

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

ESCOLA DE ENGENHARIA

INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS

MEL OLIVEIRA GUIRRO

**AVALIAÇÃO DA APLICABILIDADE DO MODELO GEOWEPP NA BACIA
HIDROGRÁFICA DO RIO CUNHA, MUNICÍPIO RIO DOS CEDROS (SC)**

Porto Alegre,

Janeiro 2018

MEL OLIVEIRA GUIRRO

**AVALIAÇÃO DA APLICABILIDADE DO MODELO GEOWEPP NA BACIA
HIDROGRÁFICA DO RIO CUNHA, MUNICÍPIO RIO DOS CEDROS (SC)**

Trabalho de Conclusão de Curso a ser apresentado ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheira Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Gean Paulo Michel

Coorientador: Prof. Dr. Masato Kobiyama

Porto Alegre,

Janeiro 2018

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, pelo acompanhamento constante, ensinamentos e discussões;

Ao meu coorientador, por inspirar o amor e o respeito pela ciência e pela natureza;

Aos colegas do Grupo de Pesquisa de Desastres Naturais da UFRGS, pelas discussões e pelo companheirismo;

À minha família, pelo apoio, pela estrutura, por instigarem minha curiosidade e minha afeição por estudar e aprender;

Aos amigos que me acompanharam nesse caminho, tornando-o mais leve e descontraído;

Aos professores ao longo da minha vida, pelos ensinamentos nos quais consolidaram meus conhecimentos, possibilitando a minha formação e a construção deste trabalho;

A todos que me acompanharam e me fortaleceram nesta jornada, minha mais sincera gratidão.

RESUMO

Os processos hidrossedimentológicos em uma bacia hidrográfica têm uma dinâmica complexa, envolvendo diferentes tipos de fenômenos, entre eles a erosão hídrica. As atividades humanas têm afetado esses processos, aumentando a taxa de perda de solo e acarretando diversos problemas. O objetivo principal do presente trabalho é analisar o funcionamento do modelo GeoWEPP, testando sua aplicabilidade na bacia hidrográfica do rio Cunha, situada no município do Rio dos Cedros (SC). A calibração do modelo se mostrou adequada, entretanto a validação foi insatisfatória. Hipóteses de fontes de incertezas foram levantadas: (1) o modelo pode estar representando erroneamente os fenômenos que geram produção de sedimentos; (2) a série temporal de dados deveria ser mais longa; (3) a simplificação na determinação de escoamento de base causa erros consideráveis; (4) a estação pluviométrica pode não ter sido atingida por chuvas orográficas na cabeceira do rio Cunha; e (5) a simplificação na determinação da duração dos eventos de chuva trouxe imprecisão a um dos parâmetros mais sensíveis do GeoWEPP.

Palavras-chave: Processos Hidrossedimentológicos, Erosão Hídrica, GeoWEPP

ABSTRACT

The hydrosedimentological processes in a watershed have a complex dynamic, involving several types of phenomena, among them water erosion. Human activities have affected these processes, increasing the rate of soil loss and causing various problems. The main objective of this paper is to analyze the operation of the GeoWEPP model, testing its applicability to the Cunha river basin, located in Rio dos Cedros (SC). The calibration of the model was adequate, however the validation was unsatisfactory. Hypotheses of uncertainty generation were raised: (1) the model may be erroneously representing the phenomena that generate sediment production; (2) the time series of data should be longer; (3) the simplification in determining the base flow causes considerable ns; (4) the rainfall station may not have been reached by orographic rainfall at the headwaters of the Cunha River; and (5) simplification in determining the duration of rainfall events has led to inaccuracy to one of the most sensitive parameters of GeoWEPP.

Keywords: Hydrosedimentological Processes, Water Erosion, GeoWEPP

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Intersecção do ciclo da água e do ciclo das rochas simplificado, indicando os processos envolvidos na hidrossedimentologia.....	17
Figura 2 – Ciclo Hidrossedimentológico	18
Figura 3 – Exemplo de captura de partículas em anteparo (Fonte: SILVA & SCHULZ, 2002)	22
Figura 4 – Exemplo de parcela de solo em estação experimental (Fonte: GUERRA, 2005)	23
Figura 5 – Exemplo do método das estacas (Fonte: GUERRA, 2005).....	24
Figura 6 – Exemplo de pino de erosão (Fonte: GUERRA, 2005).....	24
Figura 7 – Exemplo de estação experimental com simulador de chuva (Fonte: GUERRA, 2005).....	25
Figura 9 – Amostrador US DH-48 em foto e vista em corte (Fonte: CARVALHO <i>et al.</i> , 2000)	27
Figura 10 – Exemplo de curva de sedimentos: vazão sólida ($t.dia^{-1}$) <i>versus</i> vazão líquida ($m^3.s^{-1}$). (Fonte: FILL & SANTOS, 2001).....	28
Figura 11 – Exemplo de curva de sedimentos: concentração de sólidos suspensos ($mg.L^{-1}$) <i>versus</i> turbidez (NTU): a) curva ajustada para regressão linear; b) curva ajustava para potência. (CARDOSO <i>et al.</i> , 2012).	29
Figura 12 – Amostradores de sedimentos do leito: a) <i>Arnhem</i> ; b) <i>Helley-Smith</i> (CARVALHO, 2008)	30
Figura 13 – Corte transversal esquemático da medição feita pelo <i>Hydrophone</i> (Adaptado de: UCHIDA <i>et al.</i> , 2013)	30
Figura 14 – Fluxograma de preparação e de processamento dos dados no modelo SWAT (Fonte: GALHARTE <i>et al.</i> , 2014).....	36
Figura 15 – Fluxograma de processos analisados no LISEM (Adaptado de: RODRIGUES <i>et al.</i> , 2014).....	37
Figura 16 – Esquema do funcionamento do WEPP na versão bacia hidrográfica (Adaptado de: FLANAGAN & LIVINGSTON, 1995)	38
Figura 17 – Esquema do funcionamento do WEPP (Adaptado de: FLANAGAN <i>et al.</i> , 1995)	39
Figura 18 – Mapa de localização da bacia do rio Cunha, no município Rio dos Cedros (SC) (Adaptado de: Michel, 2013)	48
Figura 19 – Fluxograma do método de trabalho aplicado no presente estudo.....	50
Figura 20 – Modelo Digital de Elevação da bacia do rio Cunha.....	51
Figura 21 – Mapa de uso do solo na bacia do rio Cunha	52
Figura 22 – Mapa de tipos de solo da bacia do rio Cunha	53
Figura 23 – Curva-chave no exutório da bacia do rio Cunha (Fonte: GOERL, 2014).....	58
Figura 24 – Relação entre Turbidez (NTU) medida pelo sensor e os sólidos suspensos coletados (Fonte: GOERL, 2014)	59
Figura 25 – Sub-bacias e drenagens definidas pelo GeoWEPP	68
Figura 26 - Série de dados diários brutos observados de escoamento (m^3) e precipitação (mm).....	69

Figura 27 – Série de dados diários brutos observados de sedimentos (kg/10min) e precipitação (mm).....	70
Figura 28 – Evento 1: hidrograma medido e simulado	72
Figura 29 – Evento 1: geração de sedimento medida e simulada	72
Figura 30 – Evento 2: hidrograma medido e simulado	74
Figura 31 – Evento 2: geração de sedimentos medida e simulada	75
Figura 32 – Evento 3: hidrograma medido e simulado	76
Figura 33 – Evento 3: geração de sedimentos medida e simulada	77
Figura 34 – Evento 4: hidrograma medido e simulado	79
Figura 35 – Figura 4: geração de sedimentos medida e simulada	79
Figura 36 – Deslocamento entre dias na precipitação e no volume escoado medidos	80
Figura 37 – Evento 5: Hidrograma medido e simulado	81
Figura 38 – Evento 5: Geração de sedimentos medida e simulada	82
Figura 39 – Evento 6: hidrograma medido e simulado	87
Figura 40 – Evento 6: geração de sedimento medida e simulada	87
Figura 41 – Evento 7: hidrograma medido e simulado	89
Figura 42 – Evento 7: geração de sedimento medida e simulada	90
Figura 43 – Evento 8: hidrograma medido e simulado	91
Figura 44 – Evento 8: geração de sedimento medida e simulada	92
Figura 45 – Evento 9: hidrograma medido e simulado	94
Figura 46 – Evento 9: geração de sedimento medida e simulada	94
Figura 47 – Separação de escoamentos para o evento 1	114
Figura 48 – Separação de escoamentos para o evento 2	114
Figura 49 – Separação de escoamentos para o evento 3	115
Figura 50 – Separação de escoamentos para o evento 4	115
Figura 51 – Separação de escoamentos para o evento 5	116
Figura 52 – Separação de escoamentos para o evento 6	116
Figura 53 – Separação de escoamentos para o evento 7	117
Figura 54 – Separação de escoamentos para o evento 8	117
Figura 55 – Separação de escoamentos para o evento 9	118

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação dos modelos matemáticos USLE, RUSLE, MUSLE, SWAT, LISEM e WEPP	47
Tabela 2 – Usos do solo da bacia do rio Cunha e seus respectivos tipos de manejo no GeoWEPP	53
Tabela 3 – Tipos de solo da bacia do rio Cunha e seus respectivos solos no GeoWEPP	54
Tabela 4 – Equações da curva-chave adotadas para suas respectivas validades....	58
Tabela 5 – Eventos de precipitação utilizados para a calibração	62
Tabela 6 – Valores padrão do GeoWEPP para os parâmetros de dois tipos de solo	63
Tabela 7 – Avaliação da performance das métricas usadas (MORIASI <i>et al.</i> , 2007)	66
Tabela 8 – Eventos de precipitação usados para a validação.....	67
Tabela 9 – Evento 1: comparação entre valores medidos e simulados pelo GeoWEPP	71
Tabela 10 – Evento 1: métricas e performance da calibração de acordo com Moriasi <i>et al.</i> (2007)	73
Tabela 11 – Evento 2: comparação entre valores medidos e simulados pelo GeoWEPP	74
Tabela 12 – Evento 2: métricas e performance da calibração de acordo com Moriasi <i>et al.</i> (2007)	75
Tabela 13 – Evento 3: comparação entre valores medidos e simulados pelo GeoWEPP	76
Tabela 14 – Evento 3: métricas e performance da calibração de acordo com Moriasi <i>et al.</i> (2007)	77
Tabela 15 – Evento 4: comparação entre valores medidos e simulados pelo GeoWEPP	78
Tabela 16 – Evento 4: métricas e performance da calibração de acordo com Moriasi <i>et al.</i> (2007)	80
Tabela 17 – Evento 5: comparação entre valores medidos e simulados pelo GeoWEPP	81
Tabela 18 – Evento 5: métricas e performance da calibração de acordo com Moriasi <i>et al.</i> (2007)	82
Tabela 19 – Parâmetros do solo argissolo vermelho-amarelo obtidos na calibração e usados na validação.....	83
Tabela 20 – Parâmetros do solo cambissolo obtidos na calibração e usados na validação	84
Tabela 21 – Performance do modelo para cada evento de chuva de calibração para escoamento superficial. Em vermelho estão as métricas consideradas insatisfatórias	85
Tabela 22 – Performance do modelo para cada evento de chuva de calibração para produção de sedimentos. Em vermelho estão as métricas consideradas insatisfatórias	85
Tabela 23 – Evento 6: comparação entre valores medidos e simulados pelo GeoWEPP	86

Tabela 24 – Evento 6: métricas e performance da validação de acordo com Moriasi <i>et al.</i> (2007)	88
Tabela 25 – Evento 7: comparação entre valores medidos e simulados pelo GeoWEPP	89
Tabela 26 – Evento 7: métricas e performance da validação de acordo com Moriasi <i>et al.</i> (2007)	90
Tabela 27 – Evento 8: comparação entre valores medidos e simulados pelo GeoWEPP	91
Tabela 28 – Evento 8: métricas e performance da validação de acordo com Moriasi <i>et al.</i> (2007)	92
Tabela 29 – Evento 9: comparação entre valores medidos e simulados pelo GeoWEPP	93
Tabela 30 – Evento 9: métricas e performance da validação de acordo com Moriasi <i>et al.</i> (2007)	95
Tabela 31 – Performance do modelo para cada evento de chuva de validação para escoamento superficial. Em vermelho estão as métricas consideradas insatisfatórias	95
Tabela 32 – Performance do modelo para cada evento de chuva de validação para produção de sedimentos. Em vermelho estão as métricas consideradas insatisfatórias	96
Tabela 33 – Resumo da análise dos eventos de calibração e validação	102

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição	Unidade
A	Perda de solo	t/ha
a, b, c, d, k, n	Constantes de ajuste de curva	-
C	Fator de cultura, uso e manejo	-
CSS	Concentração de sólidos suspensos	mg/L
D	Perda acumulada pela percolação	m
D_f	Taxa de erosão do sulco	kg/s.m ²
D_i	Taxa de aporte de sedimentos do entressulco para o sulco	kg/s.m ²
D_r	Taxa de erosão	
e	Pressão de saturação parcial do vapor	kPa
e_s	Pressão de saturação do vapor	kPa
ET	Evapotranspiração acumulada	m
F_{bocal}	Fator de ajuste ao bocal de irrigação	-
F_i	Lâmina de infiltração acumulada	m
G	Carga de sedimentos	kg/s.m
h	Cota	m
h_0	Cota inicial	m
h_{esc}	Lâmina de escoamento	m
I_e	Intensidade efetiva da chuva	m/s
$I_{máx}$	Intensidade máxima da chuva	mm/min
$I_{média}$	Intensidade média da chuva	mm/min
ip	Intensidade do pico da precipitação	-
K	Fator e erodibilidade do solo	t/ha / (tm/ha.mm/h)
K_e	Condutividade hidráulica saturada efetiva	m/s
K_{iadj}	Fator de erodibilidade do solo entressulcos	Kg.s.m ⁻⁴
k_t	Coeficiente de transporte	m ^{0,5} .s ² /kg ^{0,5}
K_r	Fator de erodibilidade nos sulcos	s/m
L	Fator de comprimento do declive	m
Lac	Lâmina de chuva acumulada	m

L_{exc}	Lâmina de chuva em excesso acumulada	m
m_{sed}	Carga de sedimento	kg
n	Tempo de insolação	h/dia
N	Fotoperíodo	h/dia
NSE	Coeficiente de Eficiência de Nash Sutcliffe	-
NTU	Turbidez	NTU
P	Fator de práticas conservacionistas	-
P_{ac}	Precipitação acumulada	m
$PBIAS$	Viés Porcentual	%
P_{int}	Precipitação interceptada pela vegetação	m
Q_0	Irradiância solar no topo da atmosfera	langley/dia
Q	Vazão líquida	m ³ /s
Q_{ac}	Escoamento superficial acumulado	m
Q_{bt}	Escoamento de base	m ³ /dia
Q_i	Vazão no exutório no tempo i	m ³ /s
q_L	Descarga por largura de superfície	m ³ /m.s
Q_{ft}	Escoamento superficial proveniente da chuva	m ³ /dia
Q_{st}	Descarga sólida em suspensão	t.dia ⁻¹
Q_d	Fluxo lateral da subsuperfície	m
Q_g	Irradiância solar global diária	langley/dia
q_p	Vazão de pico	m ³ /s
Q_t	Vazão total	m ³ /dia
R	Fator de erosividade da chuva	t m/ha.mm/h
R_s	Espaçamento dos sulcos	m
RSR	Razão da Raíz do Erro Quadrático Médio com o Desvio Padrão Observado	-
S	Fator grau do declive	-
SDR_{RR}	Taxa de transferência de sedimento	-
SS	Concentração de sólidos suspensos	kg/m ³

T	Temperatura	°C
t	Tempo	s
t_e	Tempo de duração da chuva	h
T_c	Capacidade de transporte de sedimento	kg/s.m
t_c	Tempo entre empoçamento instantâneo e empoçamento real	s
T_d	Temperatura do porto de orvalho	°C
$t_{máx}$	Tempo para chuva máxima	h
t_p	Tempo para intensidade máxima de chuva	-
UR	Umidade relativa	%
v	Velocidade do escoamento	m/s
V_f	Velocidade de queda efetiva	m/s
V_{esc}	Volume de escoamento superficial	m ³
w	Largura dos sulcos	m
x	Distância	m
x_v	Comprimento da vertente	m
Y	Aporte de sedimentos	T
$\gamma^{médio}$	Média dos valores observados	-
γ^{obs}	Dado observado	-
γ^{sim}	Valor simulado	-
β	Coeficiente de turbulência	-
Δt	Resolução temporal dos dados	s
σ_{ir}	Taxa de escoamento entressulcos	m/s
θ	Umidade do solo	m
θ_d	Déficit da umidade do solo	m/m
θ_{in}	Umidade do solo inicial	m
φ	Latitude	o
φ_m	Capilaridade média potencial	m
τ_f	Tensão de cisalhamento	N/m ² ; Pa

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	13
2.	OBJETIVOS.....	16
2.1	OBJETIVO GERAL.....	16
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
3.1	CONCEITO DE HIDROSEDIMENTOLOGIA.....	17
3.2	PROCESSOS HIDROSEDIMENTOLÓGICOS.....	18
3.3	FATORES QUE INFLUENCIAM A EROSÃO	20
3.4	IMPACTOS DA EROSÃO.....	20
3.5	MONITORAMENTO HIDROSEDIMENTOLÓGICO	21
3.5.1	Monitoramento na superfície do solo	21
3.5.2	Monitoramento no canal	25
3.5.2.1	<i>Carga dissolvida.....</i>	26
3.5.2.2	<i>Carga em suspensão</i>	26
3.5.2.3	<i>Carga do leito.....</i>	29
3.6	MODELAGEM	31
3.6.1	Modelo USLE - <i>Universal Soil Loss Equation</i>.....	33
3.6.2	Modelo RUSLE - <i>Revised Universal Soil Loss Equation</i>.....	34
3.6.3	Modelo MUSLE – <i>Modified Universal Soil Loss Equation</i>.....	35
3.6.4	Modelo SWAT – <i>Soil and Water Assessment Tool</i>.....	35
3.6.5	Modelo LISEM – <i>Limburg Soil Erosion Model</i>.....	36
3.6.6	Modelo WEPP – <i>Water Erosion Prediction Project</i>.....	37
3.6.6.1	<i>Exemplos de utilização no Brasil.....</i>	44
3.6.7	Comparação entre modelos	47
4.	MATERIAIS E MÉTODOS	48
4.1	ÁREA DE ESTUDO.....	48
4.2	FLUXOGRAMA	50
4.3	DADOS UTILIZADOS.....	51
4.3.1	Dados de entrada do modelo	51
4.3.1.1	<i>Espaciais.....</i>	51
4.3.1.2	<i>Clima.....</i>	54
4.3.2	Dados para calibração	57

4.3.2.1 Volume de escoamento de base	60
4.4 CALIBRAÇÃO DO MODELO	62
4.4.1 Avaliação da calibração	65
4.5 VALIDAÇÃO DO MODELO	67
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	68
5.1 CALIBRAÇÃO DO MODELO	71
5.1.1 Evento 1	71
5.1.2 Evento 2	73
5.1.3 Evento 3	76
5.1.4 Evento 4	78
5.1.5 Evento 5	80
5.1.6 Análise dos eventos de calibração	83
5.2 VALIDAÇÃO DO MODELO	85
5.2.1 Evento 6	86
5.2.2 Evento 7	88
5.2.3 Evento 8	91
5.2.4 Evento 9	93
5.2.5 Análise dos eventos de validação	95
5.3 ANÁLISE DAS INCERTEZAS	96
5.3.1 Modelo inadequado	96
5.3.2 Calibração do modelo inadequada	98
5.3.3 Imprecisão nos dados medidos e de entrada	99
5.3.4 Falta de dados de entrada	100
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	102
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	105
APÊNDICE A – Separação de escoamentos de cada evento	114
APÊNDICE B – Parâmetros padrão de uso de solo do GeoWEPP	119

1. INTRODUÇÃO

Apesar da erosão do solo ser um fenômeno natural, seu processo tem sido intensificado pela ação humana e está se tornando um sério problema que afeta a sustentabilidade do planeta. FAO (2015) indica que na última década a erosão causada pela água foi de 20 a 30 bilhões de toneladas de solo por ano.

De acordo com Pimentel *et al.* (1995), a taxa de formação natural do solo é de 1 ton.ha⁻¹.ano⁻¹, enquanto que em lugares como Ásia, África e América do Sul, que apresentam climas tropicais, a taxa de erosão alcança valores como 30 a 40 ton.ha⁻¹.ano⁻¹. As atividades humanas, principalmente a agricultura, vêm aumentando a taxa de erosão para muito acima da taxa de formação do solo, gerando um desequilíbrio.

A erosão intensificada traz diversos impactos negativos à sociedade. O maior deles é a perda de nutrientes do solo, que diminui a produtividade da terra na agricultura e aumenta os fenômenos de desertificação e arenização. Além disso, a erosão implica o aumento de assoreamento nos rios, de inundações e de eutrofização das águas.

Os processos de erosão do solo estão ligados à processos sedimentológicos e, em regiões úmidas, são mais especificamente associados a processos hidrossedimentológicos. O ciclo hidrossedimentológico compreende o movimento das partículas devido à ação da água. As fases do ciclo são a produção, o transporte e a deposição dos sedimentos. A água da chuva escoando sobre solos expostos é um dos principais fatores que causam erosão.

O entendimento da dinâmica dos sedimentos é essencial para o planejamento do uso do solo e para a gestão sustentável de bacias hidrográficas. Ainda há uma dificuldade em entender e prever essa dinâmica (BURTON & BATHURST, 1998). Em geral, os modelos computacionais não fornecem uma análise ampla de todas as fases do ciclo hidrossedimentológico, não contemplando todos os processos de transporte de sedimentos. Além disso, os modelos não contemplam todos os fenômenos que induzem a perda de solo, pois além da erosão, há outros fenômenos que implicam a perda de solo, como os movimentos de massa e o próprio rio que escava seu leito.

Nos movimentos de massa, por exemplo, o volume de sedimentos transportado é muito maior que na erosão, embora esse fenômeno tenha uma ocorrência muito menos frequente.

A previsão da perda de solo de uma área ainda se encontra incipiente no Brasil, mesmo sendo um problema relevante e sério em termos socioeconômicos e ambientais. Portanto, pesquisas científicas são necessárias para melhorar a prevenção de desastres relacionados a água e sedimentos.

Modelos computacionais podem facilitar a compreensão desta complexa dinâmica hidrossedimentológica (TUCCI, 2005). Um modelo é o *Water Erosion Prediction Project* (WEPP), desenvolvido por Lane & Nearing (1989), sendo baseado em processos físicos e com análise temporal contínua. Sua versão para análise de bacias hidrográficas com o uso do software ArcGIS é chamado de GeoWEPP.

Neste contexto, a bacia hidrográfica do rio Cunha, localizada no município de Rio dos Cedros, Santa Catarina, tem sido utilizada para o estudo da geração de sedimentos. Nesta bacia ocorreram vários deslizamentos em 2008 (MICHEL, 2011) devido a uma intensa chuva, gerando muitos sedimentos. Com esta perspectiva, o presente trabalho prevê o uso do GeoWEPP para auxiliar a compreensão de como os processos hidrológicos afetam a produção de sedimentos desta bacia.

Este trabalho se justifica devido à importância da bacia hidrográfica do rio Cunha, sendo uma área montanhosa, com potencial de geração de energia elétrica e com tendência de exploração turística e urbana. O município Rio dos Cedros conta com algumas Pequenas Centrais Hidrelétricas que produzem energia elétrica e, sendo assim, informações para futuras análises de assoreamento de seus reservatórios e rios e da vida útil de seus equipamentos é de extrema importância na produção de energia.

Além disso, como houve o monitoramento hidrológico e sedimentológico no exutório desta bacia, ela é indicada para realizar esta complexa análise da produção de sedimentos. O modelo GeoWEPP foi escolhido por ser considerado um modelo fortemente embasado por processos físicos com ampla consideração de fenômenos hidrossedimentológicos. Sendo assim, o presente trabalho pode auxiliar na gestão

sustentável do uso do solo do município de Rio dos Cedros, além de auxiliar esta análise em outros locais montanhosos semelhantes.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral do presente trabalho é analisar o funcionamento do modelo GeoWEPP, testando sua aplicabilidade na bacia hidrográfica do rio Cunha, município do Rio dos Cedros (SC).

