canais, que se manifesta na vazão de pico nos momentos iniciais dos eventos até o início da recessão no ponto de inflexão do hidrograma. Existe a maior probabilidade de que até o ponto de pico de vazão, o caudal seja predominantemente composto por escoamento superficial. A partir deste ponto, é maior a probabilidade de que ocorra diminuição da ocorrência de escoamento superficial e predominância de escoamento subsuperficial, especialmente a partir do ponto de inflexão do hidrograma. A proporção de mistura de componentes superficiais e subsuperficiais fica mais difícil de ser determinada nesta condição, sendo difícil validar o desempenho do modelo considerando as etapas finais do escoamento.

No evento 20160325 temos uma precipitação de 101 mm com chuva antecedente de dois dias de 29.5 mm, uma condição de umidade do solo muito úmida, A intensidade máxima de 30 minutos foi de 24,63 mm o que contribuiu para um hidrograma de menor vazão, sendo esta vazão mais persistente ao longo do evento, o que foi bem representado pelo hidrograma simulado. Já a CSS não teve boa representação, acusando maior CSS simulada do que a real, provavelmente devido à ocorrência da chuva anterior que exauriu os sedimentos. O mês de março tem pouca movimentação de solo sobre a bacia, o que contribui para a pouca disponibilidade de sedimentos. Obtivemos um NSE 0.61 e Pbias de -11.3 nesta simulação, valores bons considerando a complexidade de um evento muito longo e formado por vários picos de escoamento. O evento 20180315 teve precipitação de 38 mm com pico de intensidade de 43.42 mm, um evento mais concentrado no tempo com apenas um pico bem definido. Neste evento o modelo apresentou muito bons resultados de simulação, com NSE 0.79 para hidrograma e NSE 0.98 para produção de sedimentos. Mesmo com menos da metade do volume, O I30 deste evento tem o dobro da intensidade em relação ao evento também de março descrito anteriormente, o que equalizou a produção de sedimentos, pela maior desagregação do solo. O evento 20180831 é um evento mais complexo, formado por

vários picos ao longo de um tempo maior do evento. Seu volume de chuva foi de 64,35 mm com I30 de 15.13 mm.h⁻¹. Aqui podemos verificar a boa habilidade que o modelo apresentou em representar estes eventos de maior complexidade e duração. Tivemos boa representação dos picos nos tempos corretos e da intensidade da vazão em cada um, sendo que a calibração adequada nem sempre é obtida desta forma. O evento 20181001 teve NSE 0.75 e Pbias -16.2, considerado muito bom. Também foi um evento complexo com vários picos e com boa resposta para a vazão de pico. A chuva incidente foi de 29.81 mm com pico de 20.97, mas com umidade antecedente de dois dias de 25 mm, razão pela qual a resposta foi mais intensa mesmo para uma chuva menor. O evento 20200629 também é um evento com vários picos que apresentou bom resultado. Com precipitação de 91.4 mm, I30 de 40 mm e sem chuva antecedente de dois dias, o evento vem após um período seco. Teve NSE de 0.5 para hidrograma, um pouco baixo considerando que o final do evento teve o efeito do filtro. NSE de 0.48 para a CSS pode ser considerado satisfatório, pelo período seco antecedente que pode ter disponibilizado maior quantidade de sedimentos (Figura 44). Os eventos 20210626 e 20210627 são partes de um único evento, aqui mostrados para representar a condição que ocorre do exaurimento dos sedimentos. O primeiro evento teve chuva de 41 mm e I30 de 79.2, gerando um pico bem definido e vazão de 4.746 L. s⁻¹. Já o segundo pico foi de 61 mm com I30 de 43.2 mm.h⁻¹. Com a devida calibração de umidade tivemos boa representação do hidrograma de cada parte, porém, os sedimentos foram exauridos na segunda metade do evento, como evidenciado no gráfico. O primeiro evento teve NSE 0.88 para hidrograma e 0.32 para sedimentogramas. Já o segundo, NSE 0.52 para hidrograma e -62.28 para sedimentogramas. Fica claro aqui que o efeito do exaurimento dos sedimentos intra e entre eventos ocorre, mas não é representado pelo modelo adequadamente, mesmo com bom ajuste do hidrograma do segundo evento. O evento 20220323 foi o maior evento em termos de magnitude, com precipitação de 109,78 mm, I30 de 58 mm e que ocorre sob uma condição úmida da bacia pelas chuvas antecedentes. Teve NSE de 0.69 para hidrograma, e 0,86 para a produção de sedimentos. Não é um evento complexo, formado por uma chuva mais concentrada. Sua CSS atingiu valores elevados, devido provavelmente ao grande volume escoado, com 4.602 L. s⁻¹ que mobilizou frações granulométricas mais grosseiras como areia fina e grossa.

Figura 45 - Evento 20160325



Fonte: Elaborado pelo autor.

A calibração privilegiou o acerto da vazão de pico nos eventos, e num segundo momento, ao volume total de escoamento. Desta forma, obtivemos certa facilidade para calibrar os eventos com base no conteúdo de água no solo, bem como representar também o tempo de pico dos eventos. Os valores de umidade dos solos foram alterados sem que fosse necessário atuar sobre os valores de condutividade hidráulica para atingir a calibração da maioria dos eventos. Em apenas 2 eventos (20180724 e 20180820) foram alterados os valores de Ksat na Várzea e nas estradas, pois mesmo tendo atingido a saturação pela umidade, não houve a correta calibração do evento. O bom desempenho atribuído ao fato de que a vazão de pico foi a variável escolhida, no entanto, levou também para um bom desempenho na simulação do volume do escoamento superficial observado pela separação do escoamento pelo filtro, que tem suas limitações e acrescenta certo nível de incertezas no processo.

Devido a condutividade hidráulica nos Neossolos estar estimada em 150 mm.h^{-1} nas regiões com florestas, que contribuem pouco com o escoamento superficial sobre sua área, predominando o subsuperficial, não foi necessário atuar sobre esta zona hidrológica. Já as estradas, como tem pouca profundidade considerada e baixa condutividade, a saturação completa ou quase completa foi considerada na calibração, resultando em valores de quase saturação para a maior parte dos eventos. A maior atuação ficou por conta da Várzea e das Vertentes, onde a amplitude de condições de umidade anteriores aos eventos é mais pronunciada em função dos dias de chuva antecedentes a cada evento, e pela própria magnitude dos eventos a serem calibrados. Finalmente, os Argissolos onde predominam a maior parte das encostas agrícolas, foi eventualmente acionada, também pelo valor elevado de condutividade atribuído à esta classe.

A representação das estruturas formadoras do escoamento nos mapas de entrada ao modelo, resultou em boa assertividade para a simulação hidrológica dos eventos, principalmente os de pequena e média magnitude. Este resultado foi alcançado, respeitando a condição de alta condutividade hidráulica saturada nas encostas agrícolas nos Argissolos e Neossolos, condição explorada pela formulação da hipótese. Foi possível alcançar bons resultados de NSE com Pbias dentro de valores razoáveis para as variáveis hidrológicas, com uma calibração obtida alterando majoritariamente apenas os valores de umidade antecedente e sem calibrar parâmetros de menor impacto no hidrograma, concentrando a responsabilidade da calibração sobre menos parâmetros. Além disso, destaca-se que com esta proposta de representação das regiões hidrológicamente frágeis da bacia, na modelagem, foi possível calibrar eventos complexos de longa duração e formados por diversos picos de vazão. Simular eventos de maior duração e formados por vários picos, é um desafio pois eles apresentam uma

dinâmica de processos na natureza muito mais complexa, que os modelos têm dificuldade para representar. A complexidade da modelagem de bacias onde temos fluxos compostos por diferentes origens, através do uso de modelos de base física que simulam nativamente apenas os escoamentos superficiais, como o LISEM. é desafiador para os usuários, como mostra Barros (2021), investigando a participação dos fluxos subsuperficiais lentos nos eventos, aplicando o LISEM sobre 6 eventos complexos em termos de misturas de escoamentos mediante separação pelo silício dissolvido, obteve NSE gráfico entre -2.91 e 0.5.