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Compatibilizar os dados de entrada que são requeridos pelo GeoWEPP que caracterizem a bacia, como dados climáticos, de relevo, de tipos de solo e de uso do solo;
- Avaliar a calibração e validação do modelo, conforme a vazão líquida e sólida no exutório da bacia;
- Analisar a produção de sedimentos da bacia hidrográfica do rio Cunha.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 CONCEITO DE HIDROSEDIMENTOLOGIA

A hidrologia estuda as etapas do ciclo da água, tais como os processos de precipitação, infiltração, escoamento, evaporação, transpiração e condensação (TUCCI, 2005). O ciclo das rochas envolve a formação e transformação de rochas ígneas, sedimentares e metamórficas, incluindo, entre outros, os processos de erosão transporte e deposição de sedimentos (CARNEIRO *et al.*, 2009). A intersecção entre esses dois ciclos, mais precisamente ao sistema sedimentar no ciclo das rochas, corresponde à área de estudo da Hidrossedimentologia (Figura 1).

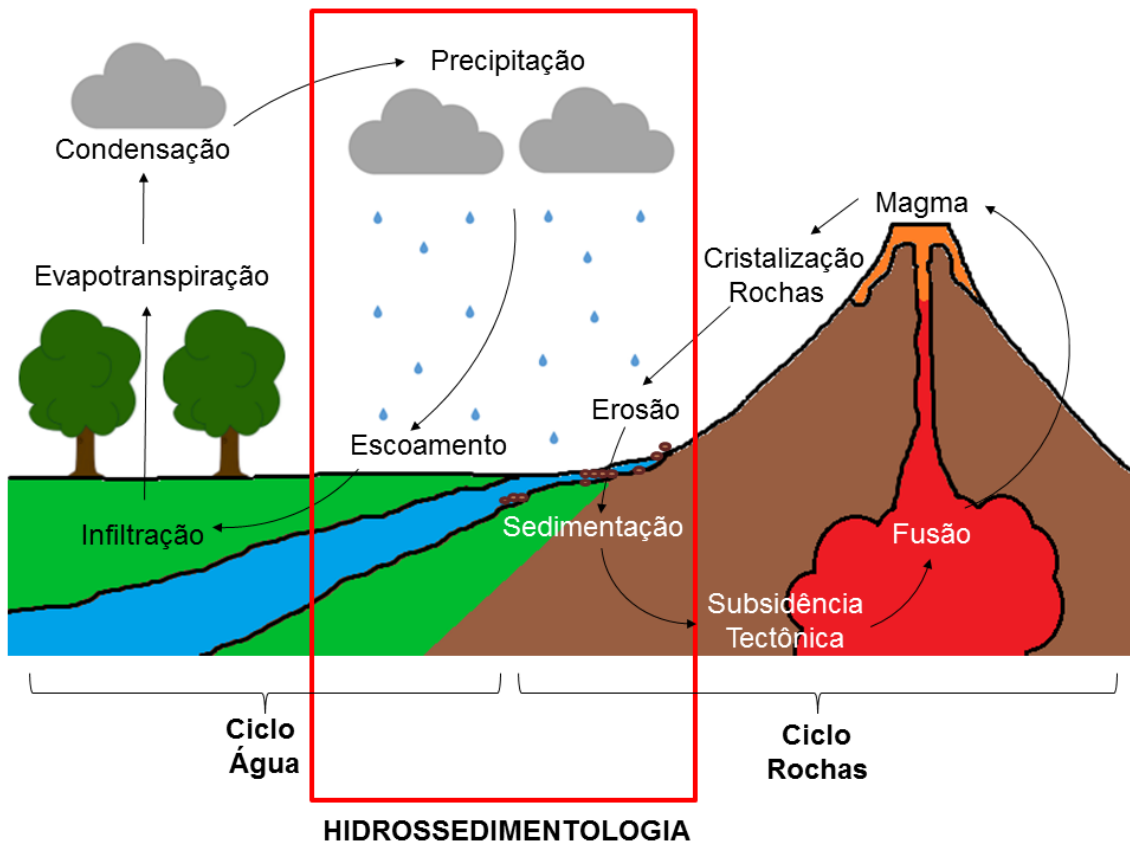


Figura 1 – Intersecção do ciclo da água e do ciclo das rochas simplificado, indicando os processos envolvidos na hidrossedimentologia

Assim, quando ocorre a precipitação e o escoamento da água e, conseqüentemente, a erosão, o transporte e a deposição dos sedimentos, estamos descrevendo processos hidrossedimentológicos. A hidrossedimentologia estuda, portanto, a interface água-solo.

3.2 PROCESSOS HIDROSSEDIMENTOLÓGICOS

Conforme definido, a hidrossedimentologia retrata a interação entre hidrologia e sedimentologia. A água que precipita em um evento chuvoso atinge o solo e escoar conforme a forma do relevo, criando caminhos preferenciais e redes de drenagem. A energia desse fluido é suficiente para remover e transportar partículas sólidas, até que ela se reduz de tal forma que o transporte não seja mais possível e, assim, as partículas são depositadas (BORDAS & SEMMELMAN, 2012). Portanto, o ciclo hidrossedimentológico envolve a desagregação, o transporte e a deposição de partículas sólidas encontradas na superfície da bacia hidrográfica, conforme a Figura 2.

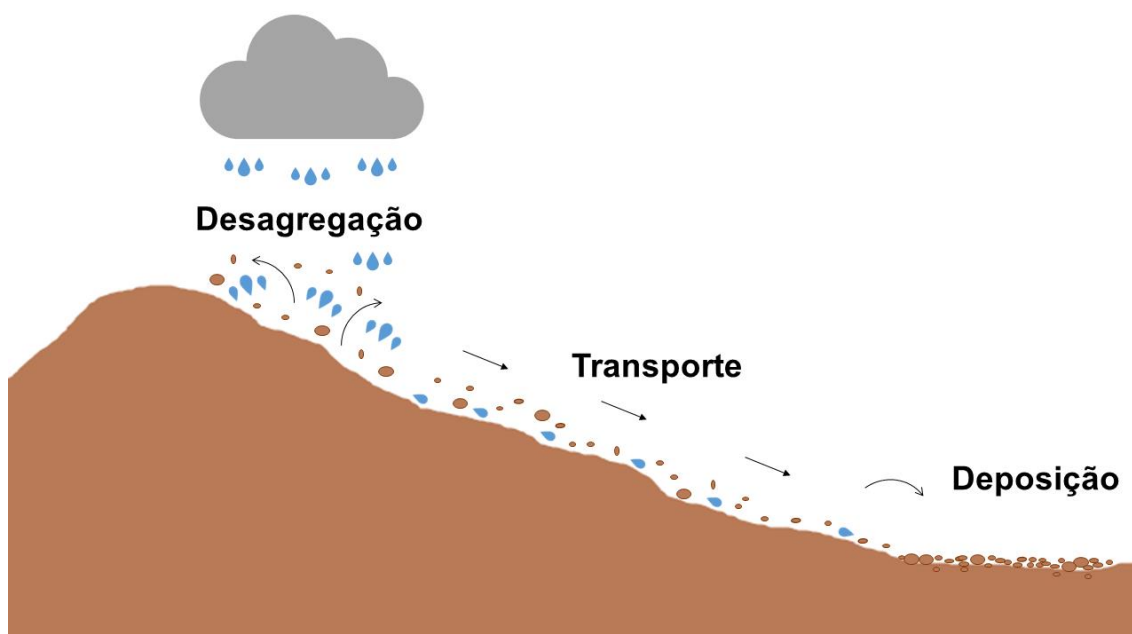


Figura 2 – Ciclo Hidrossedimentológico

Diferentemente do ciclo hidrológico, o ciclo hidrossedimentológico é aberto, com o movimento das partículas de montante para jusante. A seguir, cada etapa do ciclo hidrossedimentológico é discutida.

a) Desagregação

A primeira etapa do ciclo hidrossedimentológico é a desagregação das partículas, ou seja, o desprendimento de partículas sólidas do meio no qual elas fazem parte, como as rochas. A erosão é um desses processos de desagregação. Os dois

principais agentes causadores da erosão são a água e o vento. O principal fenômeno que causa a erosão é o impacto da gota da chuva, por causa da sua alta velocidade com elevada energia cinética (BORDAS & SEMMELMAN, 2012). Com o impacto das gotas de chuva, diversas partículas sólidas ficam soltas e disponíveis na superfície para serem transportadas.

b) Transporte

Além de causar erosão, o impacto da gota da chuva e o escoamento da água sobre o solo também transportam os sedimentos (CARVALHO, 2008). Enquanto o impacto da gota de chuva transporta em curtas distâncias, o escoamento pode gerar um deslocamento longo, sendo normalmente o principal processo considerado no transporte de sedimentos.

Podemos separar o solo em duas regiões distintas, conforme a concentração do escoamento da água: sulcos e entressulcos. A lâmina de água rasa que escoar sobre a superfície do terreno causa a chamada erosão laminar ou entressulcos. Nesta região, o impacto da gota da chuva é o principal agente de desagregação e transporte das partículas. Diferentemente, quando a água concentra seu escoamento em pequenos canais, ocorre a chamada erosão em sulcos, sendo o escoamento o principal agente de desagregação e transporte de partículas. Quando estes sulcos ou lâminas da água encontram um canal, ocorre um transporte mais rápido. Além disso, o próprio rio produz sedimentos escavando seu leito.

Outros fenômenos que podem induzir a desagregação e ao transporte de sedimentos são os movimentos de massa, como as quedas de blocos, fluxos de detritos, escorregamentos e o rastejo do solo, conforme a classificação de Augusto Filho (1992). Nesses fenômenos, um grande volume de sedimentos é transportado, diferentemente da erosão que ocorre corriqueiramente na bacia.

c) Deposição

A última etapa do ciclo hidrossedimentológico, a deposição, ocorre quando os sedimentos alcançam locais de baixa declividade ou depressões (CARVALHO, 2008). Quando os sedimentos alcançam rios, eles podem continuar a ser transportados ou podem ser depositados, dependendo do peso da partícula e da velocidade da água.

Rios com baixa velocidade tendem a depositar mais sedimentos. Se a velocidade da água aumentar, os sedimentos são facilmente removidos, iniciando o ciclo novamente. Quando os sedimentos alcançam o fundo do mar, dificilmente serão transportados novamente.

3.3 FATORES QUE INFLUENCIAM A EROSÃO

Diversos fatores influenciam a erosão, sendo eles a declividade, vegetação, textura e estrutura do solo, taxa de infiltração, entre outros (PIMENTEL *et al.*, 1995). Dentre estes fatores, a declividade é um dos que tem maior influência, sendo que a taxa de erosão é maior em áreas com maior declividade. Nestas mesmas áreas com gradiente elevado ocorrem os movimentos de massa. Enquanto que erosão é um fenômeno uniforme e constante ao longo do tempo, o movimento de massa é um evento episódico e muitas vezes catastrófico, que ocorre esporadicamente. Portanto, os escorregamentos ocorrem com menos frequência, mas carregam mais sedimentos que a erosão superficial (KOBAYAMA *et al.*, 2011).

No que se refere à vegetação, ela tende a proteger o solo contra a erosão superficial e contra o impacto da gota da chuva. Assim, solos expostos são muito mais facilmente erodíveis. Quanto à textura do solo, solos arenosos tendem a ser mais facilmente erodidos do que argilosos, pois areais têm menor coesão. Já a taxa de infiltração no solo influencia na erosão pois um solo mais impermeável implica mais escoamento superficial, que implica maior taxa de erosão.

3.4 IMPACTOS DA EROSÃO

A geração de sedimentos em excesso causa diversos impactos negativos ambientais, sociais e econômicos. Um dos principais impactos é a perda de nutrientes do solo, diminuindo sua fertilidade e a produtividade da agricultura (PIMENTEL *et al.*, 1995). A perda de terras férteis e a perda de habitat estão ligadas aos fenômenos da desertificação e arenização, causadas pela retirada da vegetação.

Além disso, os sedimentos erodidos são transportados e se depositam em outro lugar, gerando novos impactos. Quando depositados dentro da calha fluvial, ocorrem problemas de assoreamento, que aumentam a ocorrência de inundações, gerando um grande impacto econômico e social. O assoreamento em uma barragem diminui o volume útil do reservatório e pode, por exemplo, diminuir a produção de energia em hidrelétricas. Como o Brasil tem 88% da sua matriz energética baseada em hidrelétricas, essa é uma grande preocupação (TUNDISI, 2007). A deposição na calha fluvial também pode causar a eutrofização da água, impactando a biota presente com a perda de habitat, como ocorreu no Desastre de Mariana no Estado de Minas Gerais em 2015 (VIANA & COSTA, 2016).

Outro exemplo é o aumento do custo do tratamento da água com a presença de sedimentos. Kobiyama *et al.* (2011) relataram um exemplo que após os escorregamentos no rio Cubatão do Norte, no estado de Santa Catarina, a turbidez da água foi elevada drasticamente, impossibilitando o abastecimento de água na cidade de Joinville.

3.5 MONITORAMENTO HIDROSSEDIMENTOLÓGICO

Existem diversas técnicas para monitorar e quantificar o fluxo de sedimento na bacia hidrográfica, tanto na superfície do terreno quanto dentro das calhas dos rios. As principais técnicas são descritas a seguir.

3.5.1 Monitoramento na superfície do solo

Para medir a erosão e o transporte causados pelo impacto da gota de chuva e pelo escoamento superficial no solo, existem diferentes técnicas. Exemplos dessas técnicas são apresentadas a seguir. Muitas técnicas somente realizam a amostragem pontual do solo perdido, sendo necessário repetir o método continuamente para realizar o monitoramento. Diferentes tipos de monitoramentos são discutidos a seguir.

a) Captura de Partículas em Anteparo

Uma forma de medir a erosão gerada pelo impacto da gota da chuva foi demonstrada por Silva & Schulz (2002) e baseia-se em um anteparo com uma espuma

perpendicular ao solo, de forma que os sedimentos salpicados pelo impacto da gota de chuva fique resguardado na espuma (Figura 3). Após o evento chuvoso, o dispositivo é coletado e pesado, a fim de se descobrir a quantidade de solo erodida.

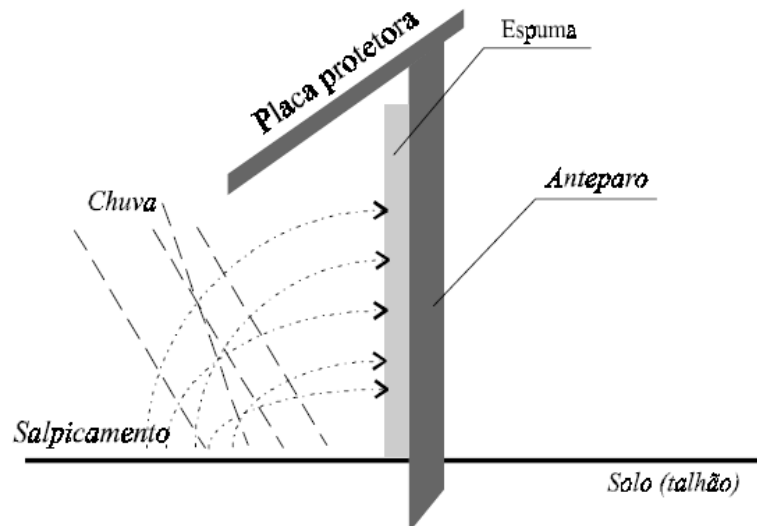


Figura 3 – Exemplo de captura de partículas em anteparo (Fonte: SILVA & SCHULZ, 2002)

b) Parcelas de Solo em Estações Experimentais

Uma das técnicas mais comuns para quantificar a erosão emprega o uso de parcelas do solo em estações experimentais (GUERRA, 2005), sendo usadas para construir a Equação Universal de Perda de Solo (USLE – *Universal Soil Loss Equation*) por Wischmeier & Smith (1978). Esse método consiste em definir uma área de solo do terreno, ou seja, uma parcela, que é monitorada. O terreno é inclinado e na lateral inferior da parcela encontra-se uma calha onde são coletados a água e os sedimentos que são retirados da parcela (Figura 4). Assim, quantifica-se o volume de solo perdido dessa área. Modificando-se características da parcela como a topografia, a plantação e o manejo do solo, encontram-se diferentes resultados de perda de solo (GUERRA, 2005). É comum que exista algum equipamento de quantificação da chuva, como pluviômetros, perto da parcela para fazer o registro e determinar como a intensidade da chuva influencia na perda de solo.

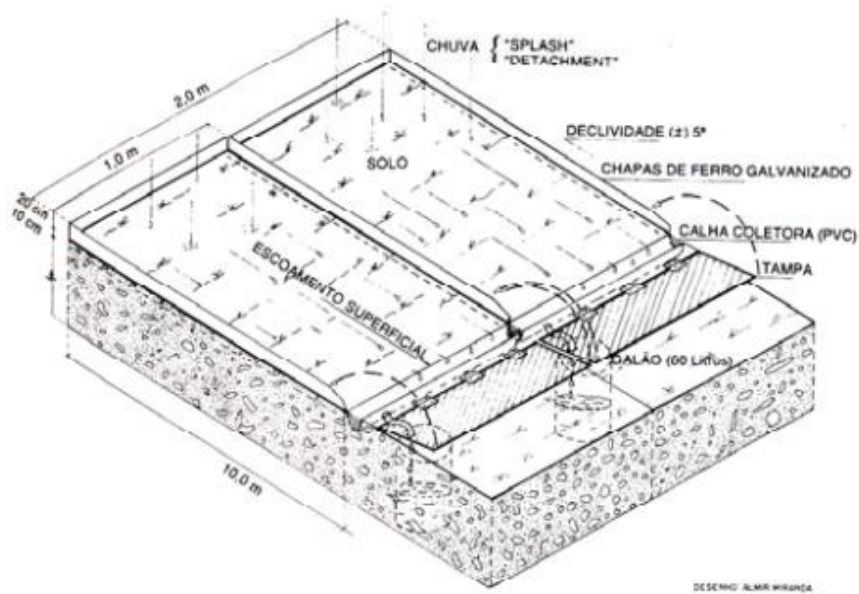


Figura 4 – Exemplo de parcela de solo em estação experimental (Fonte: GUERRA, 2005)

c) Método das Estacas

Uma técnica simples que indica a evolução da erosão é o método das estacas. Essa técnica é usada principalmente para acompanhar o crescimento de ravinas e voçorocas, que são grandes sulcos no terreno que crescem rapidamente devido ao escoamento da água. Estacas são fincadas no solo e continuamente mede-se a distância da estaca até a borda da ravina ou voçoroca (Figura 5). Uma redução na distância entre a estaca e a borda da ravina um incremento na erosão (GUERRA, 2005).

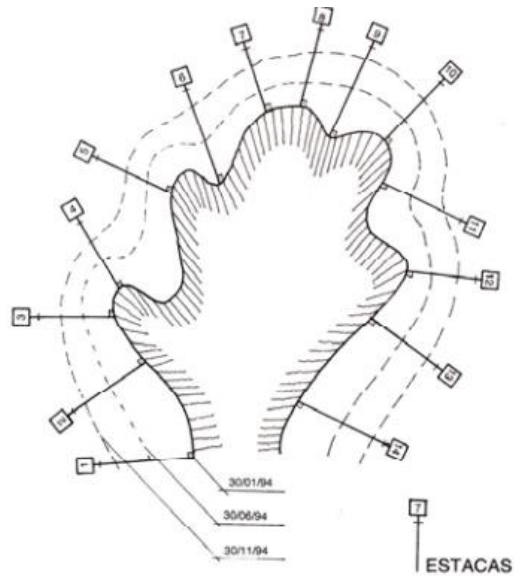


Figura 5 – Exemplo do método das estacas (Fonte: GUERRA, 2005)

d) Pino de Erosão

Esta técnica baseia-se em pino enterrado no solo. Conforme ocorre a perda de solo, mais o pino fica exposto, sendo medido a profundidade de solo perdida e estimado o volume do solo (Figura 6). Esta técnica estima principalmente a erosão laminar que ocorre na região entressulcos (GUERRA, 2005).

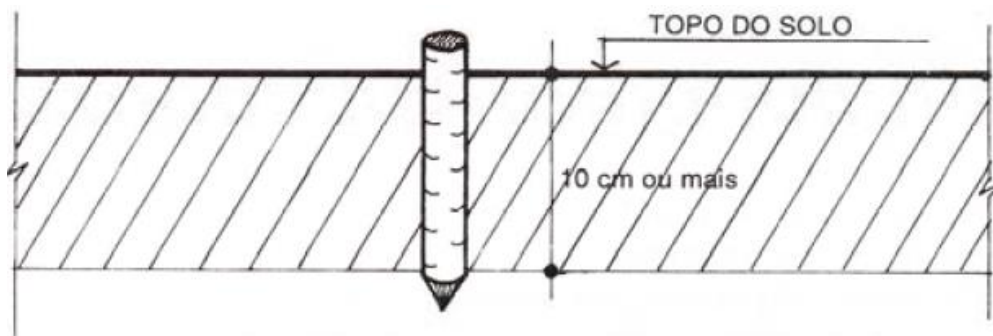


Figura 6 – Exemplo de pino de erosão (Fonte: GUERRA, 2005)

e) Estações experimentais com simuladores de chuva

Um método mais elaborado que pode ser usado tanto em campo quanto em laboratório é o de estações experimentais com simuladores de chuva. Instala-se um simulador de chuva, ou seja, um equipamento parecido com um chuveiro em certa altura acima do solo que se deseja monitorar (Figura 7). A grande vantagem desse método é que a intensidade da chuva é controlada e pode haver a reaplicação do

método (GUERRA, 2005). Porém, ele não é tão simples de ser operado sob grande quantidade de água usada e por sofrer grande influência do vento.

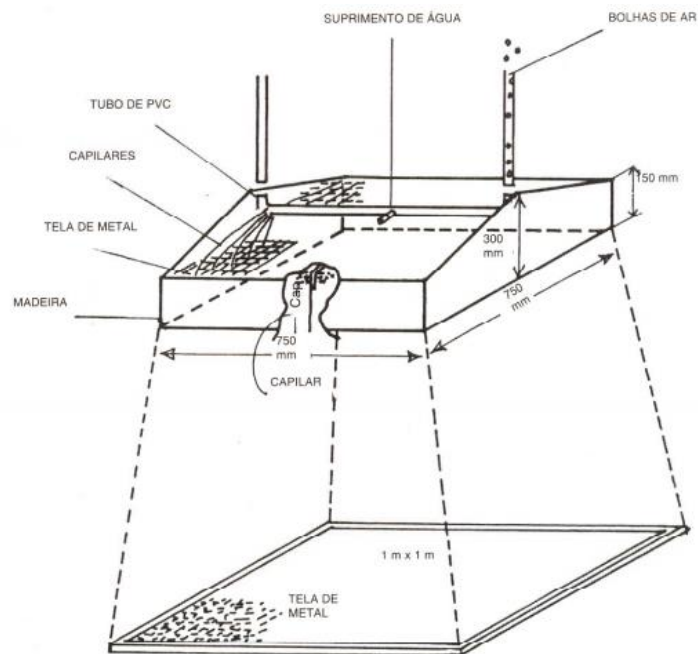


Figura 7 – Exemplo de estação experimental com simulador de chuva (Fonte: GUERRA, 2005)

f) Sensoriamento Remoto

Também existem métodos indiretos do monitoramento da erosão, com uso de sensoriamento remoto. A erosão altera a topografia do terreno. Sendo assim, é possível fazer a análise do Modelo Digital de Terreno (MDT), comparando antes e depois do processo erosivo, quantificando a área e o volume do solo perdido (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**). Fotos aéreas também podem auxiliar na execução deste método.

3.5.2 Monitoramento no canal

Os métodos discutidos até esse momento monitoram a erosão na superfície terrestre. Estes sedimentos tendem a atingir um curso hídrico e, no fim, os sedimentos tendem a ser transportados pelos canais fluviais da bacia. Sendo assim, também é necessário quantificar a porção de sedimentos sendo transportados em cursos de água. Uma forma de classificar os sedimentos nos rios é devido ao seu transporte,

sendo divididos em três tipos: carga dissolvida, carga em suspensão e carga de leito (SANTOS *et al.*, 2001).

3.5.2.1 Carga dissolvida

A carga dissolvida nos canais tem origem pelo intemperismo de rochas solúveis, como o calcário, pela ação da água subterrânea ácida em zonas cársticas, e não por processos erosivos do escoamento superficial (SANTOS *et al.*, 2001). O monitoramento de carga dissolvida pode ser feito analisando a condutividade elétrica da água do rio (OLIVEIRA *et al.*, 2014). Geralmente, analisa-se a carga dissolvida para verificar qualidade da água.

3.5.2.2 Carga em suspensão

Os sedimentos transportados em suspensão costumam ser finos, ou seja, argila e silte. A medição pontual da carga em suspensão pode ser feita através do método de integração vertical, no qual são feitas amostragens verticais em uma seção transversal do rio, com uso de uma garrafa ou uma saca que percorre um trajeto vertical com velocidade constante. Na mesma seção transversal, podem ser feitas várias verticais. Os sedimentos que estão sendo transportados em suspensão no rio são coletados, homogeneizados e posteriormente são realizados ensaios de laboratório para determinação da concentração de sedimentos em suspensão (CARVALHO, 2008). O produto da concentração de sedimentos e a vazão do rio gera um valor de carga em suspensão.

O amostrador mais comum utilizado para a amostragem vertical é o US DH-48, usada para rios com pequena profundidade. O US DH-48 é constituído por uma haste graduada com uma garrafa com um bico na ponta, conforme ilustrado na Figura 8. Ele é mergulhado a velocidade constante e os sedimentos em suspensão ficam presos dentro da garrafa, sendo posteriormente pesados em análise de laboratório.

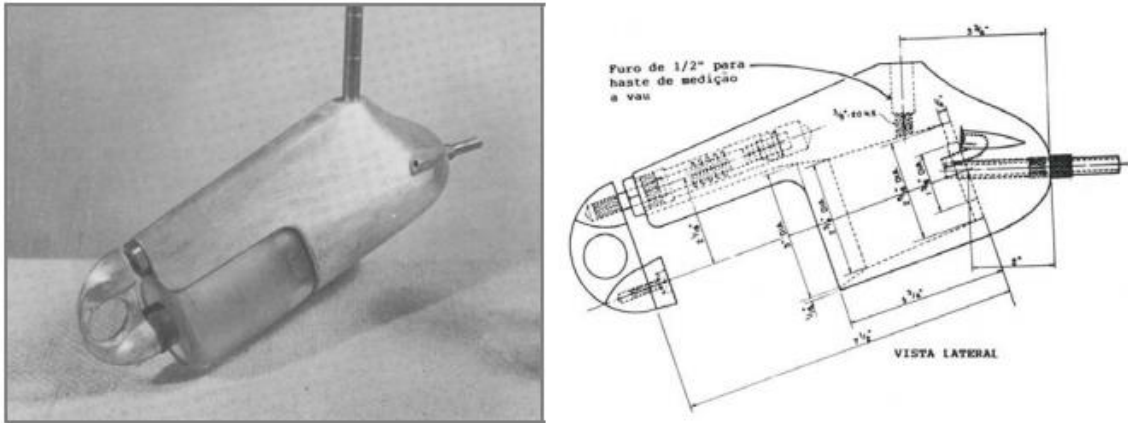


Figura 8 – Amostrador US DH-48 em foto e vista em corte (Fonte: CARVALHO *et al.*, 2000)

O método de integração vertical fornece uma informação pontual sobre a carga de sedimentos. Para fazer o monitoramento é preciso fazer essa amostragem constantemente. Essa amostragem pode ser trabalhosa e cara, por isso foram desenvolvidos métodos indiretos de determinação de sólidos em suspensão, a partir da chamada curva-chave de sedimentos.

a) Relação Vazão Líquida x Vazão Sólida

A curva-chave de sedimentos, em sua forma mais conhecida e usual, relaciona a concentração de descarga sólida em suspensão e a descarga líquida (CARVALHO *et al.*, 2000). Quando aumenta a vazão do rio, há uma tendência de aumentar a concentração de sólidos no rio, pois a chuva gera escoamento que transporta sedimentos para o canal. Para a construção da curva, deve-se medir a cota do nível d'água do rio, transformar esse valor na vazão líquida e medir por amostragem a quantidade de sólidos suspensos diversas vezes. Rios pequenos em áreas declivosas devem ter medições frequentes, podendo ser necessário medição horária (CARVALHO *et al.*, 2000). Plotam-se os pontos e traça-se a curva-chave, como indicado na Equação 1, sendo geralmente uma curva do tipo potencial.

$$Q_{st} = a \cdot Q^n \quad (1)$$

onde Q_{st} é a descarga sólida em suspensão; a e n são constantes de ajuste (adimensionais); e Q é a vazão líquida. As constantes a e n devem ser determinadas a partir de um gráfico como na Figura 9.

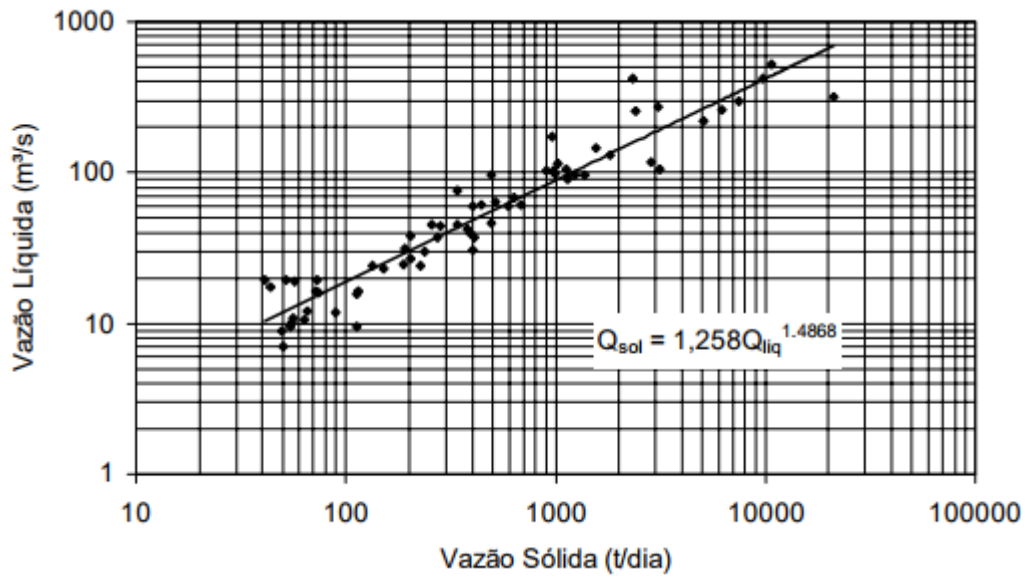


Figura 9 – Exemplo de curva de sedimentos: vazão sólida (t.dia⁻¹) versus vazão líquida (m³.s⁻¹).
(Fonte: FILL & SANTOS, 2001)

b) Relação Turbidez x Concentração de Sólidos Suspensos

Um outro método de monitoramento da concentração de sólidos suspensos é com o auxílio da turbidez. A turbidez pode ser medida com diversos aparelhos, sendo o turbidímetro nefelométrico o mais comum, gerando resultados em unidade de NTU (*Nefelometric Turbidity Unit*). O turbidímetro é um sensor óptico que mede a dispersão da luz na água (FILL & SANTOS, 2001).

De forma análoga à vazão líquida, quanto maior a turbidez da água, maior a concentração de sólidos suspensos. Para construir a curva-chave dos sedimentos, as amostragens da concentração de sólidos suspensos e da turbidez devem ser feitas várias vezes. Assim, é possível plotar os pontos e construir o gráfico com o ajuste de curva, que pode ser uma regressão linear (Equação 2) ou potencial (Equação 3) (CARDOSO *et al.*, 2012).

$$CSS = a \cdot NTU + b \quad (2)$$

$$CSS = c \cdot NTU^d \quad (3)$$

onde CSS é a concentração de sedimento em suspensão ($mg.L^{-1}$); NTU é a turbidez (NTU); e a , b , c e d são coeficientes de ajuste (adimensional).

Assim, com o auxílio da curva chave definida (como exemplo as curvas da Figura 10) descobre-se a concentração de sólidos suspensos medindo apenas a turbidez da água, que é um parâmetro de fácil obtenção.

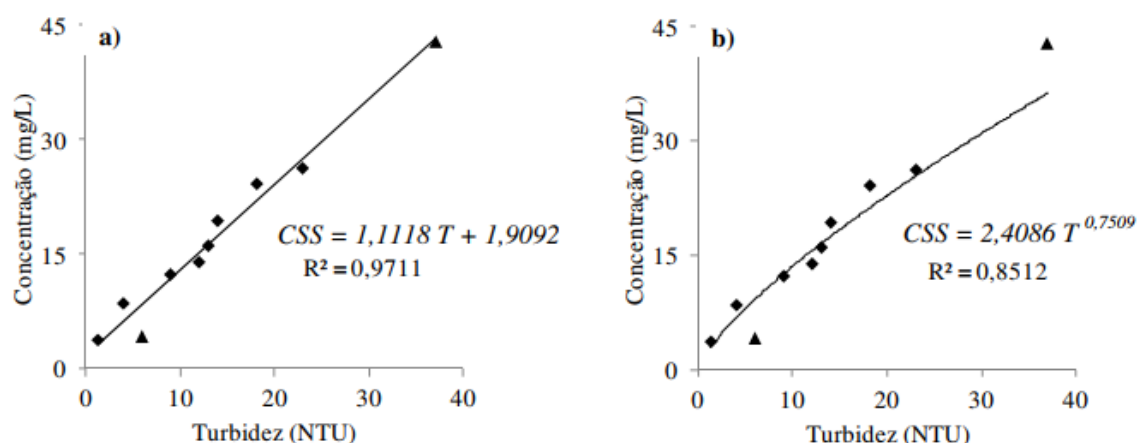


Figura 10 – Exemplo de curva de sedimentos: concentração de sólidos suspensos ($mg.L^{-1}$) versus turbidez (NTU): a) curva ajustada para regressão linear; b) curva ajustada para potência. (CARDOSO *et al.*, 2012).

A curva de sedimentos feita com a turbidez apresenta maior correlação e precisão do que a feita com a vazão líquida. Entretanto, observa-se que essa análise com a turbidez tem maior precisão quando os sedimentos são de granulometria pequena, como argila e silte, gerando mais incertezas quando os sedimentos são de areia (SARI *et al.*, 2017).

3.5.2.3 Carga do leito

Diferentemente dos sedimentos suspensos, os sedimentos do leito (também chamados de sedimentos de fundo) são transportados no fundo do canal e são mais pesados. A sua amostragem é mais complicada e com baixa precisão. Geralmente, utilizam-se fórmulas para inferir indiretamente a carga de sedimentos através de parâmetros hidráulicos. Os métodos de amostragem direta utilizam armadilhas como poços ou fendas no leito, onde os sedimentos ficam retidos. Posteriormente esses sedimentos são retirados e pesados (SANTOS *et al.*, 2001). Exemplos de

amostradores em forma de armadilhas com sacas são o *Arnhem* ou holandês e o *Helley-Smith*, apresentados na Figura 11. Essa amostragem é trabalhosa e determina o volume e o peso dos sedimento transportados pelo leito momento da medição.

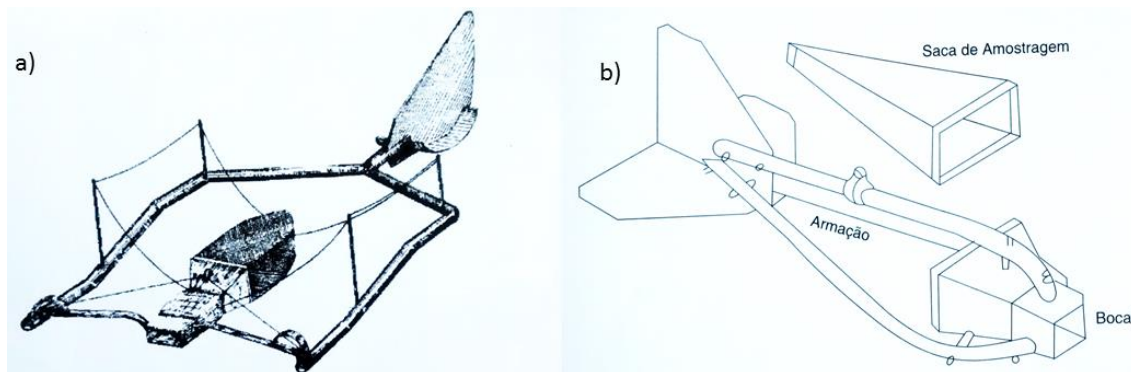


Figura 11 – Amostradores de sedimentos do leito: a) *Arnhem*; b) *Helley-Smith* (CARVALHO, 2008)

O monitoramento constante da carga do leito é ainda mais complicado que o da carga em suspensão. Um exemplo de dispositivo que monitora a carga do leito constantemente é o *Hydrophone*, bastante utilizado no Japão. Sendo um método de medição acústica, ele consiste em um tubo de aço com microfone no fundo do rio perpendicular ao escoamento da água (Figura 12). Conforme os sedimentos vão batendo no tubo, o microfone capta a frequência do som gerado, convertendo o som em vazão de sedimentos de fundo. A calibração desse dispositivo é essencial para o seu funcionamento adequado (UCHIDA *et al.*, 2013)

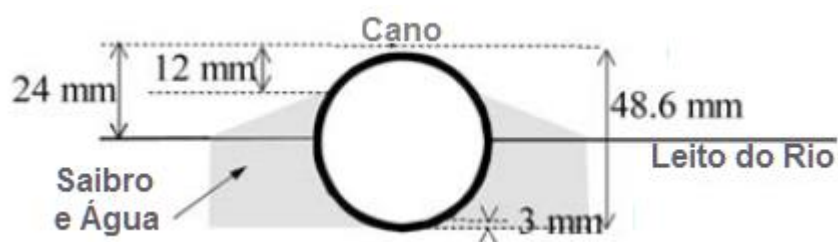


Figura 12 – Corte transversal esquemático da medição feita pelo *Hydrophone* (Adaptado de: UCHIDA *et al.*, 2013)

3.6 MODELAGEM

A quantificação dos processos hidrossedimentológicos na bacia também pode ser realizada com o uso de modelagem. Quando a aplicação dos métodos de amostragem e monitoramento da erosão descritos anteriormente são realizados com frequência, muitos dados são coletados e, assim, é possível criar modelos de perda de solo da área estudada. Tucci (2005) definiu um modelo como uma representação simplificada de um sistema que gera uma resposta para diferentes entradas.

No caso de um modelo para determinar a erosão e transporte de sedimentos devido ao escoamento da água, o sistema de estudo pode ser a bacia hidrográfica. Ainda há uma dificuldade em entender e prever essa dinâmica (BURTON & BATHURST, 1998). A modelagem consiste em introduzir dados de entrada no sistema, como a precipitação, e, a partir da interação dos dados de entrada com o sistema, são gerados dados de saída, como a produção de sedimentos.

O uso de modelos resulta numa análise mais complexa do que somente o monitoramento da perda de solo em um local. Entretanto, em geral, os modelos não conseguem fornecer uma análise ampla de todas as fases do ciclo hidrossedimentológico, contemplando todos os processos envolvidos. Geralmente, somente a erosão é avaliada na análise da produção de sedimentos, não sendo contabilizados os movimentos de massa (BLASCHKE *et al.*, 2000).

Tucci (2005) classificou os modelos hidrológicos, comumente utilizados na modelagem hidrológica, conforme vários parâmetros, que estão descritos a seguir.

a) Quanto ao tipo do modelo:

Os modelos podem ser divididos entre físicos, analógicos e matemáticos. O modelo físico representa o sistema em escala menor. O modelo analógico utiliza uma analogia de processos que ocorrem em diferentes fenômenos. Por fim, o modelo matemático representa o fenômeno com uso de equações matemáticas.

b) Quanto ao tempo:

Outra forma de classificar os modelos é devido ao tempo. Os modelos contínuos representam fenômenos contínuos no tempo. Diferentemente, os modelos discretos analisam o sistema em um intervalo de tempo determinado.

c) Quanto à distribuição espacial:

Os modelos também podem ser classificados conforme o seu uso espacial. Um modelo concentrado não considera a variabilidade dos parâmetros no espaço. Já um modelo distribuído tem os parâmetros dependentes do espaço. Assim, um modelo distribuído consegue descrever de maneira mais adequada a realidade do local.

d) Quanto à probabilidade:

A consideração da probabilidade da ocorrência de um parâmetro é outra forma de dividir os modelos. Um modelo estocástico analisa a chance de ocorrência de variáveis, enquanto que um modelo determinístico segue uma lei definida, não considerando a probabilidade.

e) Quanto ao empirismo:

Por fim, outra forma de classificar os modelos é entre ser conceitual ou empírico. Um modelo conceitual utiliza funções que descrevem processos físicos, enquanto que um modelo empírico utiliza equações estabelecidas com dados observados. Ressalta-se que um modelo empírico pode ser conceitual – um não exclui a possibilidade de ser o outro. Muitas vezes, um modelo utiliza a tendência dos dados observados para determinar a descrição do processo físico. Sendo assim, um modelo pode ser empírico e conceitual ao mesmo tempo.

Diversos autores enfatizaram a importância do embasamento físico do modelo a ser aplicado para estimar os fenômenos de forma mais precisa e realista, assim como o modelo ser espacialmente distribuído (FUJITA *et al.*, 2015; BATHURST *et al.*, 2005). Em geral, as limitações dos modelos são parecidas, como a qualidade e quantidade dos dados hidrológicos de entrada, a dificuldade da representação matemática de processos naturais e a simplificação do comportamento espacial de variáveis e fenômenos.

A aplicação de um modelo envolve a escolha deste, a seleção e análise dos dados necessários, ajuste e verificação dos parâmetros, definição de cenários de aplicação, prognóstico e a estimativa das incertezas dos resultados (TUCCI, 2005).

Existem diversos tipos de modelos usados em estudos de perda de solo no Brasil. Barreto *et al.* (2008) realizaram um levantamento bibliográfico de pesquisas nesse tema. Descobriu-se que houve uma concentração de estudos nas regiões Sul e Sudeste do Brasil. Além disso, grande parte dos estudos utilizaram o modelo USLE em contexto agrícola.

A seguir, são apresentados os modelos mais frequentemente usados em trabalhos no Brasil: USLE, RUSLE, MUSLE, SWAT, LISEM E WEPP. O estudo destes modelos auxilia na escolha do modelo a ser usado.

3.6.1 Modelo USLE - *Universal Soil Loss Equation*

O modelo matemático mais consolidado é a Equação Universal da Perda de solo (USLE - *Universal Soil Loss Equation*) que foi desenvolvida originalmente por Wischmeier & Smith (1978) a partir de muitos dados de campo em experimentos de erosão laminar e em sulcos nos Estados Unidos. Sendo assim, o modelo é empírico. A aplicação desse modelo é indicada para encostas com cultivo agrícola e curtas, mas frequentemente é empregada para bacias hidrográficas inteiras. A equação USLE (Equação 4) considera quatro fatores que influenciam na perda de solo: clima, solo, topografia e uso e manejo do solo.

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad (4)$$

onde A é a perda de solo (t/ha/ano); R é o fator de erosividade da chuva (t m/ha.mm/h); K é o fator de erodibilidade do solo (t/ha / (tm/ha.mm/h)); L é o fator de comprimento do declive (m); S é o fator grau do declive; C é o fator de cultura, uso e manejo; e P é o fator de práticas conservacionistas.

O fator R de erosividade da chuva indica a eficácia da chuva em causar erosão. Ele é definido com base na energia cinética da chuva e sua intensidade máxima. Existem diversas equações na literatura para calcular o valor de R , inclusive formas

simplificadas com o valor da chuva média mensal e a chuva anual, como foi sugerida por Silva *et al.* (2007).

O fator K de erodibilidade do solo indica a facilidade do solo em sofrer erosão por uma chuva determinada. A determinação deste fator é complexa, sendo necessário executar trabalhos de campo mantendo as demais variáveis fixas e conhecidas. O fator K depende das propriedades químicas e físicas do solo. Diversos autores pesquisaram sobre esse índice para diferentes solos e localidade, como Silva *et al.* (2007). O nomógrafo de Wischmeier é um modelo criado para facilitar a obtenção desse índice (WISCHMEIER & SMITH, 1978).

O índice L de comprimento do declive se relaciona com o índice S de fator do grau de declive. Estes índices são conhecidos como fator topográfico. Para a sua obtenção, compara-se o terreno da área analisada com um terreno de condição padrão, com comprimento de 25 metros e declividade de 9%. Atualmente diversas equações têm sido desenvolvidas para obtenção do parâmetro conjunto LS através de técnicas de geoprocessamento (MOORE & BURCH, 1986).

Por fim, o índice C de cultivo, uso e manejo e o índice P de práticas conservacionistas indicam influência antrópica sob o manejo do solo. A obtenção desses fatores também é devido a trabalhos de campo. Muitos autores apresentaram tabelas com valores destes fatores, como Silva *et al.* (2007).

USLE foi o primeiro modelo bem consolidado e difundido no mundo e no Brasil, é uma equação de simples compreensão e utilização, apresentando precisão razoável quando aplicada para bacias pequenas. Entretanto, por ser uma equação empírica, é necessário fazer experimentos para determinar as variáveis, havendo poucos dados disponíveis. Outras desvantagens são que não analisa a deposição e transporte de sedimentos, assim como não analisa a distribuição temporal e espacial da erosão.

3.6.2 Modelo RUSLE - *Revised Universal Soil Loss Equation*

Renard *et al.* (1991) revisaram a USLE, formando a RUSLE (Equação Universal de Perda de Solo Revisada), a partir de mais dados obtidos em trabalho de campo entre os anos de 1980 e 1990, com novas formas de determinar os fatores, podendo estes serem mensais em vez de anuais.

A RUSLE utiliza os mesmos princípios empíricos da USLE, porém diminui suas limitações. Um exemplo é que a RUSLE modificou a forma de calcular o fator topográfico LS, considerando a influência da encosta ser convexa ou côncava (MITASOVA & MITAS, 1999).

3.6.3 Modelo MUSLE – *Modified Universal Soil Loss Equation*

Em outra versão, Williams (1975) modificou a USLE, criando o modelo MUSLE (Equação Universal de Perda de Solo Modificada). A principal diferença é que a MUSLE considera diretamente o escoamento sobre o solo causando erosão, diferentemente da USLE. A MUSLE substituiu o fator de erosividade da chuva por informações do hidrograma gerado por um evento de chuva. Assim, a MUSLE gera como resultado o aporte de sedimentos no exutório da bacia para cada evento de chuva (SANTOS *et al.*, 2001).

A equação da MUSLE é definida pela Equação 5.

$$Y = 89,6 \cdot (V_{esc} \cdot q_p)^{0,56} \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad (5)$$

onde Y é o aporte de sedimentos no exutório da bacia após um evento chuvoso (t); V_{esc} é o volume de escoamento superficial (m^3); q_p é a vazão de pico (m^3/s); K , LS , C e P são os fatores da USLE. Esta equação também é empírica e exige uma estimativa adequada de suas variáveis.

3.6.4 Modelo SWAT – *Soil and Water Assessment Tool*

Existem diversos outros modelos hidrossedimentológicos mais complexos disponíveis. O modelo SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) foi desenvolvido pelo USDA (Departamento de Agricultura dos Estados Unidos), sendo um modelo físico, distribuído e conceitual. Este modelo permite a separação de uma bacia hidrográfica em pequenas sub-bacias, que são analisadas separadamente com diferentes dados de entrada. É possível integrar o modelo com um Sistema de Informações Geográficas (SIG). O modelo analisa seis componentes: clima; ciclo hidrológico; produção de sedimento; cobertura do solo e crescimento das plantas; uso de nutrientes e pesticidas; e práticas de manejo. No ciclo hidrológico, são analisados o escoamento

superficial e subterrâneo, a infiltração a evapotranspiração, percolação, escoamento lateral, entre outros processos. O SWAT utiliza a MUSLE para calcular a produção de sedimentos. É difícil ter todos os dados de entrada disponíveis, sendo necessário fazer a calibração e validação do modelo. Um exemplo de fluxograma da preparação e do processamento dos dados no uso do SWAT encontra-se exposto na Figura 13.



Figura 13 – Fluxograma de preparação e de processamento dos dados no modelo SWAT (Fonte: GALHARTE *et al.*, 2014)

Exemplos de uso do modelo SWAT no Brasil foram feitos por Lelis (2011), Pinto (2011), Aragão *et al.* (2013), Rodrigues *et al.* (2015). Destaca-se o trabalho de Bortolotto (2011), que utilizou o modelo SWAT na área de estudo do presente trabalho. Em geral, os autores ressaltaram a importância de fazer a calibração e validação do modelo antes do uso. Os resultados obtidos pelo emprego do modelo foram considerados satisfatórios.

3.6.5 Modelo LISEM – *Limburg Soil Erosion Model*

Outro modelo hidrossedimentológico é o LISEM (*Limburg Soil Erosion Model*), criado em Limburg (Holanda). Também é um modelo físico e distribuído, porém é direcionado para bacias pequenas. Pode ser usado em diferentes escalas, como encostas, sub-bacias e uma bacia hidrográfica inteira, desde que seja pequena (10 a 300 hectares). O uso também é associado a um SIG, então os dados de entrada e saída são em formato *raster*. A simulação é feita para cada evento de chuva, após feita a calibração e a validação. Uma vantagem desse modelo é a geração de mapa de deposição de sedimentos distribuída no espaço. O LISEM tem alta sensibilidade a

O modelo fornece a estimativa do transporte de sedimentos em uma encosta, em uma área qualquer escolhida ou em uma bacia hidrográfica. A versão encosta (“*hillslope*”) estima a perda e a deposição de solo em sulcos e entressulcos com uma distribuição espacial e temporal na encosta. A versão de uma área (“*grid*”) permite analisar a transporte de sedimentos em uma área qualquer com supostos canais. A versão da bacia hidrográfica (“*watershed*”) permite estimar a transferência de sedimentos em canais, separando a bacia em diversas encostas diferentes, e indica os sedimentos que passam por um exutório (OLIVEIRA, 2010). Esta versão de bacia hidrográfica é a mais complexa e um esquema de seu funcionamento está demonstrado na Figura 15.