A aplicação do filtro matemático para separação do escoamento, produziu bons resultados, indicando a proporção adequada de escoamento superficial nos eventos. Mesmo não sendo um método exato, mas uma estimativa aproximada dos eventos reais, o uso de um filtro matemático agiliza muito o trabalho de modelagem, pois permite realizar cálculos automáticos nas rotinas de programação de preparação dos eventos. Os resultados são similares ao método gráfico, aplicado na bacia por Barros (2012), quando não haviam ainda sido realizados estudos no sentido de investigar as misturas de fluxos em eventos. O filtro desenvolvido por Bernardi (2018b) com base em estudos de Barros (2016b) onde avaliou participação dos escoamentos com base em silício dissolvido, adotado neste estudo mostrou ser adequado. A separação representou bem o comportamento idealizado pelo escoamento superficial gerado pelas estruturas de formação do escoamento nas áreas úmidas perto do canal, e a representação da provável participação de fluxos subsuperficiais na área da floresta sobre Neossolos localizada próxima ao exutório. Ao longo de eventos mais longos, o uso de filtros matemáticos facilita a determinação da participação de fluxos subsuperficiais no escoamento dos eventos complexos. No entanto, o filtro matemático utilizado apresenta um problema observado nos eventos, de manter um certo nível de ES, mesmo após este ter cessado por completo ou parcialmente. Em eventos com um pico principal e bem destacado, se observa este comportamento do filtro com fluxo persistente ao longo da recessão, inclusive aumentando gradativamente o valor de ES. Isto ocasionou erros na avaliação do NSE, diminuindo os indicadores de eficiência geral da modelagem. Quando necessário, o evento foi restringido ao ponto de menor valor de participação de ES após o pico, o momento em que a simulação acusa término do ES pelo modelo, mesmo que tenha escoamento ainda no evento real, que se assume ser apenas de escoamento subsuperficial.

A grande base de eventos monitorados de diferentes características simulados neste estudo, apresentou resultados de eficiência na modelagem para vazão, vazão de pico e descarga líquida considerados muito bons. Já para as variáveis hidrológicas dos eventos, os valores de Pbias foram bem satisfatórios. Para o grupo 1 de eventos, tivemos a média de Pbias

para vazão de pico de $0,75 \text{ L.s}^{-1}$ com mediana de $-8,50 \text{ L.s}^{-1}$. Para o grupo 2 tivemos média de $-9,88 \text{ L.s}^{-1}$ e mediana de $-18,4 \text{ L.s}^{-1}$. Já para o grupo 4, média de $8,51 \text{ L.s}^{-1}$ e mediana $2,7 \text{ L.s}^{-1}$. E para o maior evento, média e mediana de $68,8 \text{ L.s}^{-1}$. Estes valores indicam que houve boa assertividade na calibração da vazão de pico para todas as classes de eventos, que associado com os valores também elevados de NSE para os hidrogramas, mostram uma boa representação do comportamento hidrológico do escoamento superficial simulado. Para Ebling (2022), a calibração do escoamento superficial foi aceitável para 22 de 37 eventos simulados, com NSE variando entre 0.23 e 0.96 para duas bacias pareadas em São Gabriel – RS, em bacias também florestadas.

Estes resultados mostram que é promissora a representação na modelagem da função das estruturas hidrológicamente frágeis na formação dos escoamentos superficiais. A forma do hidrograma bem representada, bem como os baixos tempos de ocorrência de pico observados e simulados, indicam que a formação do escoamento pode estar ocorrendo em locais próximos aos canais e com elevada conectividade para os fluxos. Se este fenômeno de fato ocorre na bacia, ele foi bem representado pelo modelo. Assim, as áreas úmidas da várzea sujeitas à saturação, a rede de drenagem expandida sobre as vertentes das encostas, promoveram a conexão esperada para representar o fluxo rápido do escoamento superficial observado sobre a bacia nos eventos. A calibração dos eventos com base inicialmente em alterar os valores em estradas, mostrou-se coerente com os processos observados. Sendo as estradas, vias de conexão direta entre os fluxos nas encostas de vários pontos da bacia, elas promovem a rápida transferência do escoamento diretamente para o canal principal. Estes processos nas estradas estão de acordo com as observações de Silva (2021), em simulação de 8 eventos com práticas conservacionistas sobre as estradas, onde obteve valores bastante diversos de COE para a calibração básica de volume de escoamento, indo de -0.37 até 0.90 , conforme o evento.

7.5 EFICIÊNCIA DA SIMULAÇÃO DA CSS E DA PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS

O comportamento do modelo LISEM apresentou aceitável desempenho hidrológico, mas demonstrou que o LISEM apresenta limitações na modelagem da produção de sedimentos em função da provável variabilidade espacial dos fatores controladores da dinâmica do escoamento e da carga de sedimentos pelas variações no uso da bacia que não foram considerados nesta modelagem. Os aspectos relacionados com a conectividade dos fluxos e dos sedimentos nem sempre são bem representados. Representar bem no modelo estas estruturas e seu funcionamento, depende de validação com base em amplo monitoramento. Muito embora, sendo um modelo distribuído onde os processos de

desagregação, transporte e deposição de sedimentos na bacia podem ser avaliados através de seus mapas de saída em seus diferentes solos ou tipos de uso, apenas a produção de sedimentos pode ser verificada pelos dados obtidos no exutório pelo monitoramento. Neste sentido Minella (2003) utilizou metodologia de fingerprint, baseado em variáveis geoquímicas e técnicas de estatística multivariada, identificando uma contribuição de 64% de fontes de lavouras e 36% de fontes de estradas nos sedimentos amostrados no exutório.

Apesar da grande base de simulações com valores de referência de produção de sedimentos no exutório da bacia, o que auxilia a calibração das perdas de sedimentos, em função das escalas espacial e temporal envolvida no processo, mesmo que as simulações apresentem bom desempenho considerando esta variável, não podemos afirmar que os processos distribuídos estão bem representados. O modelo apresenta estes resultados, em escala pontual de evento, que pode não refletir o histórico dos processos erosivos observados ao longo de anos sobre a bacia. Junto à observação e monitoramento, usamos estudos acessórios do campo da ciência hidrológica e da ciência dos solos, como ferramentas de apoio aos estudos da erosão. Entre eles temos o fingerprint, um procedimento discriminante das possíveis fontes de sedimentos a partir da coleta de amostras de sedimentos exportados, e dos solos sobre a bacia. O sedimento coletado nos eventos é uma mistura de sedimentos de diferentes fontes, sendo que seus resultados de estimativa podem ser auxiliares para avaliar o comportamento de um modelo distribuído.

7.5.1 Desagregação pelo impacto da gota da chuva

Investigação sobre o poder erosivo das chuvas com instrumentos avançados de leitura da precipitação culminaram na formulação de uma equação de erosividade específica para o local da bacia por Ramon (RAMON *et al.*, 2017). Oliveira (2012) realizou estudo de modelagem do escoamento superficial e da erosão hídrica utilizando o modelo WEPP. Ele calibrou o modelo a partir de dados obtidos de forma experimental de erodibilidade do solo em sulcos e entressulcos, tensão crítica de cisalhamento do solo e condutividade hidráulica saturada. Houve certa discrepância em relação à desagregação e deposição do solo demonstrados pelo modelo e os obtidos através de modelagem da atividade do ^{137}Cs . Minella (2014), utilizando técnicas combinadas de mensuração de ^{137}Cs , produção de sedimentos e fingerprint, realizou um balanço de sedimentos da bacia, que mesmo com incerteza sobre os resultados das componentes individuais, foi possível estabelecer uma taxa de transferência de sedimentos de 15%.