Bacia Hidrográfica

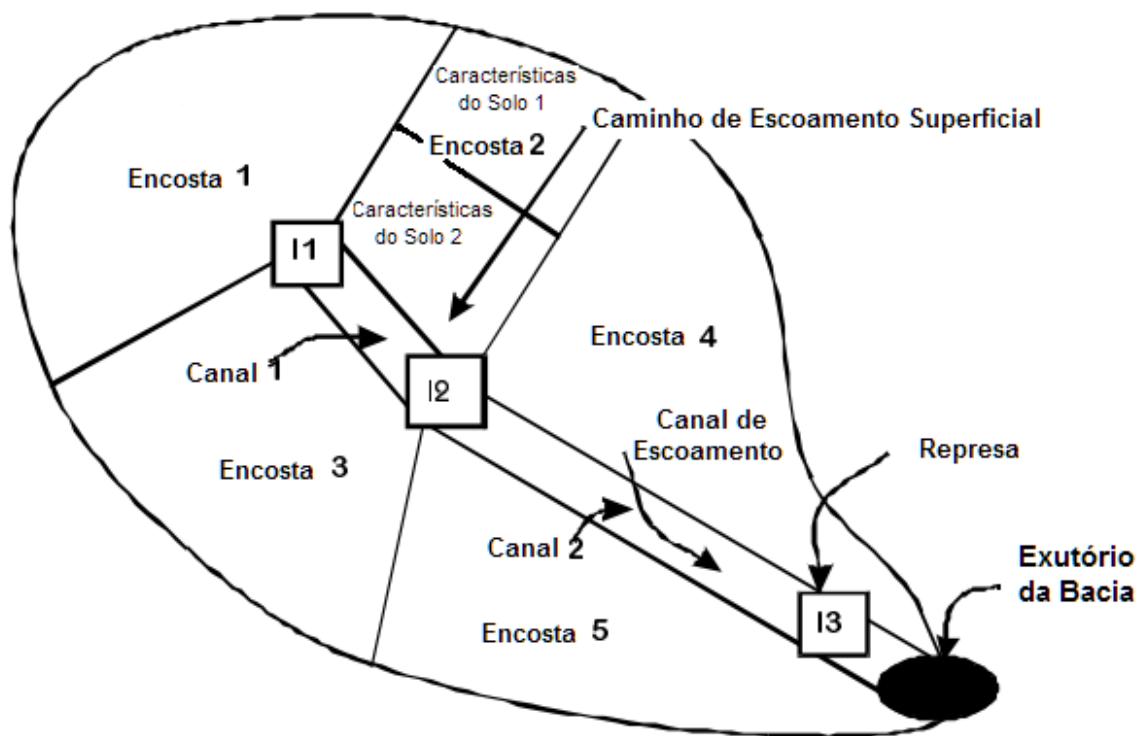


Figura 15 – Esquema do funcionamento do WEPP na versão bacia hidrográfica (Adaptado de: FLANAGAN & LIVINGSTON, 1995)

Diferentemente das equações de USLE, RUSLE ou MUSLE, o WEPP estima a distribuição espacial e temporal da perda de solo e da deposição de sedimentos. Assim, práticas de proteção ao solo podem ser definidas com mais efetividade (FLANAGAN *et al.*, 2007).

Um esquema do processo de utilização do WEPP é mostrado na Figura 16. Para definir a erosão, são avaliadas as características do clima, do solo e a gestão humana do solo, que modificam os processos hidrológicos e erosivos. O programa analisa a distribuição espacial e temporal da erosão.

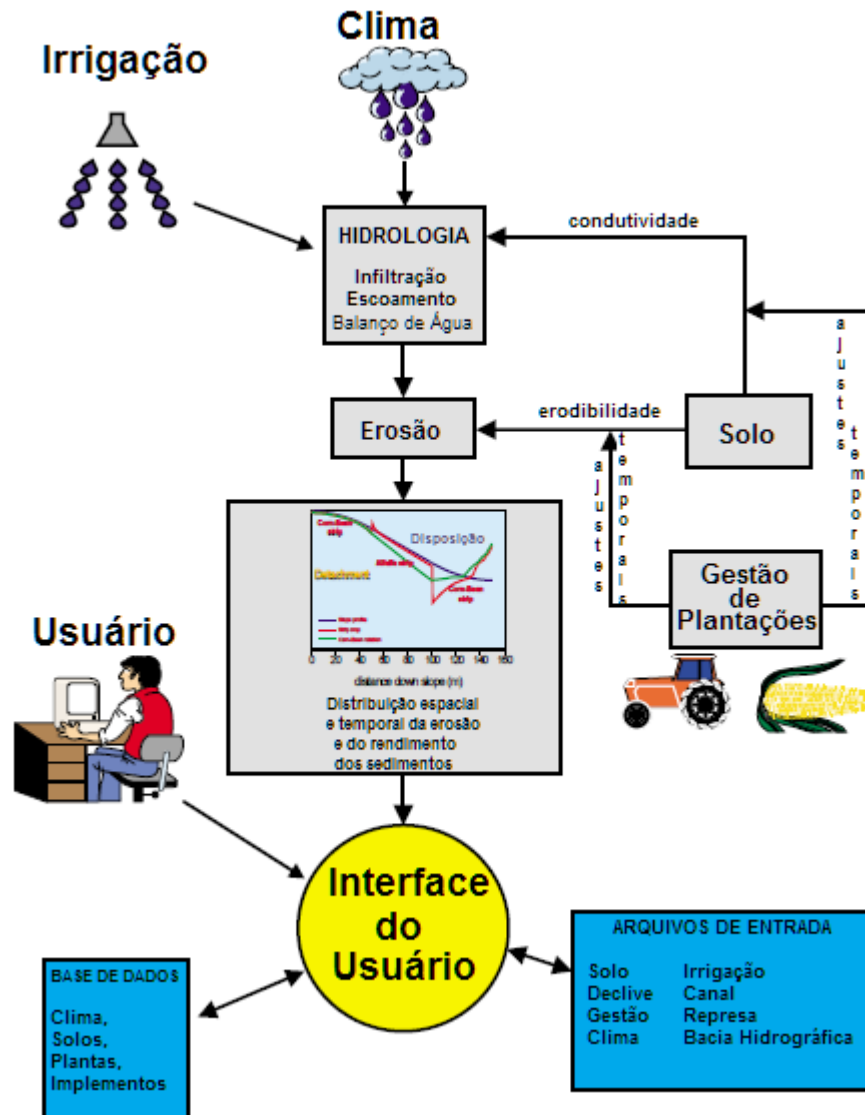


Figura 16 – Esquema do funcionamento do WEPP (Adaptado de: FLANAGAN *et al.*, 1995)

O WEPP pode ser separado em componentes como clima, água, crescimento de plantas, erosão do solo e deposição de sedimentos. Cada componente é discutido a seguir.

a) Componente Climático

O componente climático é constituído por um simulador estocástico chamado CLIGEN que gera valores de precipitação diária, temperaturas máximas e mínimas, radiação solar diária média e direção e velocidade diária média do vento (NICKS *et al.*, 1995). Para isso, são utilizados dados históricos da localidade, de preferência uma série histórica com no mínimo 30 anos. Assim, esse componente gera uma série de dados que caracterizam o clima de quantos anos forem requeridos para a sua área, podendo ser uma série longa como 100 anos.

b) Componente Hidrológico

O componente hidrológico pode ser dividido pela infiltração, pelo escoamento superficial e pelo balanço da água. A infiltração baseia-se na equação de Green-Ampt, modificada por Mein & Larson (1973), em que há diferença do cálculo da infiltração quando há empoçamento (saturação do solo) e quando não há. Assim, primeiro é calculado um fator indicativo de acúmulo de água no solo ou não. Quando há saturação do solo, a taxa de infiltração é proporcional à intensidade da chuva. Quanto maior a infiltração da água no solo, menor o escoamento e, portanto, menor o processo erosivo. Se há o empoçamento, a profundidade acumulada de infiltração F é dada pela Equação 6 (STONE *et al.*, 1995). A Equação é resolvida com o método de iteração Newton-Raphson.

$$K_e \cdot t_c = F_i - \varphi \cdot \theta_d \cdot \ln \left(1 + \frac{F_i}{\varphi_m \cdot \theta_d} \right) \quad (6)$$

onde K_e é a condutividade hidráulica saturada efetiva ($m \cdot s^{-1}$); t_c é a diferença tempo entre o tempo instantâneo para o empoçamento e o tempo de empoçamento real (s); F_i é a lâmina de infiltração acumulada (m); φ_m é a capilaridade média potencial (m); e θ_d é o déficit da umidade do solo ($m \cdot m^{-1}$), sendo a diferença da porosidade efetiva pela conteúdo volumétrico de água inicial.

Quando não há empoçamento, a infiltração acumulada F , em metros, é dada pela Equação 7 (STONE *et al.*, 1995).

$$F_i = Lac_i - Lexc_{i=1} \quad (7)$$

onde Lac é a lâmina de chuva acumulada(m); e $Lexc$ é a lâmina de chuva acumulada em excesso (m).

Mesmo com essa modificação do modelo Green-Ampt feita por Mein & Larson, Almedeij & Esen (2013) demonstraram que esse modelo de infiltração ainda subestima o processo de infiltração.

O escoamento superficial é estimado a partir da equação da onda cinemática (STONE *et al.*, 1995), conforme a Equação 8.

$$\frac{\delta h_{esc}}{\delta t} + \frac{\delta q_L}{\delta x} = v \quad (8)$$

onde h_{esc} é a lâmina de escoamento (m); t é o tempo (s); q_L é a descarga por largura de superfície ($m^3.m^{-1}.s^{-1}$); x é a distância em nível plano (m); e v é a velocidade do escoamento ($m.s^{-1}$). O escoamento também pode ser determinado pela diferença da precipitação pela infiltração da água no solo.

Após a estimativa da taxa de pico de escoamento e da duração do escoamento, é assumido um estado estacionário para calcular a erosão de sulco e seu transporte. O sulco é estimado como um canal retangular (FLANAGAN *et al.*, 1995).

A última parte do componente hidrológico, o balanço da água, é feito a partir dos dados gerados pelos componentes do clima, de infiltração e de crescimento da planta, estimando a evapotranspiração e a percolação. O modelo determina o balanço de água diário de acordo com a Equação 9.

$$\theta = \theta_{in} + (P_{ac} - P_{int}) \pm \theta_n - Q_{ac} - ET - D - Q_d \quad (9)$$

onde θ é a umidade volumétrica do solo na zona de raízes de um dia (m); θ_{in} é a umidade inicial do solo na zona de raízes (m); P_{ac} é a precipitação acumulada (m); P_{int} é a precipitação interceptada pela vegetação (m); θ_n é a umidade volumétrica da neve

(m); Q_{ac} é o escoamento superficial acumulado (m); ET é a evapotranspiração acumulada (m); D é a perda acumulada pela percolação abaixo da zona de raízes (m); e Q_d é o fluxo lateral da subsuperfície (m). O parâmetro θ_n da neve pode ser desconsiderado para zonas tropicais.

c) Componente de Crescimento das Plantas

O componente de crescimento de plantas oferecido pelo WEPP simula mudanças em cultivos de lavouras e de pasto. O objetivo é avaliar como o crescimento da vegetação modifica o escoamento superficial e, portanto, a erosão. Os dados de entrada são os dias de crescimento, massa da matéria seca, cobertura e altura da copa das árvores, crescimento da raiz, índice de área foliar, entre outros. O WEPP analisa também a decomposição das plantas, ou seja, a massa dos resíduos no solo (FLANAGAN *et al.*, 1995).

d) Componente de Erosão do Solo e Deposição de Sedimentos

O componente do solo avalia diversos parâmetros como a rugosidade, densidade aparente, condutividade hidráulica, erodibilidade entressulcos e em sulcos e tensão crítica de cisalhamento (FLANAGAN *et al.*, 1995). Esses parâmetros influenciam diretamente processos como infiltração e escoamento superficial.

O modelo WEPP utiliza a equação da continuidade no regime permanente para calcular o movimento de partículas em uma vertente, conforme a Equação 10 (FOSTER *et al.*, 1995).

$$\frac{dG}{dx_v} = D_f + D_i \quad (10)$$

onde G é a carga de sedimentos ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$); x_v representa o comprimento da vertente (m); D_i é o aporte de sedimento do entressulco para o sulco ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$); e D_f é a taxa de erosão do sulco ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$).

O WEPP estima dois tipos de erosão de solo: a erosão entressulcos e a erosão nos sulcos. A erosão entressulcos é estimada a partir da intensidade da precipitação e da taxa de escoamento entressulcos, sendo influenciada pela rugosidade do solo,

declividade e erodibilidade do solo. O modelo considera uma erosão entressulcos base que é modificada a partir de fatores como cobertura do solo e efeitos de raízes, presença de crosta, selamento, gelo e degelo. Para situações simples, onde não são considerados esses fatores, a taxa de desagregação entressulcos é definida pela Equação 11 (FOSTER *et al.*, 1995).

$$D_i = K_{iadj} \cdot I_e \cdot \sigma_{ir} \cdot SDR_{RR} \cdot F_{bocal} \cdot \left(\frac{R_s}{w} \right) \quad (11)$$

onde D_i é a taxa de aporte de sedimentos das áreas entressulcos para sulcos ($\text{kg.s}^{-1}.\text{m}^{-2}$); K_{iadj} é o fator ajustado de erodibilidade do solo entressulcos (kg.s.m^{-4}); I_e é a intensidade da chuva efetiva (m.s^{-1}); σ_{ir} é a taxa de escoamento entressulcos (m.s^{-1}); SDR_{RR} é a taxa de transferência de sedimento, F_{bocal} é um fator de ajuste ao impacto da variação de energia devido ao bocal do aspersor de irrigação; R_s é o espaçamento dos sulcos (m); e w é a largura dos sulcos (m).

Diferentemente, a erosão nos sulcos é função da capacidade do escoamento erodir o solo, a capacidade de transporte e a existência de sedimentos no fluxo. Ela ocorre quando a tensão de cisalhamento do escoamento sobre o solo é maior que tensão crítica de cisalhamento do solo. Assim, a taxa de desagregação em sulcos é definida com a Equação 12.

$$D_f = D_c \cdot \left(1 - \frac{G}{T_c} \right) \quad (12)$$

onde D_f é a taxa de desagregação do sulcos pelo escoamento superficial ($\text{kg.s}^{-1}.\text{m}^{-2}$); D_c é a capacidade de destacamento do fluxo nos sulcos ($\text{kg.s}^{-1}.\text{m}^{-2}$); G é a carga de sedimentos no escoamento ($\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$); e T_c é a capacidade de transporte do sedimento ($\text{kg.s}^{-1}.\text{m}^{-1}$).

Quando a tensão de cisalhamento hidráulica do fluxo no sulco é maior que a tensão de cisalhamento crítica do solo, a capacidade de destacamento (D_c) passa a ser definida pela Equação 13.

$$D_c = K_r \cdot (\tau_f - \tau_c) \quad (13)$$

onde K_r é o fator de erodibilidade do solo em sulcos (s.m^{-1}); τ_c é a tensão crítica de cisalhamento do solo (Pa); e τ_f é a tensão de cisalhamento do escoamento sobre o solo (Pa). A tensão de cisalhamento do escoamento depende da declividade do sulco.

Assim, a erosão ocorre quando a tensão de cisalhamento hidráulica é superior à tensão crítica de cisalhamento. De forma oposta, a deposição de sedimentos ocorre quando a carga de sedimento G é menor que a capacidade de transporte de sedimento T_c , no qual ambos são calculados conforme a largura do sulco. Assim, a deposição no sulco D_f , em $\text{kg.s}^{-1}.\text{m}^{-1}$, é definida como a Equação 14 (FOSTER *et al.*, 1995).

$$D_f = \frac{\beta \cdot V_f}{q_L} \cdot (T_c - G) \quad (14)$$

onde V_f é a velocidade de queda efetiva do sedimento (m.s^{-1}); q_L é a vazão de escoamento por unidade de largura do sulco ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$); e β é o coeficiente de turbulência induzida pela gota de chuva; T_c é a capacidade de transporte de sedimento ($\text{kg.s}^{-1}.\text{m}^{-1}$); e G é a carga de sedimento ($\text{kg.s}^{-1}.\text{m}^{-1}$).

A capacidade de transporte de sedimento T_c é função da tensão de cisalhamento e é calculada pela Equação 15.

$$T_c = k_t \cdot \tau_f^{3/2} \quad (15)$$

onde τ_f é a tensão de cisalhamento hidráulica agindo no solo (Pa); e k_t é o coeficiente de transporte ($\text{m}^{0,5}.\text{s}^2.\text{kg}^{-0,5}$).

3.6.6.1 Exemplos de utilização no Brasil

Diversos autores já utilizaram o modelo WEPP para estimar a perda de solo no Brasil. O primeiro trabalho feito por um brasileiro foi de Chaves e Nearing (1991), no

qual foi realizado uma análise de incertezas do WEPP. A análise indicou que a propagação de erros é significativa dependendo dos dados de entrada, principalmente para eventos de baixa intensidade. Além disso, a incerteza na produção de sedimentos está diretamente relacionada com a incerteza na taxa de escoamento no exutório. Isto se deve ao fato de que as incertezas intrínsecas dos parâmetros de entrada do modelo se propagarem devido à natureza booleana do funcionamento do WEPP.

Sparovek *et al.* (2000) e Bacchi *et al.* (2000) realizaram estudos comparando a perda de solo indicada pela análise dos métodos de ^{137}Cs , USLE e WEPP no Estado de São Paulo, em áreas de plantação de cana de açúcar. Nos dois estudos, o WEPP foi o que gerou resultados de menor perda de solo entre os três métodos comparados.

Silva *et al.* (2004) utilizaram o modelo WEPP em parcelas de solo em São Carlos (SP), em parceria com a EMBRAPA, e concluíram que a maior perda de solo ocorre em solo descoberto e na plantação de milho. Eles ressaltaram que faltaram dados de entrada para poder calibrar o modelo.

Amorim *et al.* (2010) estimaram a perda de solo de parcelas de solo em nove localidades do Brasil, comparando os resultados dos modelos USLE, RUSLE e WEPP. Concluíram que o modelo WEPP apresenta o melhor desempenho entre os modelos.

Oliveira (2010) utilizou o modelo WEPP em duas vertentes de uma bacia rural na região de Arvorezinha (RS) para estimar a erosão hídrica. Os dados de entrada foram obtidos experimentalmente e não houve calibração do modelo. Comparou-se os dados gerados pelo modelo com os dados medidos em campo e concluiu-se que os dados medidos em campo eram mais precisos.

Cecílio *et al.* (2009) compararam a perda de solo estimada por RUSLE e WEPP em uma pequena bacia na região de Viçosa (MG). Concluíram que a RUSLE apresenta melhor estimativa, sendo necessário cuidado para aplicar o WEPP em condições tropicais, como as brasileiras. Isto ocorre, pois, os procedimentos internos do WEPP para determinação de parâmetros, como a condutividade hidráulica, foram definidos com as características dos Estados Unidos.

Kinnell (2017) comparou o modelo WEPP com USLE-M e RUSLE-M. O WEPP demonstrou os piores resultados de calibração, subestimando eventos de alta intensidade e sobrestimando eventos de baixa intensidade para uma mesma área. Discute-se que o WEPP tem um nível de incertezas alto devido a sua alta complexidade na avaliação de fenômenos.

De Maria *et al.* (2001) utilizaram o modelo WEPP para determinar a perda de solo em parcelas experimentais na região de Campinas (SP). Ao comparar os valores de perda de solo medidos em campo, concluíram que as estimativas do WEPP estavam adequadas.

Gonçalves (2007) verificou a validação em parcelas experimentais do WEPP na região de Viçosa (MG). A partir de análises de sensibilidade, constatou-se que os parâmetros mais sensíveis são a erodibilidade entressulcos, a erodibilidade no sulco, a tensão cisalhante crítica e a condutividade hidráulica efetiva. Concluiu-se que os dados de entrada gerados pelo WEPP apresentam erros maiores daqueles que foram medidos em campo. O WEPP superestimou o valor de erodibilidade entressulcos e subestimou o valor de condutividade hidráulica efetiva.

Moraes (2016) comparou os modelos MUSLE e WEPP em duas bacias hidrográficas no Estado de São Paulo. O modelo WEPP superestimou os valores de perda de solo, tendo o modelo MUSLE obtido valores mais adequados. As melhores estimativas ocorreram quando a precipitação foi de baixa intensidade. O autor concluiu que os modelos não são adequados a eventos extremos comuns em zonas tropicais.

Observa-se que o modelo WEPP, assim como outros modelos de estimativa de perda de solo, tem diversas incertezas. Como os processos hidrossedimentológicos têm grande complexidade, os modelos não são capazes de avaliar corretamente todos os fenômenos envolvidos, gerando incertezas. Uma grande limitação que os pesquisadores que utilizam o WEPP ressaltam é que os dados obtidos experimentalmente nos Estados Unidos costumam ser diferentes do cenário que ocorre no Brasil. Assim, fica evidente a importância de coletar mais dados em casos do Brasil a fim de fazer a calibração e validação do modelo.

3.6.7 Comparação entre modelos

Na Tabela 1 encontra-se exposta a classificação e a comparação entre os modelos descritos.

Tabela 1 – Classificação dos modelos matemáticos USLE, RUSLE, MUSLE, SWAT, LISEM e WEPP

		Modelo					
		USLE	RUSLE	MUSLE	SWAT	LISEM	WEPP
Tempo	Contínuo				X	X	X
	Discreto	X	X	X			X
Espaço	Concentrado	X	X	X	X		
	Distribuído	X	X			X	X
Probabilidade	Estocástico				X	X	X
	Determinístico	X	X	X	X	X	X
Empirismo	Conceitual				X	X	X
	Empírico	X	X	X	X	X	X

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo consiste na bacia hidrográfica do rio Cunha, localizada no município Rio dos Cedros, Santa Catarina. A bacia hidrográfica tem uma área de aproximadamente 17 km², sendo que a drenagem principal, rio Cunha, tem aproximadamente 4 km de extensão. Na Figura 17 é mostrada a localização da área de estudo. O rio Cunha situa-se a aproximadamente 3,5 km da zona urbana de Rio dos Cedros, sendo um afluente do Rio dos Cedros, que é um afluente do Rio Itajaí-Açu.

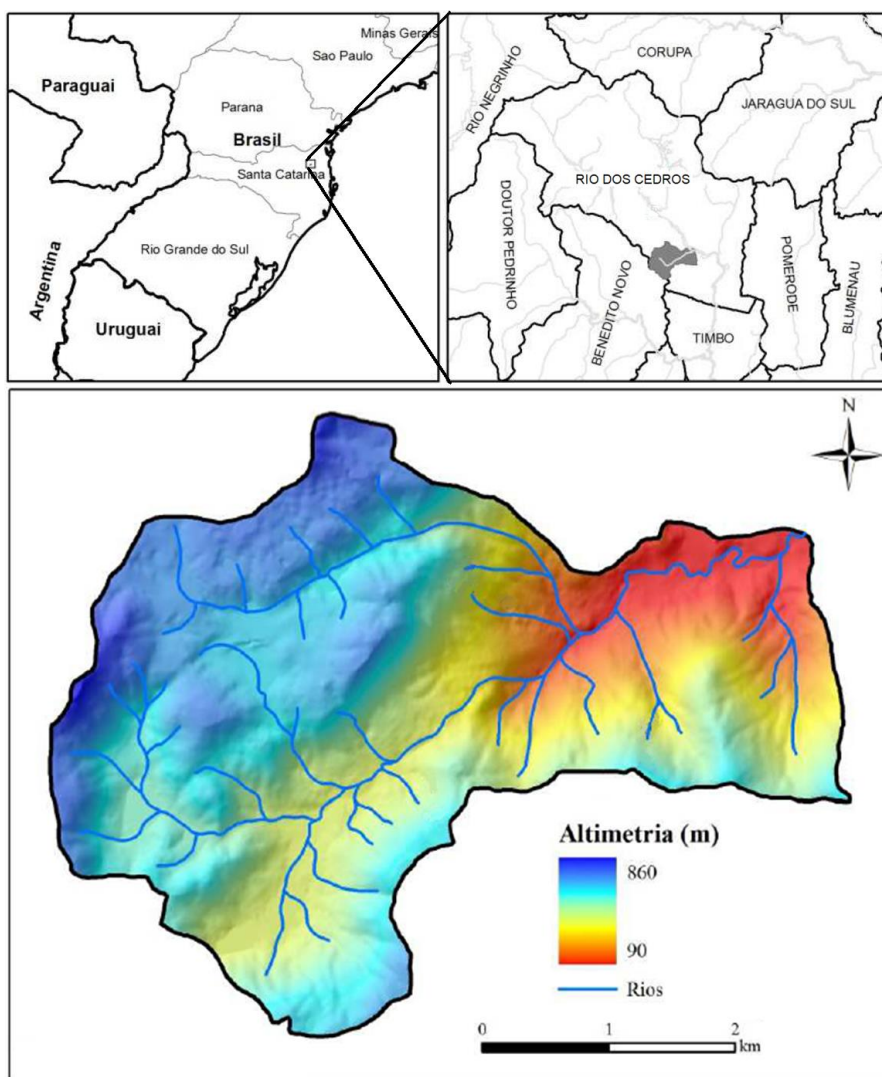


Figura 17 – Mapa de localização da bacia do rio Cunha, no município Rio dos Cedros (SC) (Adaptado de: Michel, 2013)

O município Rio dos Cedros tem área de 554 km² e população estimada em 2017 de 11,4 mil habitantes (IBGE, 2017). Agropecuária é uma das principais atividades econômicas do município. As principais lavouras temporárias são de arroz, mandioca, milho e cana-de-açúcar e a principal lavoura permanente é de banana. Quanto à pecuária, há principalmente criação de gado e aves (SEBRAE, 2013). Além disso, há duas usinas hidrelétricas no município. Por ter uma área montanhosa a montante e uma planície de inundação a jusante, o município Rio dos Cedros sofre com recorrentes inundações e escorregamentos (MICHEL, 2011; SILVA, 2013).

O rio Cunha é um afluente da margem direita do Rio dos Cedros e está em uma região elevada, sendo um rio encaixado em vale, desaguando perpendicularmente no Rio dos Cedros. As altitudes máxima e mínima da bacia hidrográfica do rio Cunha são de aproximadamente 860 e 90 metros, respectivamente. A parte mais alta da bacia tem declividade menor, aumentando no trecho médio e, na parte baixa, quando perto do exutório, a declividade é novamente menor.

O clima da região é caracterizado como Cfa segundo a classificação climática Köppen-Geiger. Isto é, clima temperado com chuvas distribuídas ao longo do ano. A precipitação média anual é de aproximadamente 1650 mm/ano (KOBAYAMA *et al.*, 2010).

O rio Cunha escoia sobre um terreno constituído por rochas metamórficas de grau elevado (gnaisse, granulito, quartzito, e formação ferrífera), que constitui o Cráton ou Terreno Luis Alves, um terreno muito antigo, formado entre o final do período geológico Arqueano e início do Proterozoico. Estas rochas foram datadas, revelando idades entre 2,7 a 2,2 bilhões de anos. (BIZZI *et al.*, 2003). Com exceção do quartzito, as demais rochas citadas tendem a formar solos argilosos por intemperismo, pois são ricas em feldspato, piroxênio e anfibólio que se alteram para argilominerais ao serem expostas na superfície.

O solo da bacia hidrográfica é principalmente do tipo cambissolo, ocorrendo sobre um relevo montanhoso. Nas regiões mais altas da bacia, onde o relevo é ondulado, ocorrem argissolo vermelho-amarelo (POTTER *et al.*, 2004). O bioma do local é classificado como Mata Atlântica. A vegetação principal é a Floresta Ombrófila Densa, também chamada de floresta tropical pluvial (IBGE, 2012).

4.2 FLUXOGRAMA

A Figura 18 expõe um fluxograma dos procedimentos executados no presente estudo. Cada etapa deste fluxograma é explicada em detalhes a seguir.

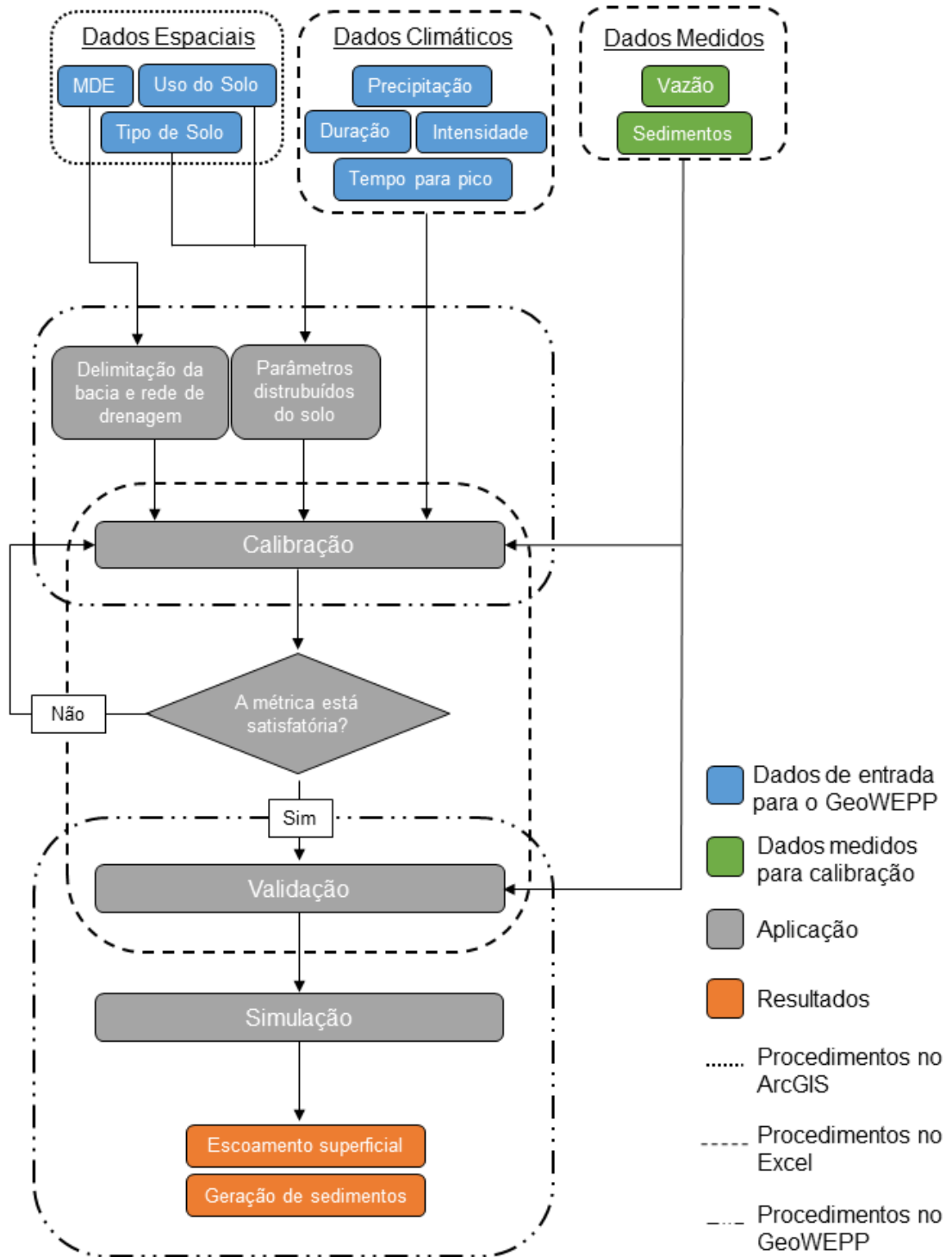


Figura 18 – Fluxograma do método de trabalho aplicado no presente estudo

Os dados de entrada do GeoWEPP e os dados medidos dos eventos escolhidos para a calibração foram utilizados para calibrar o modelo. Na etapa de calibração, executa-se o modelo diversas vezes para cada evento, a fim de alcançar os melhores valores para as métricas. Depois, na etapa de validação, a média dos parâmetros calibrados foi utilizada. Somente após as etapas de calibração e validação o modelo está pronto para ser utilizado para prognósticos e gerar resultados de avaliação da produção de sedimentos.

4.3 DADOS UTILIZADOS

4.3.1 Dados de entrada do modelo

4.3.1.1 Espaciais

Os dados espaciais em formato *raster* que serviram de entrada para o modelo foram o Modelo Digital de Terreno (MDT), mapa de solos e mapa de cobertura do solo. O MDT utilizado foi obtido a partir de cartas topográficas, código SG-22-Z-B-IV, com resolução de 1 metro, que foram retiradas da plataforma SIGSC, disponível em <http://sigsc.sds.sc.gov.br/>. Na Figura 19 está exposto o MDT utilizado como entrada para o GeoWEPP.

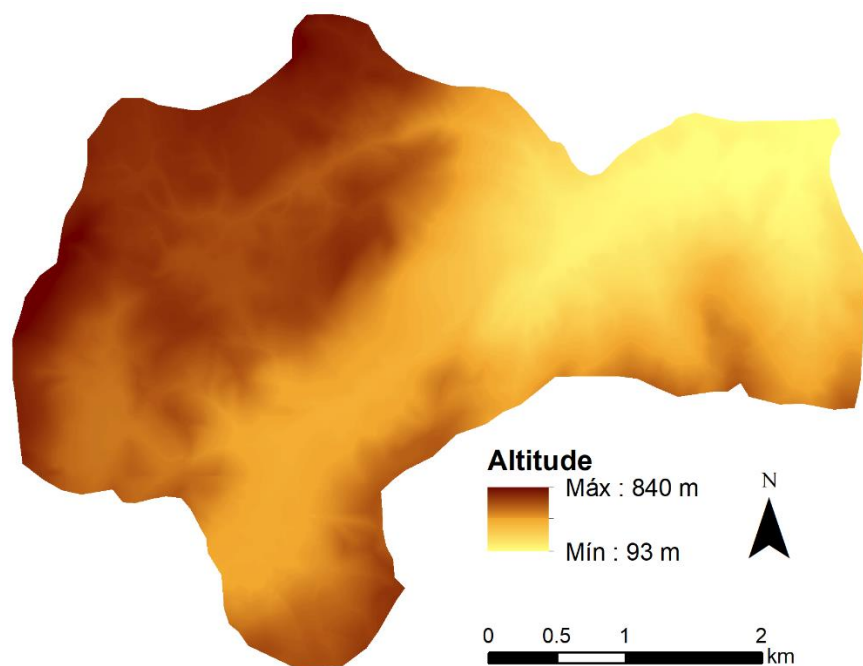


Figura 19 – Modelo Digital de Elevação da bacia do rio Cunha

Os dados de altimetria foram inseridos no GeoWEPP, que gera automaticamente as sub-bacias e os canais de drenagem. Para isso, deve-se determinar a área mínima capaz de gerar um canal (*Critical Source Area - CSA*), o comprimento mínimo de um canal de ordem um (*Minimum Source Channel Length – MSCL*) e definir a posição do exutório. Foram utilizados os valores padrão de 5 hectares para CSA e 100 metros para MSCL, por ser considerado que eles forneceram uma rede de drenagem adequada para a bacia. Ressalta-se que esta rede de drenagem por modificar consideravelmente os resultados.

O mapa de cobertura do solo foi publicado por Michel (2013) e tem resolução de 1 metro. A cobertura do solo foi classificada nas seguintes classes: mata nativa, reflorestamento, solo exposto, pastagem, água, cicatrizes de escorregamento, edificação e agricultura (Figura 20). Observa-se que a maior parte da bacia (72%) é cobertura de mata nativa.

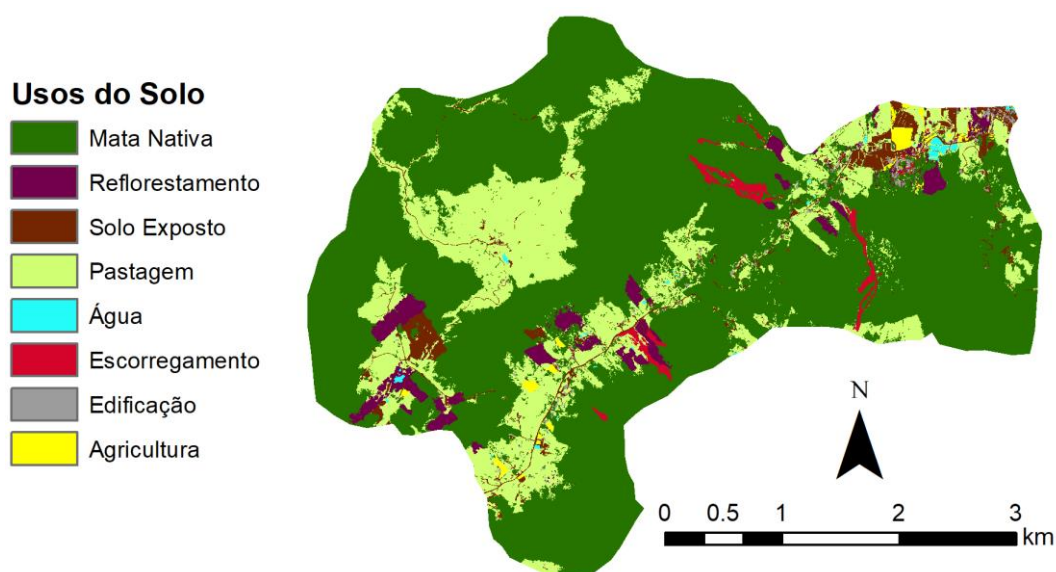


Figura 20 – Mapa de uso do solo na bacia do rio Cunha

Para o GeoWEPP computar os dados de uso do solo, foi necessário convertê-los em parâmetros disponíveis no programa. Na Tabela 2 encontra-se exposta a conversão utilizada para inserir a informação do uso do solo nas opções existentes no GeoWEPP. As características de cada tipo de manejo do solo podem ser modificadas posteriormente nas etapas de calibração do modelo.

Tabela 2 – Usos do solo da bacia do rio Cunha e seus respectivos tipos de manejo no GeoWEPP

Uso do Solo	Tipo de Manejo no GeoWEPP	Área (%)
Água	Pavimento	0,2
Agricultura	Cultura de milho/soja	0,5
Edificação	Pavimento	0,5
Escorregamento	Solo Exposto	1,1
Solo Exposto	Solo Exposto	2,7
Pastagem	Pastagem	20,1
Reflorestamento	Floresta Perene de 5 anos	3,1
Mata Nativa	Floresta Perene	71,7

O mapa de solos utilizado foi publicado por Potter *et al.* (2004) e tem escala de 1:250.000. Os solos da bacia hidrográfica foram classificados como cambissolo (Ca32) ou argissolo vermelho-amarelo (PVa13 e PVa14) (Figura 21).

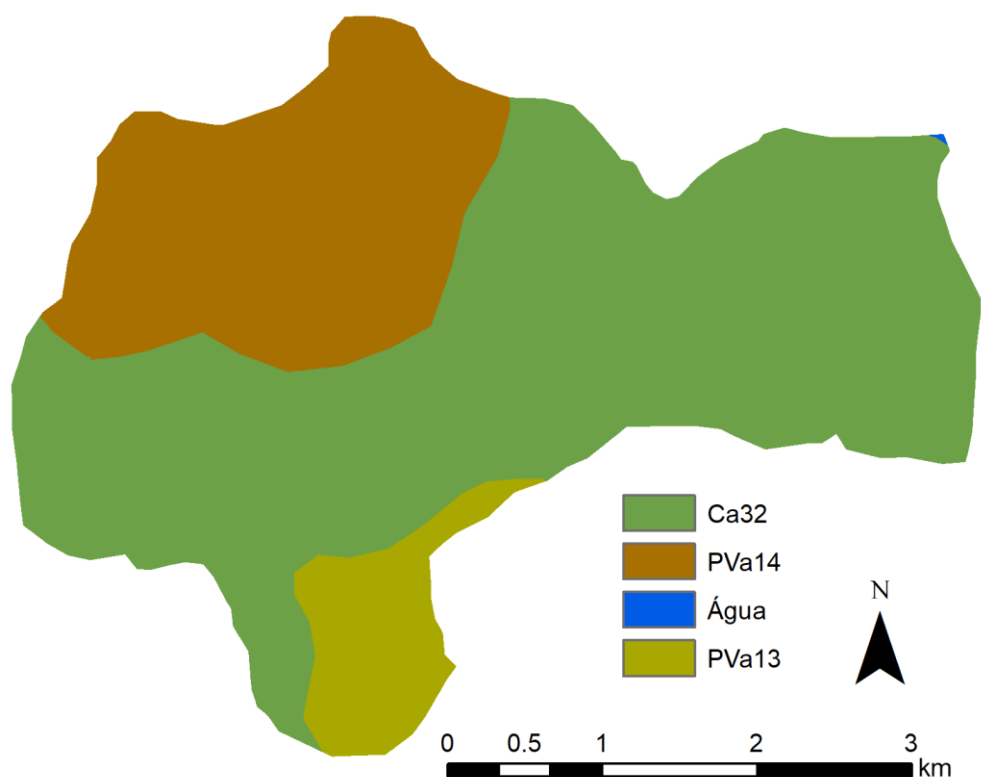


Figura 21 – Mapa de tipos de solo da bacia do rio Cunha

A informação sobre o tipo de solo também teve que ser convertida para poder ser inserida no GeoWEPP. Na Tabela 3 encontra-se exposta como foi estabelecida esta conversão. As características do solo podem ser alteradas posteriormente, durante a calibração do modelo. Portanto, o mapa de tipos de solo serve somente para uma aproximação inicial.

Tabela 3 – Tipos de solo da bacia do rio Cunha e seus respectivos solos no GeoWEPP

Tipo de Solo	Tipo de solo no GeoWEPP	Área (%)
Argissolo vermelho-amarelo 14	Floresta Franco Argilosa	27,5
Cambissolo 32	Floresta Franco Siltosa	65,4
Argissolo vermelho-amarelo 13	Floresta Franco Argilosa	7,1

Todos os mapas utilizados foram convertidos em formato ASCII com mesmo tamanho (mesmo número de linhas e colunas) e depois inseridos no GeoWEPP. Portanto, todos têm a mesma resolução espacial. O GeoWEPP tem baixo rendimento computacional ao processar mapas com mais de 200 mil células e, apesar de os dados de entrada terem resoluções melhores, foi definida uma resolução de 15 metros, com sistema de projeção UTM, fuso 22S, para obedecer o número máximo de células sugerido pelos autores do modelo.

4.3.1.2 Clima

O WEPP utiliza como entrada, no componente chamado de clima, os seguintes parâmetros diários: precipitação (mm), duração da chuva (h), intensidade máxima da precipitação (adimensional em relação a intensidade média de precipitação), tempo para atingir a intensidade máxima (adimensional em relação a duração da chuva), temperatura máxima (°C), temperatura mínima (°C), radiação (langley), velocidade do vento (m/s), direção do vento (°) e temperatura de ponto de orvalho (°C). A resolução temporal de todos estes parâmetros é diária.

Os dados de precipitação são provenientes de uma estação meteorológica automática modelo DAVIS Vantage Pro2 Plus, localizada no centro urbano do município Rio dos Cedros, a aproximadamente 5,4 km da bacia do rio Cunha. O registro de dados ocorreu a cada 10 minutos, com resolução de 0,2 mm e precisão de ±4% (GOERL, 2014).

Os demais dados de clima utilizados foram provenientes da estação meteorológica convencional 83872 – Indaial fornecida pelo Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP) do INMET disponível em www.inmet.gov.br. A estação 83872 – Indaial está a 86 metros de altitude e a aproximadamente 28 km do exutório da bacia do rio Cunha, sendo a estação meteorológica mais próxima disponível pelo INMET.

Os dados de precipitação, temperatura máxima e mínima, velocidade e direção do vento já estavam fornecidos adequadamente para serem inseridos no GeoWEPP. Os demais parâmetros tiveram que ser convertidos para o seu uso, conforme procedimento descrito a seguir.

A duração da chuva foi simplificada como a somatória do tempo que choveu no dia. O parâmetro de tempo para atingir a intensidade de pico (tp) foi determinado pela Equação 16.

$$tp = \frac{t_{máx}}{t_e} \quad (16)$$

onde t_e é o tempo de duração da chuva (h); e $t_{máx}$ é a tempo para a chuva alcançar o pico máximo (h). Sendo assim, tp é adimensional e tem valores entre 0 e 1, sendo 1 a chuva que teve seu pico máximo no final do seu período.

De forma parecida, a intensidade do pico da precipitação (ip) foi determinada conforme a Equação 17.

$$ip = \frac{I_{máxima}}{I_{média}} \quad (17)$$

onde $I_{média}$ é a intensidade média em mm/10min; e $I_{máxima}$ é intensidade máxima em mm/10min. Assim, ip também é adimensional, com valor igual ou superior a um, sendo que um representa a chuva que teve intensidade constante.

A estação convencional do INMET fornece as horas de insolação. Para convertê-la em radiação, foi utilizada a Equação 18, proposta por Angström (1924) e modificada por Prescott (1940).

$$Q_g = Q_0 \cdot \left(a + b \cdot \frac{n}{N} \right) \quad (18)$$

onde Q_g é a irradiância solar global diária (langley/dia); Q_0 é a irradiância solar no topo da atmosfera diária (langley/dia), n é a insolação ou número efetivo de horas de brilho solar (h/dia), N é o fotoperíodo (h/dia); e a e b são coeficientes que variam de acordo com a localidade e com a época do ano. A variável Q_0 foi determinada conforme a irradiação solar média de cada mês, extraída do programa SunData do CRESESB, disponível em <http://www.cresesb.cepel.br>. Glover & McCulloch (1958) propuseram as aproximações para os coeficientes “ a ” e “ b ” para onde eles não estão disponíveis empiricamente por experimentos (Equações 19 e 20).

$$a = 0,29 \cdot \cos \varphi \quad (19)$$

$$b = 0,52 \quad (20)$$

onde φ é a latitude em graus. A latitude da estação meteorológica convencional Indaial é -26.9° e, portanto, o coeficiente a é 0.26.

Quanto à determinação da temperatura de ponto de orvalho, foram utilizados os dados de umidade relativa e temperatura do ar (COLLISCHONN & DORNELLES, 2013). Primeiramente, determinou-se a pressão de saturação do vapor de água no ar pela Equação 21.

$$e_s = 0,6108 \cdot \exp\left(\frac{17,27 \cdot T}{237,3 + T}\right) \quad (21)$$

onde e_s é a pressão de saturação do vapor no ar (kPa); e T é a temperatura do ar ($^\circ\text{C}$).

Depois, determinou-se a pressão de saturação do vapor real para a determinada umidade do ar pela Equação 22.

$$e = \frac{UR \cdot e_s}{100} \quad (22)$$

onde e é a pressão de saturação real ou parcial no ar (kPa); e_s é a pressão de saturação (kPa); e UR é a umidade relativa (%).

Assim, usando a Equação 23, pôde-se determinar a temperatura de ponto de orvalho.

$$T_d = \frac{\ln(e) + 0,4926}{0,0708 - 0,00421 \cdot \ln(e)} \quad (23)$$

onde T_d é a temperatura do ponto de orvalho (°C); e e é a pressão de vapor real ou parcial (kPa).

Todas essas variáveis climáticas foram organizadas em uma planilha *Excel* conforme o formato de entrada no WEPP, com data em formato de calendário juliano (dias corridos), representando os anos de 2012 e 2013. O arquivo foi convertido em extensão **.cli* para ser lido pelo modelo GeoWEPP.

4.3.2 Dados para calibração

No exutório da bacia do rio Cunha, foi instalada uma estação fluviométrica e sedimentométrica com coleta automática de dados de nível e de turbidez a cada 10 minutos (GOERL, 2014). Há dados disponíveis de 18/01/2012 a 09/07/2013. Esta série de dados, em conjunto com os dados climáticos citados, foi utilizada para a calibração e validação do modelo. Não foram conduzidos procedimentos de consistência destes dados e, se porventura, houve falhas, preferiu-se mantê-las e não utilizar esse período para a calibração e validação.

A estação fluviométrica dispõe de um sensor de nível modelo GE – Druck PTX 1030 acoplado a um datalogger Waterlog modelo H500XL. Também foram utilizadas réguas linimétricas para regular os dados do sensor. Para construir a curva-chave de vazão da estação, mediu-se a velocidade da corrente utilizando o Flowtracker com fabricante SonTek, correspondendo a 8 níveis de água, variando de 0,2 a 0,45 metros. Depois, foi feito o levantamento topobatimétrico da seção transversal do exutório da bacia (GOERL, 2014). Na Figura 22 encontra-se a curva-chave construída por Goerl (2014).