7.5.2 Desagregação pelo escoamento superficial

Dados de Minella (2017) apontam que as contribuições de sedimentos da bacia de Arvorezinha se originam das fontes de solos de encostas em 977 t.ano^{-1} , dos quais 540 t.ano^{-1} (55%) se depositam na própria encosta (oriundos do splash e do fluxo superficial), e 427 t.ano^{-1} são transportadas, sendo 195 t.ano^{-1} (20%) acomodam-se na interface encosta e planície aluvial, 94 t.ano^{-1} (9%) depositam-se nas vertentes das encostas e 75 t.ano^{-1} (7%) depositam-se nas planícies aluviais. Em torno de 5 t.ano^{-1} se depositam nos canais. As estradas contribuem com 85 t.ano^{-1} e os canais com 4 t.ano^{-1} de sedimentos provindos da erosão. Os resultados da modelagem são apresentados na Tabela 8, com os totais de sedimentos desagregados e depositados sobre as classes de solos nas estradas, várzea encostas e canais. Também, Minella (2009) usando fingerprint determinou que entre 54 e 62% dos sedimentos exportados tem como origem as encostas agrícolas, de 24 a 36% provem das estradas, e entre 2 e 22% se originam na rede de drenagem, no caso os canais principais. A modelagem aponta que 44,93% dos sedimentos da desagregação pelo escoamento foram realizados sobre as encostas, acrescido de 37,22% pelo splash, sendo que destes, 41,35% já se depositaram na própria encosta, resultando excedente de 40,80%. Os canais contribuem com 3,58%, dentro do possível padrão previsto. As estradas com 12,64%, estima um valor menor que o intervalo proposto pelos traçadores. Podemos verificar que em relação à desagregação simulada e a observada, tanto pelos eventos como pela estimativa realizada por Minella, os valores são parcialmente coerentes. Mas para a deposição, e conseqüentemente a exportação, temos divergências, pois a exportação total simulada pela modelagem deste conjunto de 150 eventos aponta 42,11% de sedimentos exportados, contra aproximadamente 15% apontados pelo balanço de sedimentos estimado. Além disso, procura melhor representar a condição de exaurimento de sedimentos nestas vias de fluxo, condição mais comum de acontecer na maior parte dos eventos, em função do pouco revolvimento do solo pelo cultivo com a reposição do solo erodível. Como esperado, a manutenção da alta condutividade hidráulica sobre os solos de encostas agrícolas, favoreceu a infiltração e diminui a formação de ES, o que restringe também o processo de desagregação. Assim, os Argissolos com cultivos anuais e os Neossolos com aporte de florestas, apresentaram baixos índices de erosão pelo escoamento. Isto acontece, juntamente com a boa performance do modelo em simular os hidrogramas. Nos eventos pequenos, temos as regiões mais próximas do canal principal, a Várzea, e a rede de drenagem expandida como atuantes no controle dos escoamentos, e nos eventos de média e alta magnitude, temos parte do escoamento gerado a partir das encostas.

A baixa assertividade nas simulações para sedimentos deve-se, como é recorrente, a questões ligadas ao exaurimento dos sedimentos entre eventos. Como é um modelo orientado

a simular eventos individualmente, o gap de informações sobre essa distribuição espacial de fontes de sedimentos prontamente disponíveis é difícil de ser informado. Para alguns eventos, acontece de o modelo estar em consonância com a situação da bacia em termos de reposição de sedimentos nas áreas sujeitas ao fluxo, mas que após seu exaurimento, não conseguem ser representados no evento posterior. Isto porque a desagregação é calculada com base da potência de escoamento e nos valores de coesão informados. Mas o modelo sempre causa desagregação em função da premissa que há o ES fluindo sobre ele, mesmo que o solo apresente baixa disponibilidade de sedimentos desagregáveis. Em versões mais recentes é possível informar ao modelo a quantidade máxima de sedimentos disponíveis sobre cada célula disponíveis para desagregação e transporte, o que pode ser alternativa para melhorar a resposta.

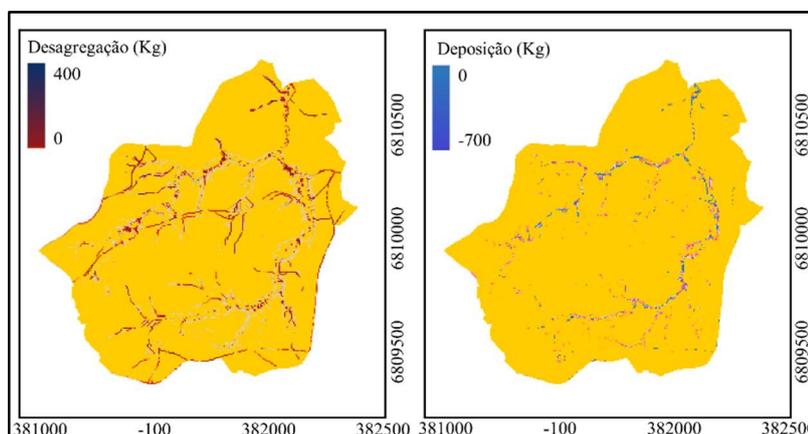
Desta forma, é necessário discernimento por parte do usuário para interpretar as condições de cada evento e seus resultados pontuais. Uma base considerável de eventos precisa ser analisada para compor um comportamento médio de desempenho do modelo. As condições apresentadas anteriormente podem ser caracterizadas como a condição de parametrização equivocada, já que a correta informação da situação inicial da bacia pode ser realizada no modelo, ele tem capacidade de ser adequadamente parametrizado, mas é responsabilidade do usuário prestar estas informações. É desejável, além da boa representação das estruturas de formação do escoamento, também suprir o modelo de caracterização da quantidade dos sedimentos disponíveis para desagregação nas células e canais, rotina também possível a partir das versões atuais do modelo. Além dos bons resultados, é ainda possível calibrar ainda melhor os eventos com ajuste mais afinada dos demais parâmetros de menor impacto sobre a modelagem, além da umidade do solo e condutividade hidráulica.

Para a calibração dos sedimentos, não foi preciso atuar sobre a coesão dos solos Argissolos, Vertentes e Neossolos. Embora tenha sido atuado na calibração sobre os valores de coesão no Neossolo, ela não surtiu impacto na erosão modelada pois pouco escoamento foi gerado nesta encosta. A atuação foi mais intensa sobre os valores nas estradas e na Várzea, locais onde ocorre o mais intenso fluxo de escoamento superficial na paisagem. Os valores de coesão foram aumentados nas estradas quando a disponibilidade de sedimentos no evento era menor que o demonstrado pelo modelo, para compensar a CSS. Ao contrário, em eventos em que havia grande disponibilidade de sedimentos erodíveis, uma pequena diminuição da coesão foi feita para aumentar a erosão em relação ao evento observado, quando necessário. Entretanto, os valores de coesão estiveram em intervalos coerentes com os observados nos respectivos solos. Cabe ressaltar que grande parte da desagregação de sedimentos é fruto do

escoamento superficial concentrado e localizado sobre as estruturas destacadas, nas vertentes e na várzea principalmente. Este fluxo carrega parte dos sedimentos oriundos da erosão pelo splash sobre as encostas agrícolas, e o restante é devido ao fluxo superficial nas células onde temos concentração de escoamento. Estes locais, como observamos *in loco* na bacia, apresenta bem definidos os canais em que a erosão ocorre nos locais onde temos grande declividade do terreno. Além da variação na oferta de sedimentos sobre as encostas, os processos de deposição ao longo do caminho do fluxo do escoamento e pontos de retenção também afetam os valores de sedimentos obtidos no exutório, sendo parte das diferenças encontradas entre observado e simulado, processos que não podemos mensurar e calibrar adequadamente. A partir do transporte de sedimentos das partes altas do terreno, na Várzea ocorrem locais de deposição. Neste local, 73% do material depositado se encontra entre a interface Várzea e canais principais, enquanto 19% se depositam nos canais, segundo o modelo.