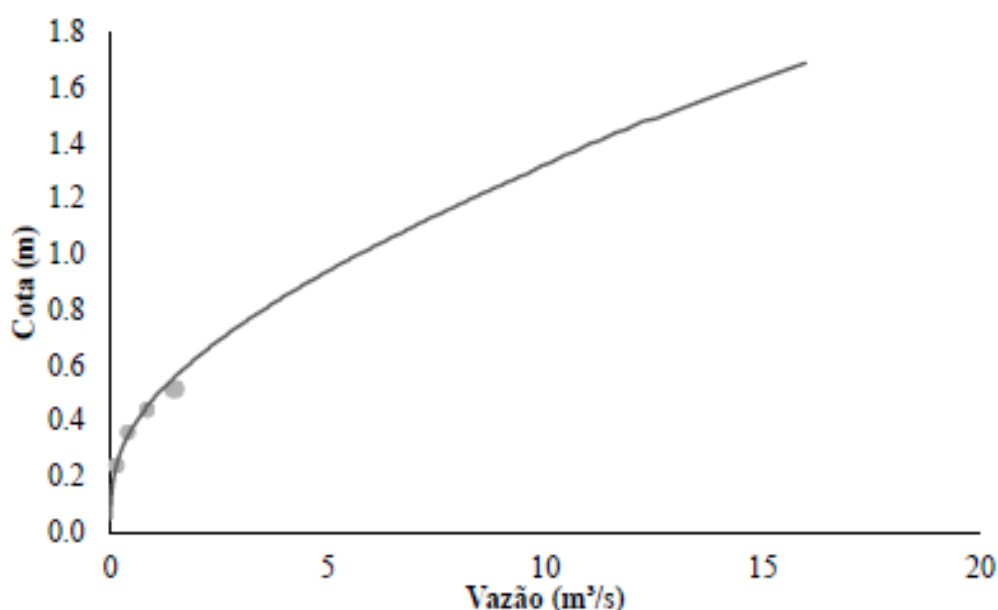


Figura 22 – Curva-chave no exutório da bacia do rio Cunha (Fonte: GOERL, 2014)

O valor máximo de vazão medido corresponde ao nível de 0,45 metros, sendo cerca de ¼ do maior nível registrado na série (GOERL, 2014). Assim, a curva teve que ser extrapolada, o que gerou incertezas em altas vazões. Na Tabela 4 encontram-se expostas as duas equações da curva-chave adotadas por Goerl (2014).

Tabela 4 – Equações da curva-chave adotadas para suas respectivas validades

Equação	Coefficientes	Validade (m)
$Q = k \cdot (h - h_0) \cdot b$	$h_0 = 0,00; k = 8,9420; b = 2,9391$	$\leq 0,44$
	$h_0 = 0,17; k = 7,7862; b = 1,7390$	$\geq 0,44$

O monitoramento sedimentométrico foi feito com um sensor de turbidez da marca FTS modelo DTS-12, que possui um limpador automático, evitando incrustações sobre o leitor ótico. O leitor executa 100 medições em um intervalo de 5 segundos, a cada 10 minutos. A relação entre turbidez (NTU) e sólidos suspensos (SS) foi construída a partir do amostrador de sedimentos DH-48 com método de amostragem por igual incremento de largura (IIL) e por integração na vertical (Figura 23). As amostras foram levadas ao laboratório e foram filtradas. Este monitoramento sedimentométrico e construção da Figura 23 foram feitos por Goerl (2014).

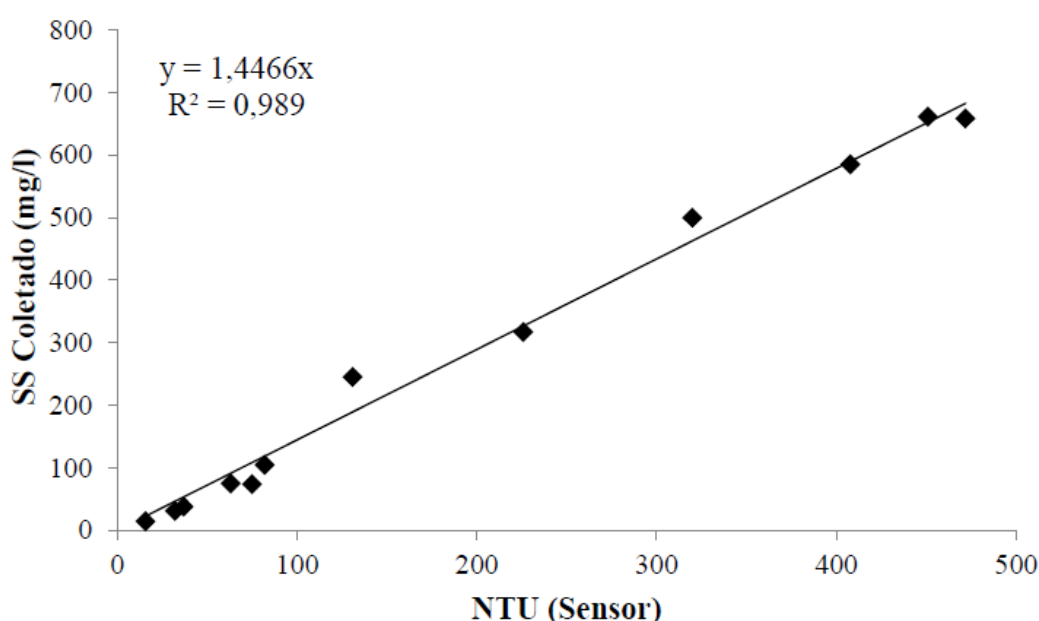


Figura 23 – Relação entre Turbidez (NTU) medida pelo sensor e os sólidos suspensos coletados (Fonte: GOERL, 2014)

Novamente, houve a necessidade de extrapolar a curva. A amostragem de valor máximo de NTU foi cerca de 500 NTU, enquanto que na série de dados houve o registro de 1600 NTU, ou seja, cerca de 3 vezes maior. Esta amostragem máxima de NTU registrou uma vazão de cerca de 2 m³/s, quase sete vezes menor que a vazão máxima registrada. Assim, há incerteza nos eventos de chuva que geram altos picos de vazão e sedimentos. Além disso, somente os sedimentos suspensos foram utilizados nesse trabalho, não sendo considerados os sedimentos de fundo.

Os dados de vazão e sólidos suspensos do exutório da bacia do rio Cunha tiveram que ser convertidos para serem comparados com os parâmetros de saída do

GeoWEPP, que são o volume líquido diário, em m³, e a massa de sedimento, em kg. Os dados de vazão e sólidos em suspensão foram convertidos com as Equações 24 e 25, respectivamente

$$V_{liq} = \sum_{i=1}^t (Q_i \cdot \Delta t) \quad (24)$$

$$m_{sed} = \sum_{i=1}^t (SS_i \cdot Q_i \cdot \Delta t) \quad (25)$$

onde V_{esc} é o volume de escoamento superficial que passa pelo exutório em um dia (m³); Q_i é a vazão no exutório no tempo i (m³/s); Δt é a resolução temporal dos dados (s); m_{sed} é a carga de sedimento que passa pelo exutório em um dia (kg); e SS é a concentração de sólidos suspensos (kg/m³).

4.3.2.1 Volume de escoamento de base

No GeoWEPP não é considerada o escoamento de base do rio, que é o escoamento produzido pelo fluxo d'água do aquífero livre. Sendo assim, em períodos longos de estiagem, o GeoWEPP tende a subvalorizar a vazão e, conseqüentemente, o transporte de sedimentos. Entretanto, durante uma estiagem, o rio é mantido pela água do aquífero.

Para uma correta calibração do modelo, foi necessário subtrair o escoamento de base dos dados de vazão observados no exutório da bacia do rio Cunha. A determinação do escoamento de base foi feita a partir da aplicação do filtro numérico de Chapman, que se faz uma separação simples do escoamento superficial (COLLISCHONN & DORNELLES, 2013). É definido que o escoamento do canal é separado entre o escoamento superficial (Q_f) e o escoamento de base ou subterrâneo (Q_b), conforme explícito na Equação 26.

$$Q_t = Q_f + Q_b \quad (26)$$

onde Q_t é a vazão total registrada na estação fluviométrica (m^3/dia); Qf_t é o escoamento superficial proveniente da chuva (m^3/dia); e Qb_t é o escoamento de base ou subterrâneo proveniente do aquífero (m^3/dia).

Nos períodos de estiagem, pode-se considerar que a vazão do rio tem um decaimento e a recarga do aquífero ocorre conforme a Equação 27.

$$Qb_{(t+\Delta t)} = Qb_t \cdot e^{\frac{-\Delta t}{k}} \quad (27)$$

onde $Qb_{(t+\Delta t)}$ é o escoamento de base ou subterrâneo após o incremento do tempo Δt (m^3/dia); Qb_t é o escoamento de base ou subterrâneo no tempo t (m^3/dia); Δt é a diferença de tempo analisada; e k é uma constante de decaimento.

Escolheu-se uma determinada série histórica de 60 dias com pouca precipitação e, para cada período, determinou-se a constante de decaimento k isolando esta constante na Equação 27. Foi calculado um k médio da bacia, sendo considerado representativo para a série de dados inteira, no valor de 30.

O filtro de Chapman é definido pela Equação 28, onde o termo a é definido pela Equação 29 (COLLISCHONN & DORNELLES, 2013).

$$Qb_t = \frac{a}{2-a} \cdot Qb_{t-1} + \frac{1-a}{2-a} \cdot Q_t \quad (28)$$

$$a = e^{\frac{-\Delta t}{k}} \quad (29)$$

Assim, calcula-se o escoamento de base Qb_t a partir do escoamento total Q_t com a constante k . A fim de comparar e calibrar o modelo corretamente, o volume deste escoamento de base foi subtraído do volume de água medido no exutório da bacia para cada evento calibrado. O resultado da separação dos escoamentos superficial e de base estão no Apêndice A deste trabalho

4.4 CALIBRAÇÃO DO MODELO

Foram escolhidos eventos de precipitação representativos no período de dados medidos entre 18/01/2012 e 09/07/2013. A escolha foi feita de forma aleatória, tentando escolher eventos bem distribuídos temporalmente e que representem diferentes características, como eventos mais e menos intensos. Como há falhas nos dados, um pequeno número de eventos pôde ser selecionado para a calibração. No total, foram inicialmente separados cinco eventos de calibração e, posteriormente, quatro para validação. Os eventos separados para a calibração encontram-se expostos na Tabela 5.

Tabela 5 – Eventos de precipitação utilizados para a calibração

		Início	Fim	Duração	Precipitação Acumulada (mm)
Calibração	Evento 1	24/02/2012	08/03/2012	14 dias	45,0
	Evento 2	15/07/2012	24/07/2012	10 dias	47,4
	Evento 3	18/12/2012	25/12/2012	8 dias	92,0
	Evento 4	31/05/2013	09/06/2013	10 dias	37,2
	Evento 5	28/06/2013	05/07/2013	8 dias	38,8

Foram feitas diversas simulações, calibrando os parâmetros. Cada simulação foi feita no período por completo de 18/01/2012 a 09/07/2013, entretanto somente o período de dias do evento de precipitação era analisado.

As variáveis que podem ser modificadas para a calibração do modelo são de dois tipos: características do tipo de solo e características do uso do solo. A maioria dos parâmetros do uso do solo estão vinculados a características de culturas agrícolas. Na bacia do rio Cunha predominam florestas, portanto a maioria desses parâmetros não tem grande impacto no caso estudado. Assim, optou-se por manter os parâmetros de características do uso do solo conforme o indicado pelo padrão do WEPP. Os parâmetros de uso do solo estão no Apêndice B deste trabalho.

Somente as características do tipo de solo foram modificadas para a calibração. Os parâmetros de tipo de solo são: número de camadas, albedo, saturação inicial (%), erodibilidade entressulcos (kg.s/m^4), erodibilidade nos sulcos (s/m), tensão de

cisalhamento crítica base (N/m^2), condutividade hidráulica efetiva (mm/h), profundidade do solo (mm), quantidade de areia (%), quantidade de argila (%), quantidade de matéria orgânica (%), Capacidade de Troca Catiônica (meq/100g), quantidade de rochas (%). Na Tabela 6 encontram-se os valores padrão que o GeoWEPP considera para os tipos de solo escolhidos inicialmente.

Tabela 6 – Valores padrão do GeoWEPP para os parâmetros de dois tipos de solo

	Tipo de Solo	
	Floresta Franco Siltosa	Floresta Franco Argilosa
Nº de camadas	1	1
Albedo	0,3	0,3
Saturação inicial (m/m)	0,5	0,5
Erodibilidade entressulcos ($kg,s/m^4$)	400000	1000000
Erodibilidade nos sulcos (s/m)	0,0002	0,0004
Tensão de cisalhamento crítica (N/m^2)	1	1,5
Condutividade hidráulica efetiva (mm/h)	30	40
Profundidade do solo (mm)	400	400
Areia (%)	25	25
Argila (%)	30	15
Matéria orgânica (%)	5	5
CTC (meq/100g)	25	15
Rochas (%)	15	15

Os parâmetros número de camadas, quantidade de matéria orgânica, CTC e quantidade de rochas foram mantidos conforme o padrão do GeoWEPP. Não havia dados suficientes para a determinação deles e considerou-se que estão adequados.

Como quase 72% da área da bacia é coberta por florestas, o albedo de florestas foi definido pela literatura, que varia de 0,1 a 0,25 (COLLISCHONN & DORNELLES, 2013). Definiu-se que o albedo de toda a bacia é 0,2.

Utilizou-se um valor de saturação inicial do solo de 90% depois de se averiguar que em todos os eventos houve necessidade de aumentar o volume de água escoado

pela bacia. Entretanto, esse valor de umidade inicial do solo não causa grandes efeitos, pois ele impacta somente as primeiras semanas do período analisado de 18/01/2012 a 09/07/2013, devido a ter sido definido que as simulações de calibração seriam neste período por completo.

A profundidade e a granulometria do solo foram retiradas do estudo de Michel (2013). Observou-se que a bacia do rio Cunha tem profundidades de até 15 metros e, assim, foi definido um valor de 10 metros de profundidade para ser utilizado no GeoWEPP. Neste mesmo estudo foi feita a análise granulométrica em 6 pontos amostrais e notou-se que havia duas tendências, algumas amostras eram mais ricas em areia e outras em argila. Com base nestes dados de campo, definiu-se que o solo rico em areia teria 49,5 % de areia e 17,4% de argila e o solo rico em argila teria 36,8% de areia e 30,1% de argila.

A condutividade hidráulica efetiva é um dos parâmetros mais sensíveis do GeoWEPP (NEARING *et al.*, 1990), além de ser um parâmetro de difícil determinação para a bacia inteira, pois varia temporalmente e espacialmente de forma significativa. Assim, determinou-se que esse seria o principal parâmetro a ser modificado para a calibração, conforme também sugerido por Flanagan *et al.* (2012). Diminuir a condutividade hidráulica implica o aumento do volume de água e sedimentos no exutório da bacia, pois quanto menor a infiltração de água, maior a vazão e o transporte de sedimentos.

Os parâmetros erodibilidade entressulcos, erodibilidade nos sulcos e a tensão de cisalhamento crítica afetam unicamente a quantidade de sedimentos gerados, sem afetar a vazão líquida. Sendo assim, estes são os parâmetros para calibrar a geração de sedimentos. Como o GeoWEPP é muito sensível à erodibilidade nos sulcos (NEARING *et al.*, 1990), determinou-se que esse seria o principal parâmetro para a calibração, como também foi sugerido por Flanagan *et al.* (2012).

Ressalta-se que a condutividade hidráulica e o escoamento superficial foram calibrados inicialmente, para posteriormente calibrar os parâmetros de geração de sedimentos. Este procedimento se justifica porque a geração de sedimentos depende do escoamento superficial.

4.4.1 Avaliação da calibração

Para avaliar se as mudanças dos parâmetros do tipo de solo e a calibração estão adequadas, é necessário usar alguma métrica. No presente trabalho foram utilizadas três métricas: coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE), Viés Porcentual (PBIAS) e Razão da Raiz do Erro Quadrático Médio com o Desvio Padrão Observado (RSR). Estas métricas foram recomendadas por Moriasi *et al.* (2007) para avaliar modelos hidrológicos e sedimentológicos.

O coeficiente de Eficiência de Nash Sutcliffe (NSE) indica a variância do resíduo comparado com a variância dos dados medidos. O coeficiente NSE varia de $-\infty$ a 1. Valores satisfatórios de NSE são iguais ou maiores que 0,5 (MORIASI *et al.*, 2007). O NSE é calculado a partir da Equação 30.

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y^{medio})^2} \right] \quad (30)$$

onde Y_i^{obs} é o dado observado ou medido no i -ésimo dia do evento; Y_i^{sim} é o valor simulado pelo GeoWEPP no i -ésimo dia; Y^{medio} é a média dos valores observados; e n é o número total de dias do evento.

O Viés Porcentual (PBIAS) indica a tendência média dos dados simulados serem maiores ou menores que os observados, sendo uma análise equivalente ao erro de volume. O ponto ótimo do PBIAS é 0,0, sendo que valores positivos indicam um viés do modelo de subestimar e valores negativos indicam um viés do modelo de superestimar os dados observados. Valores satisfatórios do PBIAS são $\pm 25\%$ para escoamento e $\pm 55\%$ para sedimentos (MORIASI *et al.*, 2007). O PBIAS é calculado pela Equação 31.

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim}) \cdot (100)}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs})} \right] \quad (31)$$

A Razão da Raiz do Erro Quadrático Médio com o Desvio Padrão Observado (RSR) é um índice de erro, onde o Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) é padronizado pelo desvio padrão. O RSR varia de 0 a $+\infty$, sendo que o valor 0 é o melhor possível. Valores satisfatórios de RSR são menores ou iguais a 0,70 (MORIASI *et al.*, 2007). O RSR é definido pela Equação 32.

$$RSR = \frac{\left[\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2} \right]}{\left[\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{médio})^2} \right]} \quad (32)$$

Além destes coeficientes que indicam como os valores simulados diferem em relação aos valores observados, foram utilizados gráficos, como o hidrograma e sedimentograma. Os parâmetros de solo foram modificados manualmente diversas vezes até os valores das métricas e os gráficos ficarem satisfatórios, conforme consta exposto na Tabela 7.

Tabela 7 – Avaliação da performance das métricas usadas (MORIASI *et al.*, 2007)

Performance	RSR	NSE	PBIAS (%)	
			Escoamento	Sedimento
Muito bom	$0,00 \leq RSR \leq 0,50$	$0,75 < NSE \leq 1,00$	$PBIAS < \pm 10$	$PBIAS < \pm 15$
Bom	$0,50 < RSR \leq 0,60$	$0,65 < NSE \leq 0,75$	$\pm 10 \leq PBIAS < \pm 15$	$\pm 15 \leq PBIAS < \pm 30$
Satisfatório	$0,60 < RSR \leq 0,70$	$0,50 < NSE \leq 0,65$	$\pm 15 \leq PBIAS < \pm 25$	$\pm 30 \leq PBIAS < \pm 55$
Insatisfatório	$RSR > 0,70$	$NSE \leq 0,50$	$PBIAS \geq \pm 25$	$PBIAS \geq \pm 55$

4.5 VALIDAÇÃO DO MODELO

Após a calibração dos eventos, ocorreu a etapa de validação. Para isso, escolheu-se quatro eventos novamente de forma aleatória dentro do período de análise. Para validar o modelo, optou-se por realizar o cálculo dos valores médios dos parâmetros que obtiveram as melhores métricas. Assim, esses valores médios foram aplicados aos eventos de chuva escolhidos para validar o modelo (Tabela 8). As métricas e o gráfico foram novamente analisados, a fim de avaliar se o modelo foi validado.

Tabela 8 – Eventos de precipitação usados para a validação

		Início	Fim	Duração	Precipitação Acumulada (mm)
Validação	Evento 6	07/04/2012	23/04/2012	17 dias	50,0
	Evento 7	23/04/2012	02/05/2012	10 dias	106,0
	Evento 8	17/01/2013	25/01//2013	9 dias	58,8
	Evento 9	02/05/2013	12/05/2013	11 dias	74,8

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As sub-bacias e a drenagem geradas automaticamente pelo GeoWEPP estão expostas na Figura 24. Foram geradas 461 sub-bacias. Como a rede de drenagem foi definida no trabalho somente uma vez e foi considerada satisfatória, a análise do comprimento do rio e densidade de drenagem não foi realizada neste trabalho.

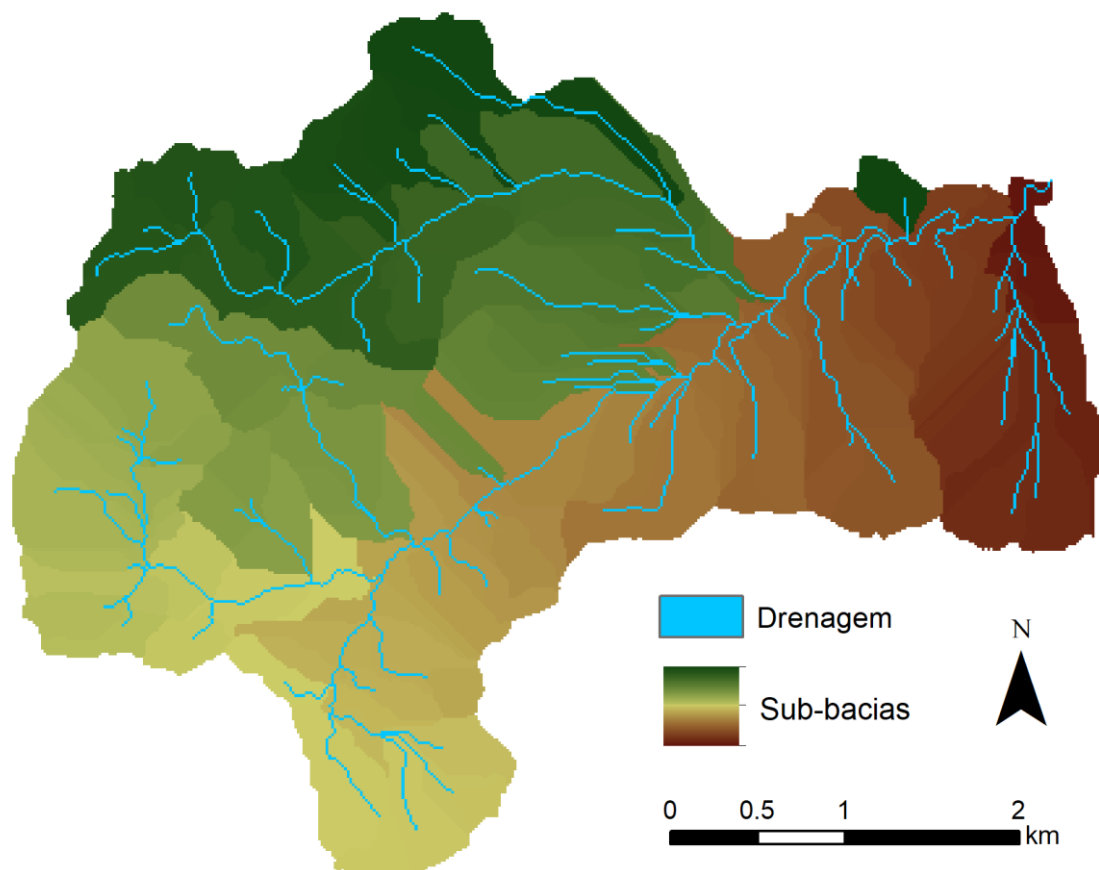


Figura 24 – Sub-bacias e drenagens definidas pelo GeoWEPP

Os dados de volume do escoamento e de massa de sedimentos que constam expostas na Figura 25 e na Figura 26 foram organizados e serviram para calibração e validação do modelo. Ressalta-se que esses dados são brutos e, por isso, foram escolhidos somente eventos onde não houve falha nas medições.