Para a produção de sedimentos total dos eventos, apresentado no gráfico da Figura 46, temos uma maior variabilidade de resultados, onde o pequeno número de eventos de porte médio e altos que tiveram grandes exportações de sedimentos, as diferenças foram consideráveis entre o observado e simulado. Como já discutido, apenas este pequeno número de eventos, em torno de 10, são responsáveis pela maior exportação dos analisados. Portanto, a estimativa obtida na simulação destes eventos de maior impacto traz maior incerteza sobre a descarga sólida simulada, e sobre os resultados da configuração dos processos erosivos simulados pelo modelo. A relação entre a máxima vazão de pico e a máxima concentração de sedimentos em suspensão dos eventos observados aponta uma correlação positiva não bem clara, com alta variabilidade de situações entre as diversas magnitudes de eventos. Razão para isso pode ser a variabilidade de oferta de sedimentos entre os eventos, com exaurimento entre eles e os eventos anteriores.

Figura 46 - Mapas de desagregação e deposição pelo escoamento superficial do evento 20200707



Fonte: Elaborado pelo autor.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como sugestões para futuras pesquisas, o uso de índices topográficos pode ser aplicado para explorar aspectos relacionados com o mapeamento da profundidade do solo e da distribuição espacial mais refinada do conteúdo de umidade do solo, o que tem potencial de ainda melhorar a representação física da bacia e os resultados de eficiência da modelagem. Da mesma forma, rotinas e experimentos de avaliação do conteúdo de água no solo antecedente aos eventos na bacia, para explorar o potencial de simulação contínua do modelo em versões recentes. Finalmente, pesquisas incluindo o fluxo subsuperficial a partir das encostas nas regiões limítrofes ao canal, que pode ser simulado nas versões mais atuais.

Como contribuição científica, sendo a componente espacial dos processos hidrológicos, assim como a temporal, fundamental para o sucesso da modelagem matemática da erosão, os conceitos envolvidos na formação do processo de escoamento superficial podem ser reproduzidos em modelos de base física e distribuídos como o LISEM, que tem as ferramentas necessárias para representar processos hidrológicos, cabendo ao operador a responsabilidade de interpretar na natureza e traduzir para o modelo, as características da bacia monitorada.

Como implicações para a conservação do solo e água, desenvolvimento e calibração de modelos de base física com maior acurácia desempenham papel fundamental na quantificação das perdas por escoamento em bacias de cabeceira, como o dimensionamento de obras de caráter conservacionista e como preditores de vazões a partir de chuvas de projeto, em resposta ao aumento de ocorrências de chuvas intensas para preservar as populações à jusante contra inundações, perdas econômicas e ambientais.

9 CONCLUSÕES

O monitoramento de longo prazo na bacia de Arvorezinha proveu para a modelagem, uma base de dados fundamentais para a compreensão dos processos erosivos nas encostas basálticas do RS. A observação das evidências do processo erosivo a campo auxiliou a identificar as linhas de vertente nas encostas, as áreas de afluência variável, as zonas ripárias e as estradas como áreas de fragilidade hidrológica importantes promotoras do escoamento superficial sobre a bacia. Isto corrobora que a representação das estruturas responsáveis pela formação do escoamento superficial direto é tão importante quanto que o impacto da discretização espacial das propriedades do solo sobre os resultados hidrológicos da modelagem.

As áreas hidrológicas frágeis são caracterizadas a partir do relevo e podem se fazer representar no modelo distribuído LISEM através de células ao qual se atribui características de conteúdo de água e condutividade hidráulica saturada próprias para melhor representar a formação do escoamento superficial nesses locais, bem como pontos de conexão entre encostas e canal principal através da expansão da rede de drenagem, melhorando a representação da conectividade dos fluxos e sedimentos. Estas estruturas podem ser definidas através de modelos numéricos de elevação e uso de índices topográficos para caracterização do relevo da bacia

O modelo LISEM apresenta capacidade estrutural e funcional para poder representar as feições da paisagem que tem maior impacto nos processos hidrológicos e erosivos. A qualidade dos resultados de eficiência nas simulações com a representação espacial das áreas hidrológicas frágeis, foi considerada entre boa e muito boa. A modelagem permitiu, sobre uma base robusta de eventos monitorados, boa calibração dos eventos através da manutenção dos valores de estimativas de condutividade hidráulica sobre as encostas e amplitude dos valores de umidade calibrados condizentes com a realidade física.

Já para o comportamento dos sedimentos, o modelo com uso da abordagem de representação das áreas hidrologicamente frágeis, ainda apresenta incertezas para a simulação da concentração de sedimentos em suspensão e para a produção de sedimentos. Mas obtivemos melhor estimativa da formação de escoamento superficial sobre as encostas agrícolas que promovem desagregação nestes locais pelo fluxo concentrado. A representação dos fluxos concentrados sobre estruturas de rede de drenagem expandida melhorou a resposta do escoamento e a representação do exaurimento de sedimentos nos caminhos preferências.

REFERÊNCIAS

- AGUILERA, H. *et al.* Building inexpensive topsoil saturated hydraulic conductivity maps for land planning based on machine learning and geostatistics. **CATENA**, [s. l.], v. 208, p. 105788, 2022.
- ALEWELL, C. *et al.* Using the USLE: Chances, challenges and limitations of soil erosion modelling. **International Soil and Water Conservation Research**, [s. l.], v. 7, n. 3, p. 203–225, 2019.
- ALMAGRO, A. *et al.* Projected climate change impacts in rainfall erosivity over Brazil. **Scientific Reports**, [s. l.], v. 7, n. 1, p. 8130, 2017.
- AMARAL, A. J. D. *et al.* Redução da erosão hídrica em três sistemas de manejo do solo em um Cambissolo Húmico da região do Planalto Sul-Catarinense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s. l.], v. 32, n. 5, p. 2145–2155, 2008.
- AMEIJEIRAS-MARIÑO, Y. *et al.* Ge/Si ratios point to increased contribution from deeper mineral weathering to streams after forest conversion to cropland. **Applied Geochemistry**, [s. l.], v. 96, p. 24–34, 2018.
- ARNOLD, J. G. *et al.* LARGE AREA HYDROLOGIC MODELING AND ASSESSMENT PART I: MODEL DEVELOPMENT. **Journal of the American Water Resources Association**, [s. l.], v. 34, n. 1, p. 73–89, 1998.
- BAARTMAN, J. E. M. *et al.* Linking landscape morphological complexity and sediment connectivity: Landscape Morphological Complexity And Sediment Connectivity. **Earth Surface Processes and Landforms**, [s. l.], p. n/a-n/a, 2013.
- BARROS, C. A. P. de. **Comportamento hidrossedimentológico de uma bacia hidrográfica rural utilizando técnicas de monitoramento e modelagem**. 2012. Dissertação de mestrado, 180 f. - Universidade Federal de Santa Maria, [s. l.], 2012.
- BARROS, C. A. P. de. **Dinâmica dos escoamentos na modelagem da produção de sedimentos em uma pequena bacia rural**. 2016a. Tese de doutorado - Universidade Federal de Santa Maria, [s. l.], 2016.
- BARROS, C. A. P. de. **Dinâmica dos escoamentos na modelagem da produção de sedimentos em uma pequena bacia rural**. 2016b. Tese de doutorado - Universidade Federal de Santa Maria, [s. l.], 2016.
- BARROS, C. A. P. de *et al.* Estimativa da infiltração de água no solo na escala de bacia hidrográfica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s. l.], v. 38, n. 2, p. 557–564, 2014.
- BARROS, C. A. P. de *et al.* Investigating the relationships between chemical element concentrations and discharge to improve our understanding of their transport patterns in rural catchments under subtropical climate conditions. **Science of The Total Environment**, [s. l.], v. 748, p. 141345, 2020.

BATISTA, P. V. G. *et al.* On the evaluation of soil erosion models: Are we doing enough?. **Earth-Science Reviews**, [s. l.], v. 197, p. 102898, 2019.

BERNARDI, F. **TÉCNICAS DE SEPARAÇÃO DO ESCOAMENTO EM PEQUENA BACIA RURAL**. 2018a. Dissertação de mestrado - Universidade Federal de Santa Maria, [s. l.], 2018.

BERNARDI, F. **TÉCNICAS DE SEPARAÇÃO DO ESCOAMENTO EM PEQUENA BACIA RURAL**. 2018b. Dissertação de mestrado - Universidade Federal de Santa Maria, [s. l.], 2018.

BERTOL, I. *et al.* Sedimentos transportados pela enxurrada em eventos de erosão hídrica em um Nitossolo Háplico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s. l.], v. 34, n. 1, p. 245–252, 2010.

BERTOL, I. *et al.* Water erosion in no-tillage monoculture and intercropped systems along contour lines. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s. l.], v. 37, n. 2, p. 521–528, 2013.

BEVEN, K. A manifesto for the equifinality thesis. **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 320, n. 1–2, p. 18–36, 2006.

BEVEN, K. J. **Environmental modelling: an uncertain future: an introduction to techniques for uncertainty estimation in environmental prediction**. London ; New York: Routledge, 2009.

BEVEN, K. J. **Rainfall-runoff modelling: the primer**. [S. l.]: John Wiley & Sons, 2011.

BEVEN, K. *et al.* Topmodel. **Computer models of watershed hydrology**, [s. l.], p. 627–668, 1995.

BEVEN, K. TOPMODEL: A critique. **Hydrological Processes**, [s. l.], v. 11, n. 9, p. 1069–1085, 1997.

BEVEN, K.; FREER, J. A dynamic TOPMODEL. **Hydrological Processes**, [s. l.], v. 15, n. 10, p. 1993–2011, 2001.

BIDDOCCU, M. *et al.* Temporal variability of soil management effects on soil hydrological properties, runoff and erosion at the field scale in a hillslope vineyard, North-West Italy. **Soil and Tillage Research**, [s. l.], v. 165, p. 46–58, 2017.

BORRELLI, P. *et al.* Soil erosion modelling: A global review and statistical analysis. **Science of The Total Environment**, [s. l.], v. 780, p. 146494, 2021.

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.

BRACKEN, L. J. *et al.* Sediment connectivity: a framework for understanding sediment transfer at multiple scales: SEDIMENT CONNECTIVITY: SEDIMENT TRANSFER AT

MULTIPLE SCALES. **Earth Surface Processes and Landforms**, [s. l.], v. 40, n. 2, p. 177–188, 2015.

BRAIDA, J. A. *et al.* Resíduos vegetais na superfície e carbono orgânico do solo e suas relações com a densidade máxima obtida no ensaio proctor. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s. l.], v. 30, n. 4, p. 605–614, 2006.

BRESSIANI, J. X.; SCHMIDT, M. A. R. Proposta de uso das áreas variáveis de afluência como área de proteção permanente. **Revista Monografias Ambientais**, [s. l.], p. 198–208, 2016.

BROSENS, L. *et al.* Have land use and land cover change affected soil thickness and weathering degree in a subtropical region in Southern Brazil? Insights from applied mid-infrared spectroscopy. **CATENA**, [s. l.], v. 207, p. 105698, 2021.

BUTTLE, J. M. Isotope hydrograph separations and rapid delivery of pre-event water from drainage basins. **Progress in Physical Geography: Earth and Environment**, [s. l.], v. 18, n. 1, p. 16–41, 1994.

CAMPOS, B.-H. C. de *et al.* Avaliação temporal da umidade do solo como consequência do tipo e percentagem de cobertura vegetal. **Ciência Rural**, [s. l.], v. 24, p. 459–463, 1994.

CAPOANE, V.; TIECHER, T.; SANTOS, D. R. D. Uso da terra e a sua relação com qualidade da água: influência das zonas ripárias e úmidas. **Geografia Ensino & Pesquisa**, [s. l.], v. 20, n. 2, p. 163, 2016.

CASTRO, R. M. *et al.* Soil losses related to land use and rainfall seasonality in a watershed in the Brazilian Cerrado. **Journal of South American Earth Sciences**, [s. l.], v. 119, p. 104020, 2022.

CHORLEY, R. J. The hillslope hydrological cycle. **Hillslope hydrology**, [s. l.], p. 1–42, 1978.

CROKE, B. F. W.; JAKEMAN, A. J. Predictions in catchment hydrology: an Australian perspective. **Marine and Freshwater Research**, [s. l.], v. 52, n. 1, p. 65, 2001.

CUOMO, S.; DELLA SALA, M.; PIERRI, M. Experimental evidences and numerical modelling of runoff and soil erosion in flume tests. **CATENA**, [s. l.], v. 147, p. 61–70, 2016.

D. N. MORIASI *et al.* Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. **Transactions of the ASABE**, [s. l.], v. 50, n. 3, p. 885–900, 2007.

DA SILVA MENEZES, Rafael *et al.* Escoamento superficial e produção de sedimentos em um argissolo vermelho distrófico sob diferentes sistemas de manejo. **ANAIS DO ENIC**, [s. l.], 2019.

DALBIANCO, L. **Simulação hidrossedimentológica com o Modelo LISEM em uma pequena bacia hidrográfica rural**. 2013a. Tese de doutorado - Universidade Federal de Santa Maria, [s. l.], 2013.

DALBIANCO, L. **Simulação hidrossedimentológica com o modelo liseM em uma pequena bacia hidrográfica rural**. [s. l.], p. 92, 2013b.