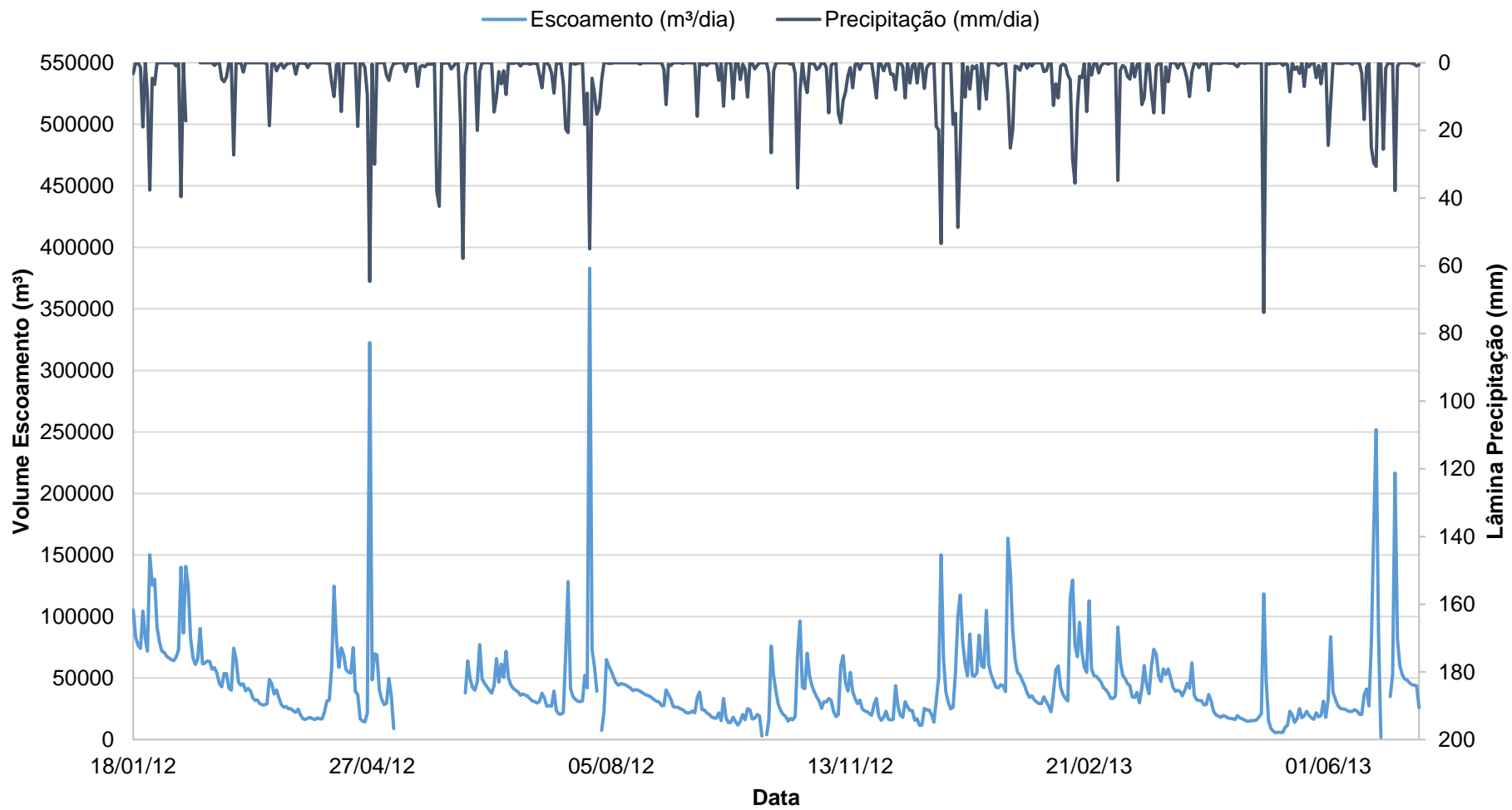


Figura 25 - Série de dados diários brutos observados de escoamento (m³) e precipitação (mm)

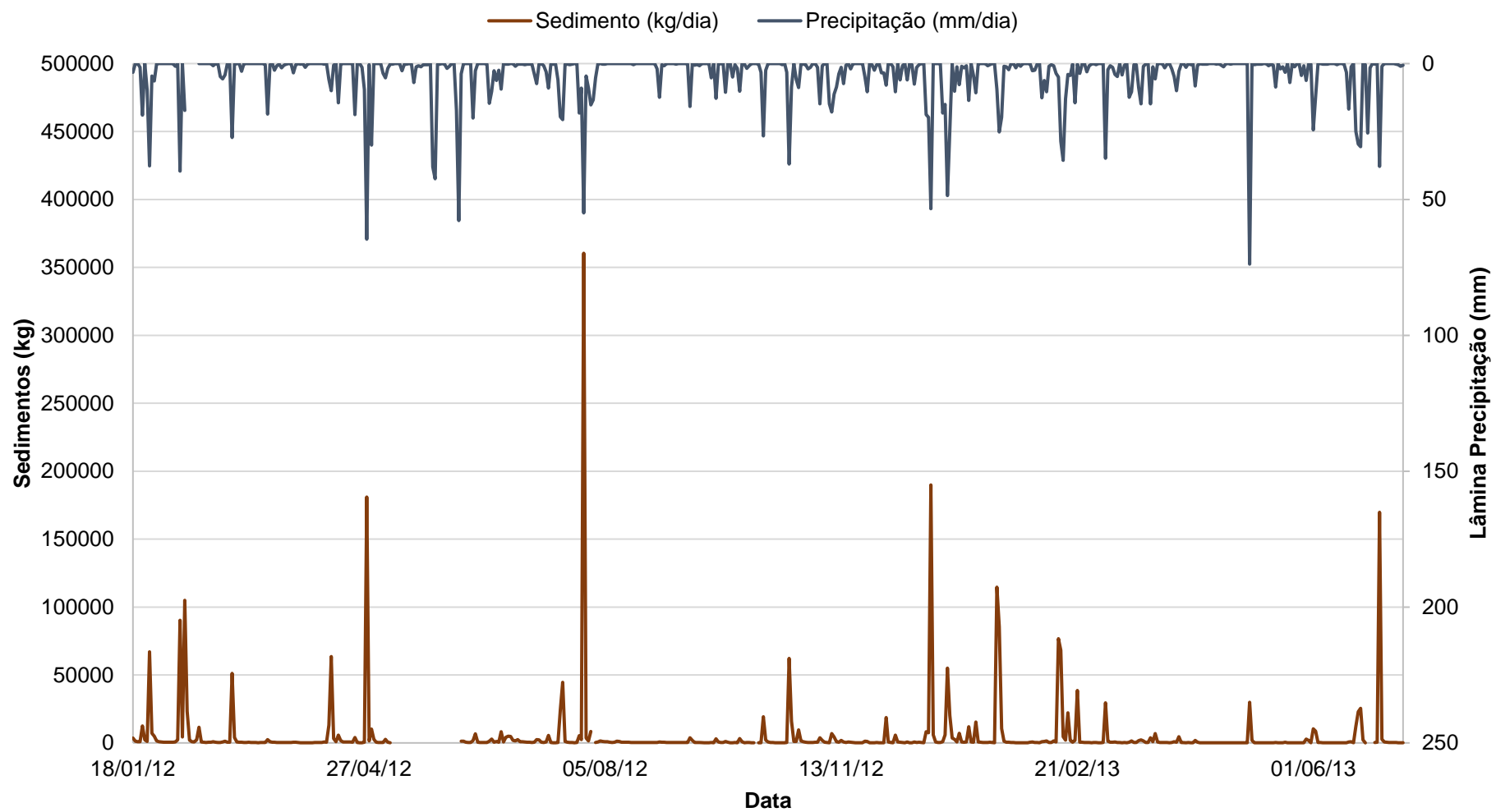


Figura 26 – Série de dados diários brutos observados de sedimentos (kg/10min) e precipitação (mm)

5.1 CALIBRAÇÃO DO MODELO

Os únicos parâmetros modificados na etapa de calibração foram a condutividade hidráulica efetiva, para modificar o escoamento, e a erodibilidade nos sulcos, para modificar a produção de sedimentos. Foram testados valores de condutividade hidráulica de 0,4 a 20 mm/h e valores de erodibilidade nos sulcos de 0,0001 a 0,0003 s/m.

5.1.1 Evento 1

O evento 1 teve 14 dias de duração, com uma chuva um pouco mais distribuída entre os eventos de calibração. Na Tabela 9 estão expostos os seus dados medidos e simulados.

Tabela 9 – Evento 1: comparação entre valores medidos e simulados pelo GeoWEPP

Data	Medido			Simulado	
	Precipitação (mm)	Escoamento (m ³)	Sedimento (kg)	Escoamento (m ³)	Sedimento (kg)
24/02/12	4,8	0,0	360,8	10251,99	3772,4
25/02/12	5,6	11926,3	676,1	9973,78	3830,9
26/02/12	4,2	12686,1	1322,7	9452,89	3818
27/02/12	0	2342,9	476,2	8562,97	3846,3
28/02/12	0,2	1753,9	427,7	8854,12	3828,5
29/02/12	27,2	36084,3	51271,4	38655,39	45159,3
01/03/12	0,2	27270,1	3922,4	8664,84	3887,4
02/03/12	0	9763,3	595,2	7509,91	3833,9
03/03/12	0	8268,4	473,3	7971,9	3887,3
04/03/12	2,8	10121,5	489,3	7983,4	3844,1
05/03/12	0	5556,5	351,6	7179,3	3734,8
06/03/12	0	8310,3	392,5	6957,7	3601,1
07/03/12	0	7140,7	410,7	6742,6	3410,4
08/03/12	0	2655,0	329,3	6433,9	3182,9

Na Figura 27 e na Figura 28 estão expostos o hidrograma e o gráfico de geração de sedimentos medidos e simulados para o evento 1.

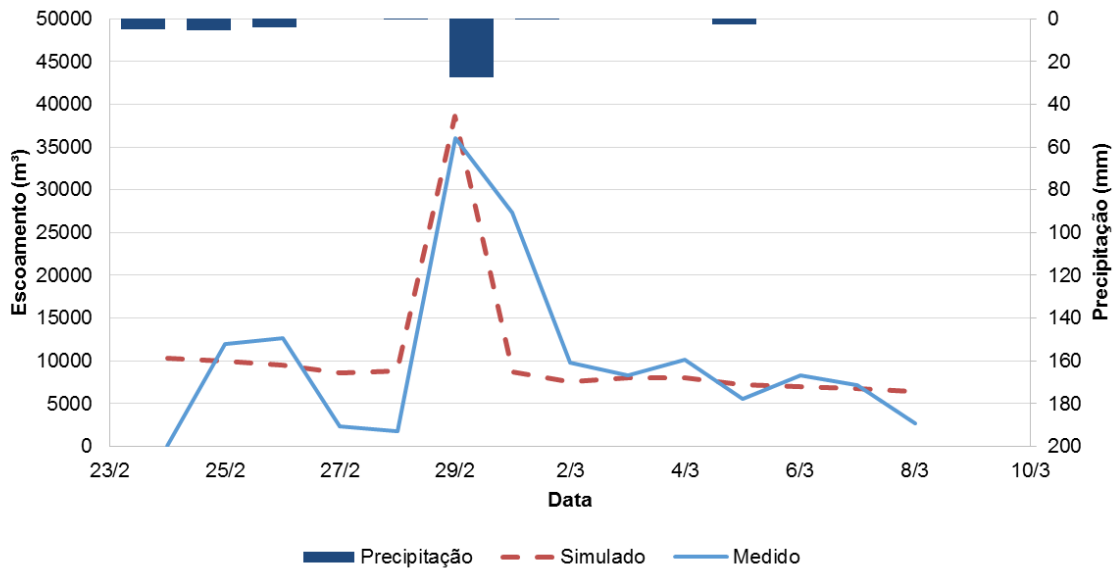


Figura 27 – Evento 1: hidrograma medido e simulado

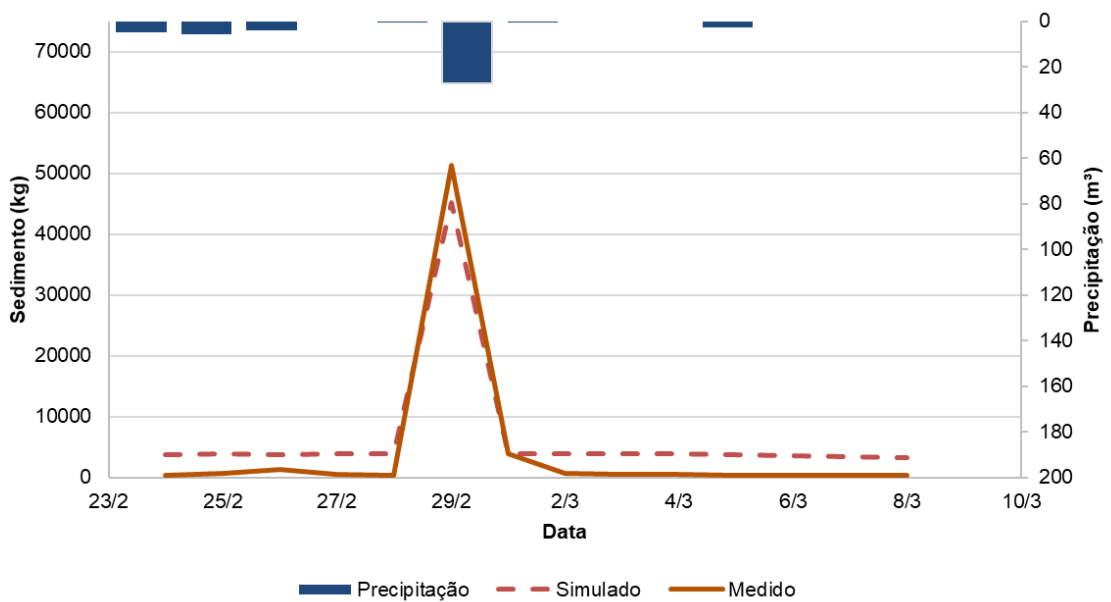


Figura 28 – Evento 1: geração de sedimento medida e simulada

O evento 1 obteve o um ajuste satisfatório. Entretanto, o hidrograma simulado não foi sensível às pequenas variações de precipitação ao longo dos dias, conforme o registro do hidrograma medido. A produção de sedimentos simulada em dias de vazões baixas também ficou acima da medida, piorando o coeficiente PBIAS. Isto pode indicar um mau desempenho do GeoWEPP em representar recessões e escoamentos de vazões baixas ou incertezas no filtro de Chapman, com o qual foi separado o escoamento subterrâneo, sendo que a

primeira alternativa é a mais provável, visto que o mesmo efeito foi observado em outras simulações. As demais métricas estão dispostas na Tabela 10.

Tabela 10 – Evento 1: métricas e performance da calibração de acordo com Moriasi *et al.* (2007)

		Evento 1	Performance
NSE	Escoamento	0,55	Satisfatório
	Sedimento	0,93	Muito bom
PBIAS	Escoamento	-1	Muito bom
	Sedimento	-52	Satisfatório
RSR	Escoamento	0,67	Satisfatório
	Sedimento	0,26	Muito bom

5.1.2 Evento 2

O evento 2 teve dez dias de duração, sendo uma chuva um pouco mais distribuída, mas com três dias mais intensos, nos quais houve 46,2 mm de precipitação. Na Tabela 11 estão expostos detalhes do evento, assim como os valores medidos e simulados.

Tabela 11 – Evento 2: comparação entre valores medidos e simulados pelo GeoWEPP

Data	Medido			Simulado	
	Precipitação (mm)	Escoamento (m³)	Sedimento (kg)	Escoamento (m³)	Sedimento (kg)
15/07/12	0,2	0,0	159,1	2563,06	187,6
16/07/12	6	1800,0	315,3	2998,36	224
17/07/12	19,6	48315,0	24227,2	41535,32	30828,7
18/07/12	20,6	104551,5	44600,1	102649,21	58867,2
19/07/12	0,2	18162,3	1064,2	4894,58	464,9
20/07/12	0,2	12034,3	513,2	4613,73	409,8
21/07/12	0,4	10088,5	375,0	4415,16	388,5
22/07/12	0,2	9038,2	233,4	4467,87	437,6
23/07/12	0	9031,5	198,8	3210,8	317,5
24/07/12	0	10003,3	212,6	3800,9	385,4

Na Figura 29 e na Figura 30 é exposto o hidrograma e a geração de sedimentos do evento 2, respectivamente.

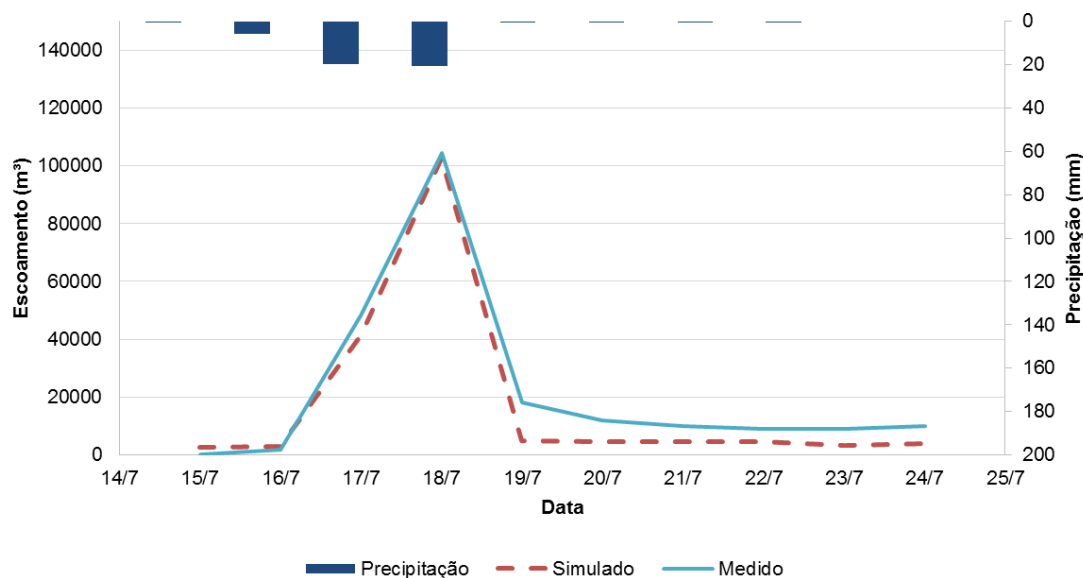


Figura 29 – Evento 2: hidrograma medido e simulado

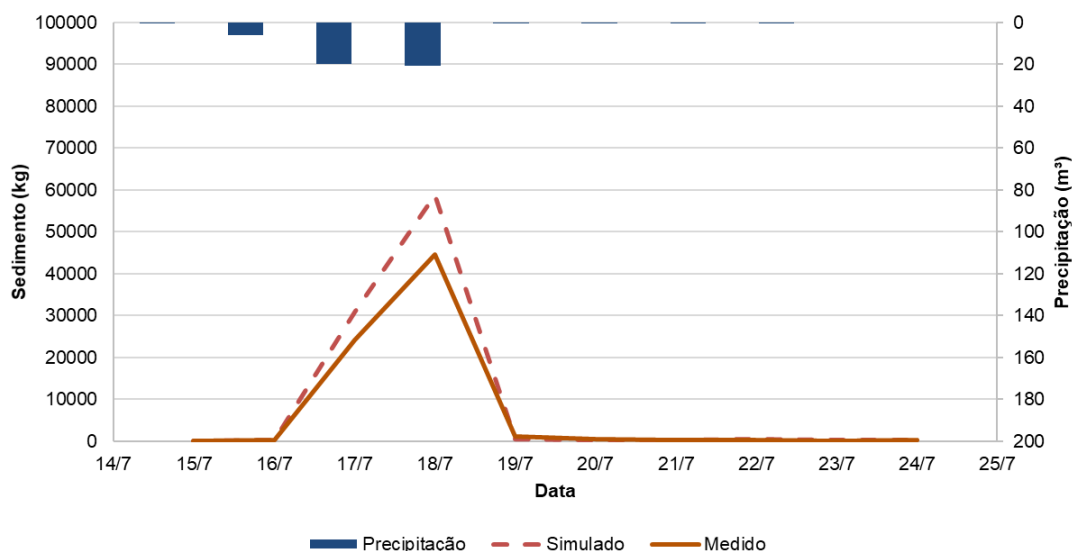


Figura 30 – Evento 2: geração de sedimentos medida e simulada

A calibração do hidrograma obteve bons resultados, com exceção das vazões baixas após a recessão do hidrograma. A calibração da geração de sedimentos obteve resultados um pouco piores, havendo dificuldade de a simulação alcançar o pico de sedimentos. A modificação do parâmetro de erodibilidade nos sulcos não foi capaz de obter um bom ajuste. Seria necessário modificar outros parâmetros. Entretanto, preferiu-se manter a estratégia de modificar somente o parâmetro de erodibilidade nos sulcos e, como a métrica já havia encontrado valores satisfatórios (Tabela 12), decidiu-se encerrar o processo de calibração.

Tabela 12 – Evento 2: métricas e performance da calibração de acordo com Moriasi *et al.* (2007)

		Evento 2	Performance
NSE	Escoamento	0,95	Muito bom
	Sedimento	0,88	Muito bom
PBIAS	Escoamento	21	Satisfatório
	Sedimento	-29	Bom
RSR	Escoamento	0,21	Muito bom
	Sedimento	0,35	Muito bom

5.1.3 Evento 3

O evento 3 teve oito dias de duração, com 3 dias de chuva intensa, acumulando 92 mm, sendo o segundo maior evento de chuva de toda a série de dados. O resultado da simulação do evento 3 encontra-se exposto na Tabela 13.

Tabela 13 – Evento 3: comparação entre valores medidos e simulados pelo GeoWEPP

Data	Medido			Simulado	
	Precipitação (mm)	Escoamento (m ³)	Sedimento (kg)	Escoamento (m ³)	Sedimento (kg)
18/12/12	0	0,0	124,2	817,5	2,7
19/12/12	18,8	12600,8	8188,5	2864,29	14,4
20/12/12	19,8	31409,3	7549,1	6494,05	1091,8
21/12/12	53,4	126822,2	189969,3	148481,78	172061,9
22/12/12	0	42137,5	5962,9	14807,98	4787,3
23/12/12	0	14949,0	647,9	3722,83	93,1
24/12/12	0	6993,6	284,9	1822,61	8
25/12/12	0	2536,1	212,3	1286,5	4,8

O hidrograma medido e gerado e o gráfico de geração de sedimentos estão dispostos na Figura 31 e na Figura 32.

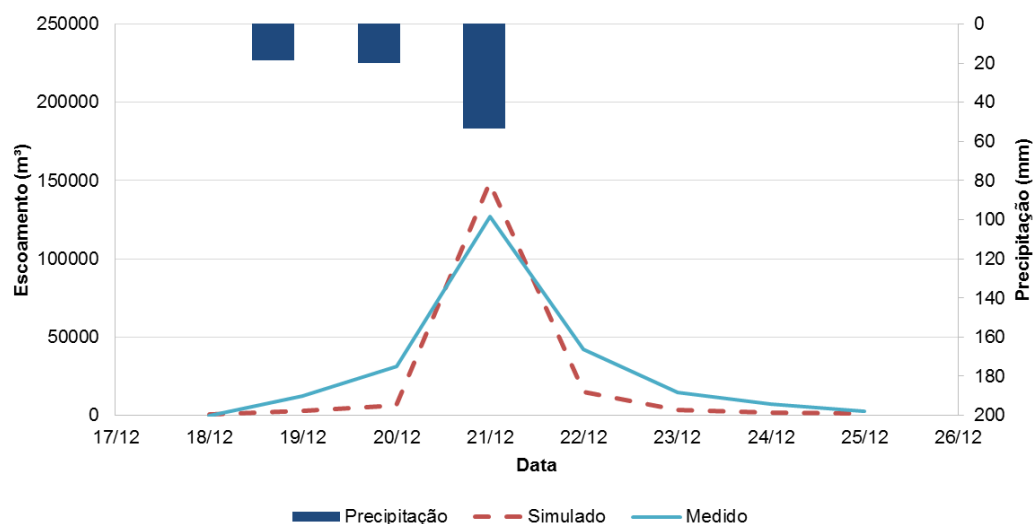


Figura 31 – Evento 3: hidrograma medido e simulado

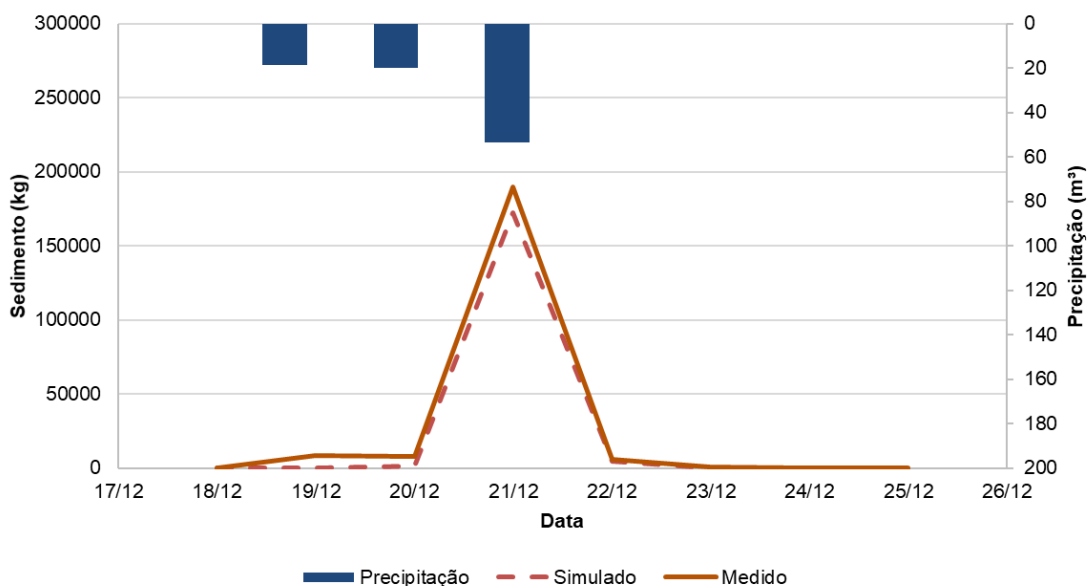


Figura 32 – Evento 3: geração de sedimentos medida e simulada

Novamente, a simulação de sedimentos obteve melhor ajuste que a de escoamento. Houve problemas em ajustar a ascensão e a recessão do hidrograma, sendo a base do evento de chuva simulado mais estreita que a do observado. Isto diminuiu o coeficiente PBIAS, conforme consta exposto na Tabela 14. A maioria das métricas apresentaram um ajuste muito bom.