- DALBIANCO, L. Variabilidade espacial e estimativa da condutividade hidráulica e caracterização físico-hídrica de uma microbacia hidrográfica rural. [s. l.], p. 116, 2009.
- DE ALMEIDA, W. S. *et al.* Effect of soil tillage and vegetal cover on soil water infiltration. **Soil and Tillage Research**, [s. l.], v. 175, p. 130–138, 2018.
- DE BARROS, Cláudia Alessandra Peixoto *et al.* How water flow components affect sediment dynamics modeling in a Brazilian catchment. **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 597, p. 126111, 2021.
- DE BARROS, C A P *et al.* Impact of data sources to DEM construction and application to runoff and sediment yield modelling using LISEM model. **Journal of Earth System Science**, [s. l.], v. 130, n. 1, p. 53, 2021.
- DE BASTOS, F. *et al.* Strategies for identifying pollution sources in a headwater catchment based on multi-scale water quality monitoring. **Environmental Monitoring and Assessment**, [s. l.], v. 193, n. 4, p. 169, 2021.
- DE MENEZES, D.; MINELLA, J. P. G.; TASSI, R. Monitoring sediment yield for soil and water conservation planning in rural catchments. **Environmental Monitoring and Assessment**, [s. l.], v. 192, n. 11, p. 736, 2020.
- DE ROO, A. *et al.* LISEM: a new physically-based hydrological and soil erosion model in a GIS-environment, theory and implementation. **IAHS Publications-Series of Proceedings and Reports-Intern Assoc Hydrological Sciences**, [s. l.], v. 224, p. 439–448, 1994.
- DE ROO, A. *et al.* LISEM: A physically-based hydrological and soil erosion model incorporated in a GIS. **IAHS Publication**, [s. l.], v. 235, p. 395–403, 1996.
- DE ROO, A. Modelling runoff and sediment transport in catchments using GIS. **Hydrological processes**, [s. l.], v. 12, n. 6, p. 905–922, 1998.
- 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.; WESSELING, C.; RITSEMA, C. 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.
- DE VENITE, 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.
- DOS SANTOS, R. C. V. *et al.* Examining the implications of spatial variability of saturated soil hydraulic conductivity on direct surface runoff hydrographs. **CATENA**, [s. l.], v. 207, p. 105693, 2021.

DUNNE, T.; MOORE, T.; TAYLOR, C. Recognition and prediction of runoff-producing zones in humid regions. **Hydrol. Sci. Bull.**, [s. l.], v. 20, n. 3, p. 305–327, 1975.

DURÁN ZUAZO, V. H.; RODRÍGUEZ PLEGUEZUELO, C. R. Soil-erosion and runoff prevention by plant covers. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, [s. l.], v. 28, n. 1, p. 65–86, 2008.

EBLING, É. D.; OTHERS. **Monitoramento, dinâmica e modelagem hidrossedimentológica de duas bacias hidrográficas rurais com produção de leite e grãos**. 2022. PhD Thesis - Universidade Federal de Santa Maria, [s. l.], 2022.

ECKART, C. Optimal rectifier systems for the detection of steady signals. [s. l.], 1952.

FAO & ITPS. **Status of the world's soil resources – main report**. [S. l.]: Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils., 2015. *E-book*. Disponível em: <http://www.fao.org/3/a-i5199e.pdf>.

FATICHI, S. *et al.* An overview of current applications, challenges, and future trends in distributed process-based models in hydrology. **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 537, p. 45–60, 2016.

FENICIA, F. *et al.* Catchment properties, function, and conceptual model representation: is there a correspondence?: Catchment Properties, Function, And Conceptual Model Representation. **Hydrological Processes**, [s. l.], v. 28, n. 4, p. 2451–2467, 2014.

FENICIA, F.; MCDONNELL, J. J. Modeling streamflow variability at the regional scale: (1) perceptual model development through signature analysis. **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 605, p. 127287, 2022.

FREI, S.; FLECKENSTEIN, J. H. Representing effects of micro-topography on runoff generation and sub-surface flow patterns by using superficial rill/depression storage height variations. **Environmental Modelling & Software**, [s. l.], v. 52, p. 5–18, 2014.

GARCÍA-RUIZ, J. M. *et al.* A meta-analysis of soil erosion rates across the world. **Geomorphology**, [s. l.], v. 239, p. 160–173, 2015.

GOVERS, G. *et al.* Evaluation of the WEPP Model in a Belgian Agricultural Watershed. [s. l.], 2011.

GOVERS, G.; OTHERS. Empirical relationships for the transport capacity of overland flow. **IAHS publication**, [s. l.], v. 189, p. 45–63, 1990.

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, p. 20–34, 2017.

- HESSEL, R. *et al.* Calibration of the LISEM model for a small Loess Plateau catchment. **CATENA**, [s. l.], v. 54, n. 1–2, p. 235–254, 2003.
- HESSEL, R. Effects of grid cell size and time step length on simulation results of the Limburg soil erosion model (LISEM). **Hydrological Processes: An International Journal**, [s. l.], v. 19, n. 15, p. 3037–3049, 2005.
- HORTON, R. E. The role of infiltration in the hydrologic cycle. **Eos, Transactions American Geophysical Union**, [s. l.], v. 14, n. 1, p. 446–460, 1933.
- 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.
- HUANG, J.-K.; LEE, K. T. Influences of spatially heterogeneous roughness on flow hydrographs. **Advances in Water Resources**, [s. l.], v. 32, n. 11, p. 1580–1587, 2009.
- JANZEN, D.; MCDONNELL, J. J. A stochastic approach to modelling and understanding hillslope runoff connectivity dynamics. **Ecological Modelling**, [s. l.], v. 298, p. 64–74, 2015a.
- JANZEN, D.; MCDONNELL, J. J. A stochastic approach to modelling and understanding hillslope runoff connectivity dynamics. **Ecological Modelling**, [s. l.], v. 298, p. 64–74, 2015b.
- JETTEN, V. LISEM user manual, version 2. x–Draft version January 2002. **Utr. Cent. Environ. Landsc. Dyn.**, [s. l.], v. 64, 2002.
- JETTEN, V.; GOVERS, G.; HESSEL, R. Erosion models: quality of spatial predictions. **Hydrological Processes**, [s. l.], v. 17, n. 5, p. 887–900, 2003.
- KHATAMI, S. *et al.* Equifinality and Flux Mapping: A New Approach to Model Evaluation and Process Representation Under Uncertainty. **Water Resources Research**, [s. l.], v. 55, n. 11, p. 8922–8941, 2019.
- LAUDON, H. *et al.* The role of catchment scale and landscape characteristics for runoff generation of boreal streams. **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 344, n. 3–4, p. 198–209, 2007.
- LI, H.; SIVAPALAN, M. Functional approach to exploring climatic and landscape controls on runoff generation: 2 Timing of runoff storm response. **Water Resources Research**, [s. l.], v. 50, n. 12, p. 9323–9342, 2014.
- LIMA, W. de P. Relações hidrológicas em matas ciliares. **Palestra convidada**, [s. l.], 2001.
- LIU, J. *et al.* Modeling the response of ecological service value to land use change through deep learning simulation in Lanzhou, China. **Science of The Total Environment**, [s. l.], v. 796, p. 148981, 2021.
- LOPES, F. *et al.* Simulação da dinâmica do carbono do solo numa microbacia rural pelo modelo Century. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [s. l.], v. 43, p. 745–753, 2008.

LOPES, F. **Utilização do modelo Century para avaliar a dinâmica do carbono do solo em uma pequena bacia hidrográfica rural.** 2006. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Faculdade de Agronomia Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo. Porto Alegre, RS, 2006.

LYNE, V.; HOLLICK, M. Stochastic time-variable rainfall-runoff modelling. *Em:* , 1979. **Institute of Engineers Australia National Conference.** Institute of Engineers Australia Barton, Australia, 1979. p. 89–93.

MCMILLAN, H. K. *et al.* Hydrological field data from a modeller's perspective: Part 1. Diagnostic tests for model structure. **Hydrological Processes**, v. 25, n. 4, p. 511–522, 2011.

MELLO, G. de; BUENO, C. R.; PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial de perdas de solo, do potencial natural e risco de erosão em áreas intensamente cultivadas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [s. l.], v. 10, p. 315–322, 2006.

MERTEN, G. H. *et al.* **Determinação da concentração de sedimentos em suspensão em rios com o uso de turbidímetro.** Porto Alegre, Brasil: [s. n.], 2014.

MERTEN, G. H.; MINELLA, J. P. G. Impact on sediment yield due to the intensification of tobacco production in a catchment in Southern Brazil. **Ciência Rural**, [s. l.], v. 36, n. 2, p. 669–672, 2006.

MINELLA, J. P. G. *et al.* Changing sediment yield as an indicator of improved soil management practices in southern Brazil. **CATENA**, [s. l.], v. 79, n. 3, p. 228–236, 2009.

MINELLA, J. P. G. *et al.* Combining sediment source tracing techniques with traditional monitoring: The “Arvorezinha catchment” experience. **Hydrological Processes**, [s. l.], v. 36, n. 9, 2022. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/hyp.14665>. Acesso em: 1 out. 2022.

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.* 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. *et al.* Processos e modelagem da erosão: da parcela à bacia hidrográfica. **Manejo e conservação do solo e da água no contexto das mudanças ambientais. Rio de Janeiro: Embrapa Solos**, [s. l.], p. 105–135, 2010.

MINELLA, J. P. G.; ALEGRE, P. IDENTIFICAÇÃO DE FONTES DE PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS EM UMA PEQUENA BACIA RURAL. Dissertação de mestrado (UFRGS) [s. l.], p. 90, 2003.

- MINELLA, J. P. G.; MERTEN, G. H. Índices topográficos aplicados à modelagem agrícola e ambiental. **Ciência Rural**, [s. l.], v. 42, p. 1575–1582, 2012a.
- MINELLA, J. P. G.; MERTEN, G. H. Índices topográficos aplicados à modelagem agrícola e ambiental. **Ciência Rural**, [s. l.], v. 42, n. 9, p. 1575–1582, 2012b.
- MINELLA, J. P. G.; WALLING, D. E.; MERTEN, G. H. Combining sediment source tracing techniques with traditional monitoring to assess the impact of improved land management on catchment sediment yields. **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 348, n. 3–4, p. 546–563, 2008.
- 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, p. 2189–2201, 2014.
- MOLINA, A. *et al.* Vegetation and topographic controls on sediment deposition and storage on gully beds in a degraded mountain area. **Earth Surface Processes and Landforms**, [s. l.], v. 34, n. 6, p. 755–767, 2009.
- MONTGOMERY, D. R. Soil erosion and agricultural sustainability. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, [s. l.], v. 104, n. 33, p. 13268–13272, 2007.
- MORGAN, R. *et al.* The European Soil Erosion Model (EUROSEM): documentation and user guide. [s. l.], n. July, p. 124, 1998.
- MORO, M. Avaliação do modelo LISEM na simulação dos processos hidrossedimentológicos de uma pequena bacia rural localizada nas encostas basálticas do Rio Grande do Sul. [s. l.], 2011a.
- MORO, M. Avaliação do modelo LISEM na simulação dos processos hidrossedimentológicos de uma pequena bacia rural localizada nas encostas basálticas do Rio Grande do Sul. [s. l.], 2011b.
- MUALEM, Y. Anisotropy of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, [s. l.], v. 48, n. 3, p. 505–509, 1984.
- NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 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, p. 131–154, 2005.
- NEARING, M.; PRUSKI, F.; O'NEAL, M. Expected climate change impacts on soil erosion rates: a review. **Journal of soil and water conservation**, [s. l.], v. 59, n. 1, p. 43–50, 2004.
- NEILL, S. L.; STEDINGER, J. R. Graphic Method for Determining Runoff from Rainfall and Snowmelt. **Journal of the Hydraulics Division**, [s. l.], 1967. p. 167–181.
- NIEBER, J. L. *et al.* Enhancement of seepage and lateral preferential flow by biopores on hillslopes. **Biologia**, [s. l.], v. 61, n. 19, p. S225–S228, 2006.

- NOORDUIJN, S. L. *et al.* Upscaling approach to help determine variability in riparian lowland flow dynamics. **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 620, p. 129536, 2023.
- OLIVEIRA, F. P. de *et al.* Fatores relacionados à suscetibilidade da erosão em entressulcos sob condições de uso e manejo do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [s. l.], v. 16, n. 4, p. 337–346, 2012.
- PANDE, S. *et al.* A Parsimonious Hydrological Model for a Data Scarce Dryland Region. **Water Resources Management**, [s. l.], v. 26, n. 4, p. 909–926, 2012.
- PANDEY, A.; CHOWDARY, V. M.; MAL, B. C. Identification of critical erosion prone areas in the small agricultural watershed using USLE, GIS and remote sensing. **Water Resources Management**, [s. l.], v. 21, n. 4, p. 729–746, 2007.
- 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.
- PARSONS, A. J. How reliable are our methods for estimating soil erosion by water?. **Science of The Total Environment**, [s. l.], v. 676, p. 215–221, 2019.
- POURGHASEMI, H. R. *et al.* Gully erosion spatial modelling: Role of machine learning algorithms in selection of the best controlling factors and modelling process. **Geoscience Frontiers**, [s. l.], v. 11, n. 6, p. 2207–2219, 2020.
- RAMON, R. *et al.* Kinetic energy estimation by rainfall intensity and its usefulness in predicting hydrosedimentological variables in a small rural catchment in southern Brazil. **CATENA**, [s. l.], v. 148, p. 176–184, 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.
- REID, S. C. *et al.* Does hydrological connectivity improve modelling of coarse sediment delivery in upland environments?. **Geomorphology**, [s. l.], v. 90, n. 3–4, p. 263–282, 2007.
- RENARD, K. G. **Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)**. [S. l.]: United States Government Printing, 1997.
- RINALDO, A. *et al.* Catchment travel time distributions and water flow in soils: CATCHMENT TRAVEL TIMES. **Water Resources Research**, [s. l.], v. 47, n. 7, 2011. Disponível em: <http://doi.wiley.com/10.1029/2011WR010478>. Acesso em: 29 set. 2022.
- RIQUETTI, N. B. *et al.* Assessment of the soil-erosion-sediment for sustainable development of South America. **Journal of Environmental Management**, [s. l.], v. 321, p. 115933, 2022.
- RITSEMA, C. J.; OOSTINDIE, K.; STOLTE, J. EVALUATION OF VERTICAL AND LATERAL FLOW THROUGH AGRICULTURAL LOESSIAL HILLSLOPES USING A TWO-

DIMENSIONAL COMPUTER SIMULATION MODEL. **Hydrological Processes**, [s. l.], v. 10, n. 8, p. 1091–1105, 1996.

ROBINET, J. *et al.* Impacts of forest conversion and agriculture practices on water pathways in Southern Brazil. **Hydrological Processes**, [s. l.], v. 32, n. 15, p. 2304–2317, 2018a.

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, p. 160–174, 2018b.

RUSJAN, S.; MIKOŠ, M. A catchment as a simple dynamical system: Characterization by the streamflow component approach. **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 527, p. 794–808, 2015.

SAVENIJE, H. H. G. HESS Opinions; Topography driven conceptual modelling (FLEX-Topo);. **Hydrology and Earth System Sciences**, [s. l.], v. 14, n. 12, p. 2681–2692, 2010.

SCHLESNER, A. A. **Modelagem da produção de sedimentos em bacia hidrográfica rural sob diferentes equações de eficiência de desagregação do modelo erosivo LISEM**. 2017. - Universidade Federal de Santa Maria, [s. l.], 2017.

SEIBERT, J.; MCDONNELL, J. J. On the dialog between experimentalist and modeler in catchment hydrology: Use of soft data for multicriteria model calibration: SOFT DATA. **Water Resources Research**, [s. l.], v. 38, n. 11, p. 23-1-23-14, 2002.

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.

SHORE, M. *et al.* Evaluation of a surface hydrological connectivity index in agricultural catchments. **Environmental Modelling & Software**, [s. l.], v. 47, p. 7–15, 2013.

SHRESTHA, D. P.; SURIYAPRASIT, M.; PRACHANSRI, S. Assessing soil erosion in inaccessible mountainous areas in the tropics: The use of land cover and topographic parameters in a case study in Thailand. **Catena**, [s. l.], v. 121, p. 40–52, 2014.

SHREVE, E. A.; DOWNS, A. C. **Quality-assurance plan for the analysis of fluvial sediment by the US Geological Survey Kentucky Water Science Center Sediment Laboratory**. [S. l.]: GEOLOGICAL SURVEY RESTON VA, 2005.

SILVA, M. A. S. D. *et al.* Propriedades físicas e teor de carbono orgânico de um Argissolo Vermelho sob distintos sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s. l.], v. 30, n. 2, p. 329–337, 2006.

SILVA, C. C. *et al.* Unpaved road conservation planning at the catchment scale. **Environmental Monitoring and Assessment**, [s. l.], v. 193, n. 9, p. 595, 2021.

SIX, J. *et al.* A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. **Soil and Tillage Research**, [s. l.], v. 79, n. 1, p. 7–31, 2004.

SMITH, R.; PARLANGE, J.-Y. A parameter-efficient hydrologic infiltration model. **Water Resources Research**, [s. l.], v. 14, n. 3, p. 533–538, 1978.

SYTSMA, A. *et al.* A geospatial approach for estimating hydrological connectivity of impervious surfaces. **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 591, p. 125545, 2020.

TAKKEN, I. *et al.* Spatial evaluation of a physically-based distributed erosion model ŽLISEM/. [s. l.], p. 17, 1999.

TAKKEN, I. *et al.* The influence of both process descriptions and runoff patterns on predictions from a spatially distributed soil erosion model. **Earth Surface Processes and Landforms**, [s. l.], v. 30, n. 2, p. 213–229, 2005.

TIECHER, T. *et al.* Quantifying land use contributions to suspended sediment in a large cultivated catchment of Southern Brazil (Guaporé River, Rio Grande do Sul). **Agriculture, Ecosystems & Environment**, [s. l.], v. 237, p. 95–108, 2017.

TIECHER, T. *et al.* Tracing sediment sources in a subtropical rural catchment of southern Brazil by using geochemical tracers and near-infrared spectroscopy. **Soil and Tillage Research**, [s. l.], v. 155, p. 478–491, 2016.

TODINI, E. Hydrological catchment modelling: past, present and future. **Hydrology and Earth System Sciences**, [s. l.], v. 11, n. 1, p. 468–482, 2007.

TROCH, P. A. *et al.* Dealing with Landscape Heterogeneity in Watershed Hydrology: A Review of Recent Progress toward New Hydrological Theory: Landscape heterogeneity and hydrology Theory. **Geography Compass**, [s. l.], v. 3, n. 1, p. 375–392, 2009.

TROIAN, A. Análise multidimensional das pressões dos sistemas de produção agrícola na Bacia Hidrográfica do Rio Guaporé (Brasil/RS). [s. l.], p. 347, 2020.

VAN DE GIESEN, N. *et al.* Scale effects in Hortonian surface runoff on agricultural slopes in West Africa: Field data and models. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, [s. l.], v. 142, n. 1–2, p. 95–101, 2011.

VASCONCELLOS, B. N. de. Geoprocessamento aplicado na análise da fragilidade ambiental da bacia hidrográfica do rio Pardo-RS. [s. l.], 2013.

VERHEIJEN, F. G. A. *et al.* Concise overview of European soil erosion research and evaluation. **Acta Agriculturae Scandinavica, Section B - Soil & Plant Science**, [s. l.], v. 62, n. sup2, p. 185–190, 2012.

VON FREYBERG, J. *et al.* Implications of hydrologic connectivity between hillslopes and riparian zones on streamflow composition. **Journal of Contaminant Hydrology**, [s. l.], v. 169, p. 62–74, 2014.

WALLING, D.; ZHANG, Y. Predicting slope-channel connectivity: a national-scale approach. **IAHS PUBLICATION**, [s. l.], v. 288, p. 107–114, 2004.

- WILLIAMSON, T. N. *et al.* Classification of Ephemeral, Intermittent, and Perennial Stream Reaches Using a TOPMODEL-Based Approach. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, [s. l.], v. 51, n. 6, p. 1739–1759, 2015.
- WIRTZ, S. *et al.* Do deterministic sediment detachment and transport equations adequately represent the process-interactions in eroding rills? An experimental field study. **CATENA**, [s. l.], v. 101, p. 61–78, 2013.
- WISCHMEIER, W. H.; MANNERING, J. V. Relation of Soil Properties to its Erodibility. **Soil Science Society of America Journal**, [s. l.], v. 33, n. 1, p. 131–137, 1969.
- WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. **Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning**. [S. l.]: Department of Agriculture, Science and Education Administration, 1978. (, v. 537).
- WOHL, E.; MAGILLIGAN, F. J.; RATHBURN, S. L. Introduction to the special issue: Connectivity in Geomorphology. **Geomorphology**, [s. l.], v. 277, p. 1–5, 2017.
- WOODS, R.; SIVAPALAN, M. A synthesis of space-time variability in storm response: Rainfall, runoff generation, and routing. **Water Resources Research**, [s. l.], v. 35, n. 8, p. 2469–2485, 1999.
- WOODS, R. A.; SIVAPALAN, M.; ROBINSON, J. S. Modeling the spatial variability of subsurface runoff using a topographic index. **Water Resources Research**, [s. l.], v. 33, n. 5, p. 1061–1073, 1997.
- WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION; YANG, X. (org.). **Manual on sediment management and measurement**. Geneva, Switzerland: Secretariat of the World Meteorological Organization, 2003. (Operational hydrology report, v. no. 47).
- XIAO, H. B. *et al.* Physical structure and rainfall controls on subsurface hydrological connectivity in hillslope-riparian-stream continuums. **CATENA**, [s. l.], v. 214, p. 106286, 2022.
- YALIN, M. S. An expression for bed-load transportation. **Journal of the Hydraulics Division**, [s. l.], v. 89, n. 3, p. 221–250, 1963.
- YANG, D. *et al.* Global potential soil erosion with reference to land use and climate changes. **Hydrological Processes**, [s. l.], v. 17, n. 14, p. 2913–2928, 2003.
- YANG, C. T. Unit stream power and sediment transport. **Journal of the Hydraulics Division**, [s. l.], v. 98, n. 10, p. 1805–1826, 1972.
- YOO, J. *et al.* The valuation of off-site ecosystem service flows: Deforestation, erosion and the amenity value of lakes in Prescott, Arizona. **Ecological Economics**, [s. l.], v. 97, p. 74–83, 2014.
- YOUNG, R. *et al.* AGNPS: A nonpoint-source pollution model for evaluating agricultural watersheds. **Journal of soil and water conservation**, [s. l.], v. 44, n. 2, p. 168–173, 1989.

ZAKIA, M. J. B. *et al.* Delimitação da zona ripária em uma microbacia. **Revista Agrogeoambiental**, [s. l.], 2009.

ZEHE, E.; SIVAPALAN, M. Threshold behaviour in hydrological systems as (human) geo-ecosystems: manifestations, controls, implications. **Hydrology and Earth System Sciences**, [s. l.], v. 13, n. 7, p. 1273–1297, 2009.

ZHAO, Pei *et al.* Identifying the water source for subsurface flow with deuterium and oxygen-18 isotopes of soil water collected from tension lysimeters and cores. **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 503, p. 1–10, 2013.

ZHOU, P. *et al.* Effect of vegetation cover on soil erosion in a mountainous watershed. **CATENA**, [s. l.], v. 75, n. 3, p. 319–325, 2008.