Tabela 14 – Evento 3: métricas e performance da calibração de acordo com Moriasi *et al.* (2007)

		Evento 3	Performance
NSE	Escoamento	0,83	Muito bom
	Sedimento	0,99	Muito bom
PBIAS	Escoamento	24	Satisfatório
	Sedimento	16	Bom
RSR	Escoamento	0,41	Muito bom
	Sedimento	0,12	Muito bom

5.1.4 Evento 4

O evento 4 teve 10 dias de duração, sendo o evento escolhido de calibração com menor precipitação. Na Tabela 15 estão expostos os resultados da simulação.

Tabela 15 – Evento 4: comparação entre valores medidos e simulados pelo GeoWEPP

Data	Medido			Simulado	
	Precipitação (mm)	Escoamento (m ³)	Sedimento (kg)	Escoamento (m ³)	Sedimento (kg)
31/05/13	0,2	0	102,86	330,99	0,4
01/06/13	24,4	15337	10333	70651	26340
02/06/13	12	64010	8597,5	7246,3	1061,5
03/06/13	0	19102	394,17	685,44	1
04/06/13	0	13504	236,78	808,63	1,3
05/06/13	0,2	8755,6	149,94	1057,2	1,7
06/06/13	0,2	6763	153,85	803,71	1,2
07/06/13	0,2	6873	166,67	683,19	1
08/06/13	0	6915,2	144,89	231,28	0
09/06/13	0	6032,1	124,36	311,08	0,2

A Figura 33 e a Figura 34 mostram a representação gráfica do evento.

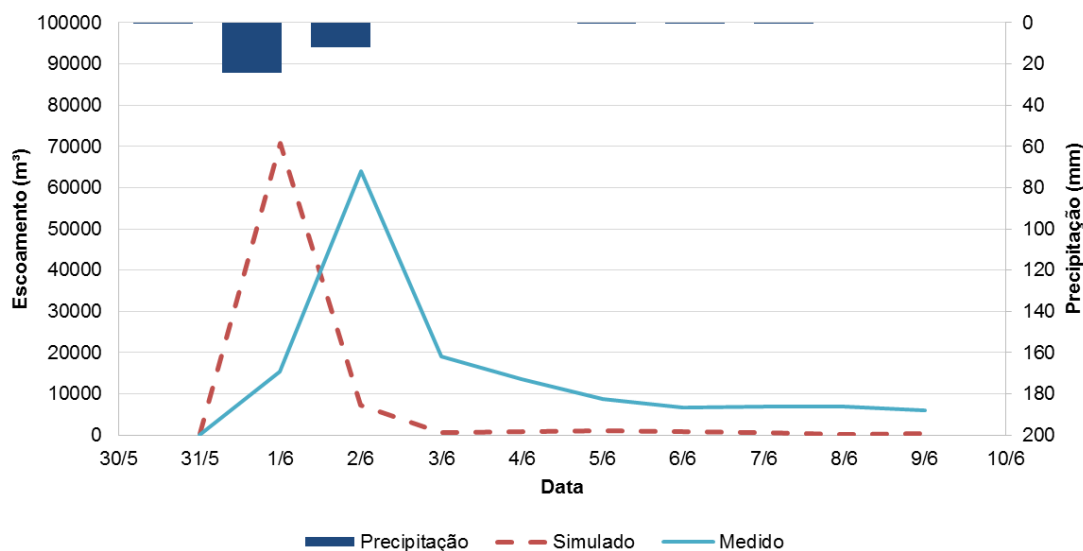


Figura 33 – Evento 4: hidrograma medido e simulado

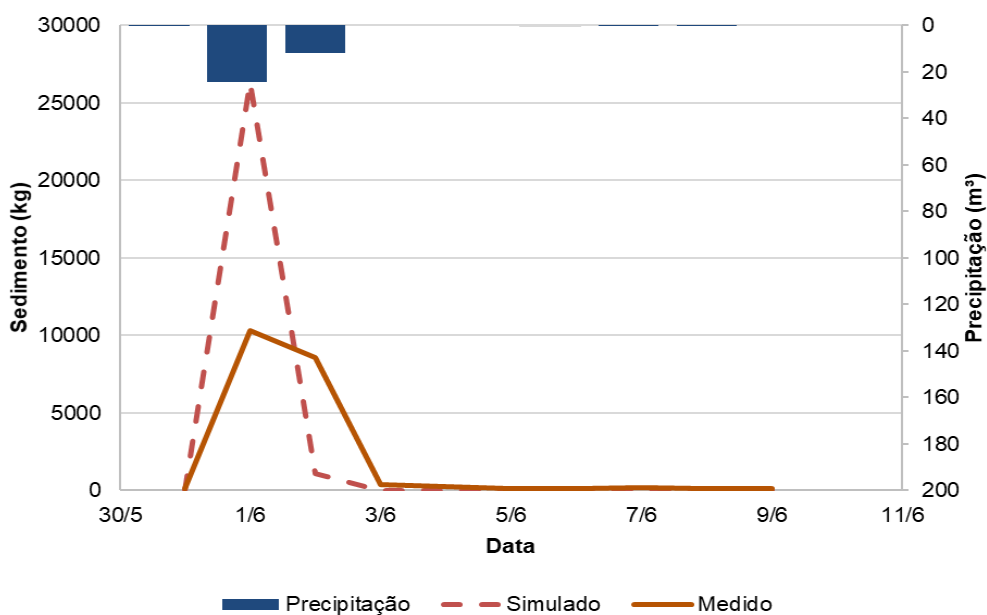


Figura 34 – Figura 4: geração de sedimentos medida e simulada

Constata-se que o pico de vazão do hidrograma e o pico dos sedimentos estão deslocados. Isso ocorreu porque a precipitação mais intensa aconteceu no dia 01/06 de noite, por volta das 21h, o que implicou em um aumento do volume escoado a partir das 23h e durante a madrugada inteira do dia 02/06. Como o GeoWEPP tem resolução temporal diária e não se determina o horário da chuva, o programa considerou que a chuva ocorrida do dia 01/06 gerou um escoamento

no mesmo dia. Este fato está melhor demonstrado na Figura 35. Por conta desta adversidade, esse evento foi desconsiderado.

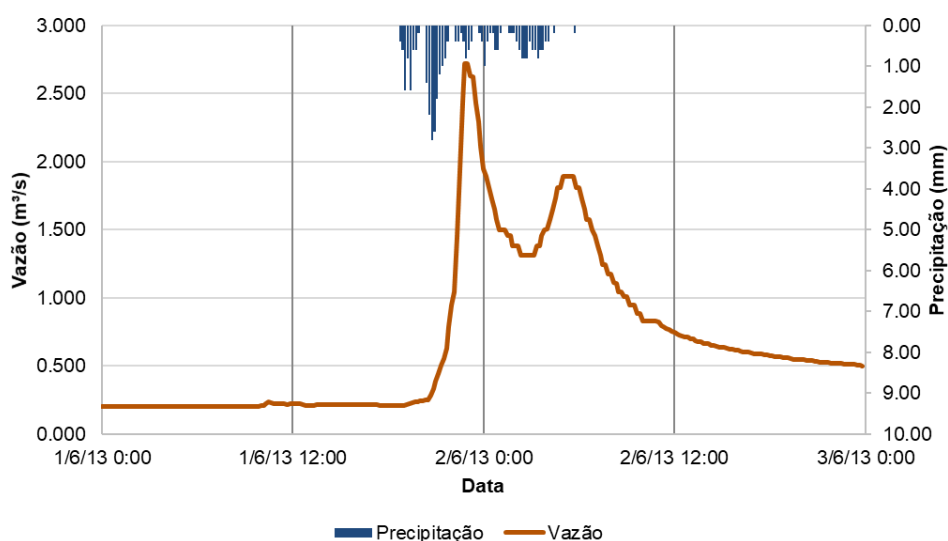


Figura 35 – Deslocamento entre dias na precipitação e no volume escoado medidos

As métricas, que são insuficientes, estão dispostas na Tabela 16.

Tabela 16 – Evento 4: métricas e performance da calibração de acordo com Moriasi *et al.* (2007)

		Evento 4	Performance
NSE	Escoamento	-1,35	Insatisfatório
	Sedimento	-1,24	Insatisfatório
PBIAS	Escoamento	44	Insatisfatório
	Sedimento	-34	Satisfatório
RSR	Escoamento	1,53	Insatisfatório
	Sedimento	1,50	Insatisfatório

5.1.5 Evento 5

O evento 5 teve oito dias de duração, sendo que choveu intensamente em apenas um dia, no qual contabilizou-se um total precipitado de 37,8 mm. Na Tabela 17 estão expostos os valores medidos e simulados pelo GeoWEPP.

Tabela 17 – Evento 5: comparação entre valores medidos e simulados pelo GeoWEPP

Data	Medido			Simulado	
	Precipitação (mm)	Escoamento (m ³)	Sedimento (kg)	Escoamento (m ³)	Sedimento (kg)
28/06/13	0	32030,9	406,7	6472,1	237,4
29/06/13	37,8	190012,2	169704,5	188017,9	194052,2
30/06/13	1	54334,6	2711,4	8329,6	570,4
01/07/13	0	32539,2	760,4	7163,9	350,7
02/07/13	0	25270,6	442,6	6547,0	236,2
03/07/13	0	21784,3	337,2	5824,8	125,7
04/07/13	0	21398,6	296,4	5087,5	52,7
05/07/13	0	19270,7	254,4	4389,3	30,0

A Figura 36 e a Figura 37 apresentam uma interpretação qualitativa dos resultados.

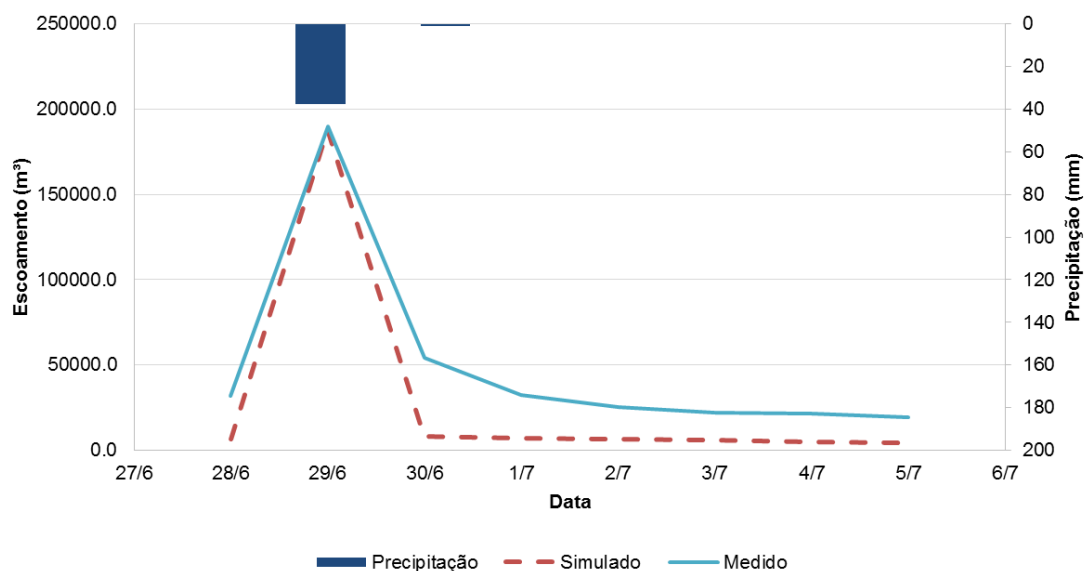


Figura 36 – Evento 5: Hidrograma medido e simulado

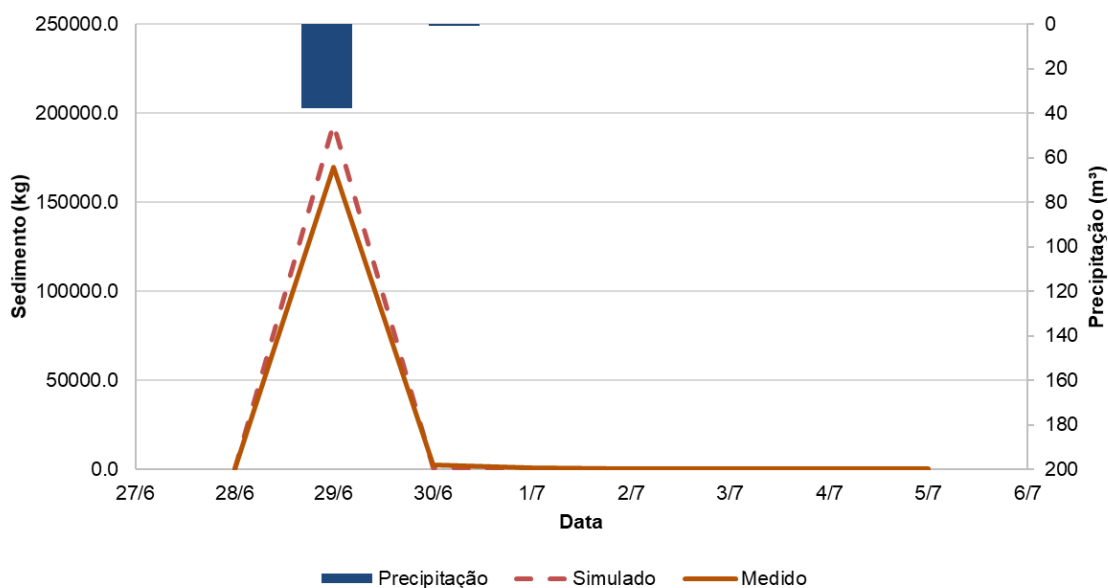


Figura 37 – Evento 5: Geração de sedimentos medida e simulada

Em relação ao escoamento, o modelo representou bem o pico do escoamento, porém a recessão do hidrograma não foi bem representada. Já a representação da geração de sedimentos obteve um melhor ajuste. Há somente um pico maior de produção de sedimento na simulação. A performance do ajuste do evento 5 encontra-se na Tabela 18.

Tabela 18 – Evento 5: métricas e performance da calibração de acordo com Moriasi *et al.* (2007)

		Evento 5	Performance
NSE	Escoamento	0,81	Muito bom
	Sedimento	0,98	Muito bom
PBIAS	Escoamento	42	Insatisfatório
	Sedimento	-12	Muito bom
RSR	Escoamento	0,44	Muito bom
	Sedimento	0,15	Muito bom

Em geral, o evento 5 foi muito bem ajustado. O PBIAS, que indica o volume de escoamento, se mostrou insatisfatório, justamente por causa da má representação do escoamento na recessão do evento.

5.1.6 Análise dos eventos de calibração

Os parâmetros de solo obtidos após a calibração de todos os eventos estão dispostos na Tabela 19 e Tabela 20, para argissolo vermelho-amarelo e cambissolo respectivamente.

O evento 4 da calibração não se mostrou adequado para a calibração por causa da resolução temporal diária do GeoWEPP, que provocou uma defasagem no pico da chuva. Por isso, o evento 4 foi descartado da calibração, não sendo utilizado para determinar os parâmetros para a validação.

Tabela 19 – Parâmetros do solo argissolo vermelho-amarelo obtidos na calibração e usados na validação

Evento	Calibração					Validação
	1	2	3	4	5	Média
Nº de camadas	1	1	1	1	-	1
Albedo	0,2	0,2	0,2	0,2	-	0,2
Saturação inicial (m/m)	0,9	0,9	0,9	0,9	-	0,9
Erodibilidade entressulcos (kg.s/m ⁴)	400000	400000	400000	400000	-	400000
Erodibilidade sulcos (s/m)	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	-	0,0001
Tensão de cisalhamento crítica (N/m ²)	1,0	1,0	1,0	1,0	-	1,0
Condutividade hidráulica efetiva (mm/h)	6,00	15,00	0,60	1,80	-	5,85
Profundidade solo (mm)	10000	10000	10000	10000	-	10000
Areia (%)	36,8	36,8	36,8	36,8	-	36,8
Argila (%)	30,1	30,1	30,1	30,1	-	30,1
Matéria orgânica (%)	5,0	5,0	5,0	5,0	-	5,0
CTC (meq/100g)	25,0	25,0	25,0	25,0	-	25,0
Rochas (%)	15,0	15,0	15,0	15,0	-	15,0

Tabela 20 – Parâmetros do solo cambissolo obtidos na calibração e usados na validação

Evento	Calibração					Validação
	1	2	3	4	5	Média
Nº de camadas	1	1	1	1	-	1
Albedo	0,2	0,2	0,2	0,2	-	0,2
Saturação inicial (m/m)	0,9	0,9	0,9	0,9	-	0,9
Erodibilidade entressulcos (kg.s/m ⁴)	1000000	1000000	1000000	1000000	-	1000000
Erodibilidade sulcos (s/m)	0,0001	0,0003	0,0002	0,0002	-	0,0002
Tensão de cisalhamento crítica (N/m ²)	1,5	1,5	1,5	1,5	-	1,5
Condutividade hidráulica efetiva (mm/h)	8,00	20,00	0,80	3,80	-	8,15
Profundidade solo (mm)	10000	10000	10000	10000	-	10000
Areia (%)	49,5	49,5	49,5	49,5	-	49,5
Argila (%)	17,4	17,4	17,4	17,4	-	17,4
Matéria orgânica (%)	5,0	5,0	5,0	5,0	-	5,0
CTC (meq/100g)	25,0	25,0	25,0	25,0	-	25,0
Rochas (%)	15,0	15,0	15,0	15,0	-	15,0

Constata-se que o argissolo vermelho-amarelo tem maior conteúdo de argila, o que gerou, no processo de calibração, menor condutividade hidráulica e menor erodibilidade. Enquanto a erodibilidade nos sulcos variou pouco entre os eventos, de 0,0001 a 0,0003 s/m, a condutividade hidráulica efetiva variou consideravelmente, de 0,6 a 20 mm/h. Isto traz alguma incerteza na análise, indicando que o ideal seria ter mais eventos de chuva para alcançar um valor médio da bacia representativo.

Em geral, a calibração dos eventos se mostrou adequada. A calibração da produção de sedimentos se apresentou um pouco melhor que a de escoamento superficial. Os resultados das métricas estão dispostos na Tabela 21 e na Tabela 22.

Tabela 21 – Performance do modelo para cada evento de chuva de calibração para escoamento superficial. Em vermelho estão as métricas consideradas insatisfatórias

	Evento	NSE	PBIAS	RSR	Performance
Calibração	1	0,55	-1	0,67	Satisfatório
	2	0,95	21	0,21	Muito bom
	3	0,83	24	0,41	Muito bom
	4	-1,35	44	1,53	Insatisfatório
	5	0,81	42	0,44	Bom

Tabela 22 – Performance do modelo para cada evento de chuva de calibração para produção de sedimentos. Em vermelho estão as métricas consideradas insatisfatórias

	Evento	NSE	PBIAS	RSR	Performance
Calibração	1	0,93	-52	0,26	Bom
	2	0,88	-29	0,35	Muito bom
	3	0,99	16	0,12	Muito bom
	4	-1,24	-34	1,50	Insatisfatório
	5	0,98	-12	0,15	Muito bom

Constata-se que as métricas do evento 4 ficaram insatisfatórias, por causa da defasagem de um dia do pico de chuva durante o evento. Por isso, este evento foi desconsiderado.

5.2 VALIDAÇÃO DO MODELO

Na validação os parâmetros do solo foram fixos, sendo que foi utilizada a média dos parâmetros dos eventos anteriores (eventos 1, 2, 3 e 5), conforme a Tabela 19 e a Tabela 20. Após a análise de novos eventos de validação, o modelo não foi considerado válido.

5.2.1 Evento 6

O evento 6 foi o mais longo considerado, com 17 dias e alguns dias de chuva distribuídos ao longo do evento. Na Tabela 23 estão expostas medidas deste evento e dos resultados obtidos pela modelagem.

Tabela 23 – Evento 6: comparação entre valores medidos e simulados pelo GeoWEPP

Data	Medido			Simulado	
	Precipitação (mm)	Escoamento (m ³)	Sedimento (kg)	Escoamento (m ³)	Sedimento (kg)
07/04/12	0	0,0	267,0	2258,7	532,2
08/04/12	0,2	9463,1	700,4	2442,5	617,2
09/04/12	0	10538,9	518,3	2071,4	453,3
10/04/12	5,8	36198,1	12992,4	2626,7	783,8
11/04/12	10	100041,1	63569,4	2825,4	905,7
12/04/12	0,6	55090,9	3159,4	2142,8	484,7
13/04/12	0	32812,9	939,0	1712,5	368,2
14/04/12	14,4	47825,1	5796,3	3371,3	2955,6
15/04/12	0,2	41875,5	1562,0	2043,0	447,3
16/04/12	0	29659,1	763,9	1489,1	315,9
17/04/12	0	27690,2	720,0	1662,6	346,3
18/04/12	0	26749,9	594,5	1598,7	331,3
19/04/12	0	46849,3	781,2	1650,3	338,4
20/04/12	0	11648,1	448,7	1634,8	330,7
21/04/12	18,8	9838,3	4041,0	3302,4	2489,1
22/04/12	0	0,0	230,1	1556,7	313,0
23/04/12	0	0,0	172,9	1461,1	293,4

O hidrograma e a geração de sedimentos estão dispostos na Figura 38 e na Figura 40, respectivamente.

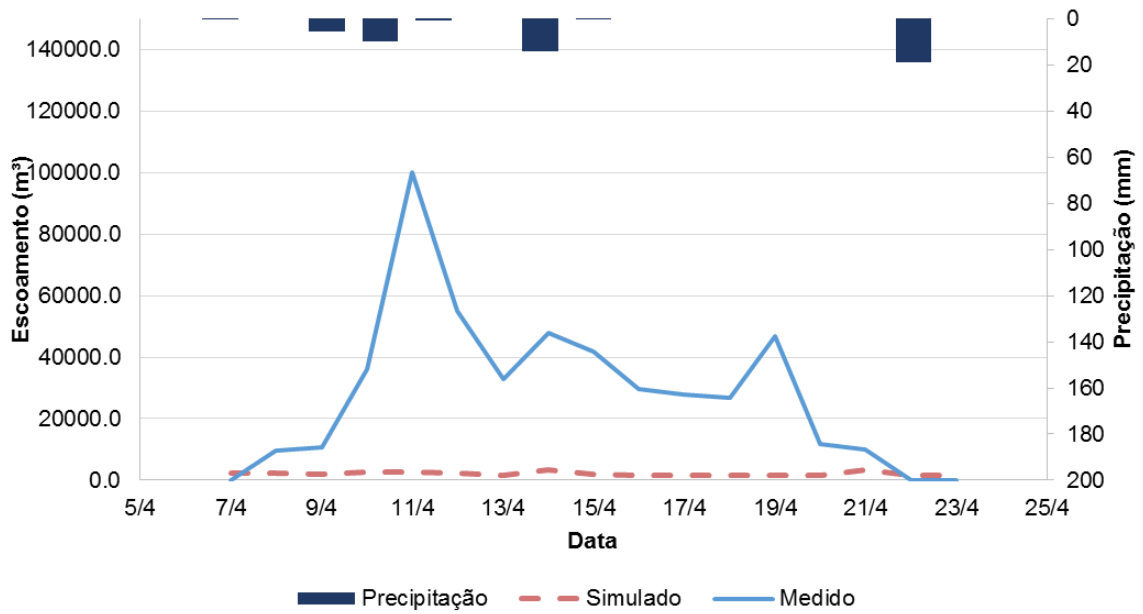


Figura 38 – Evento 6: hidrograma medido e simulado

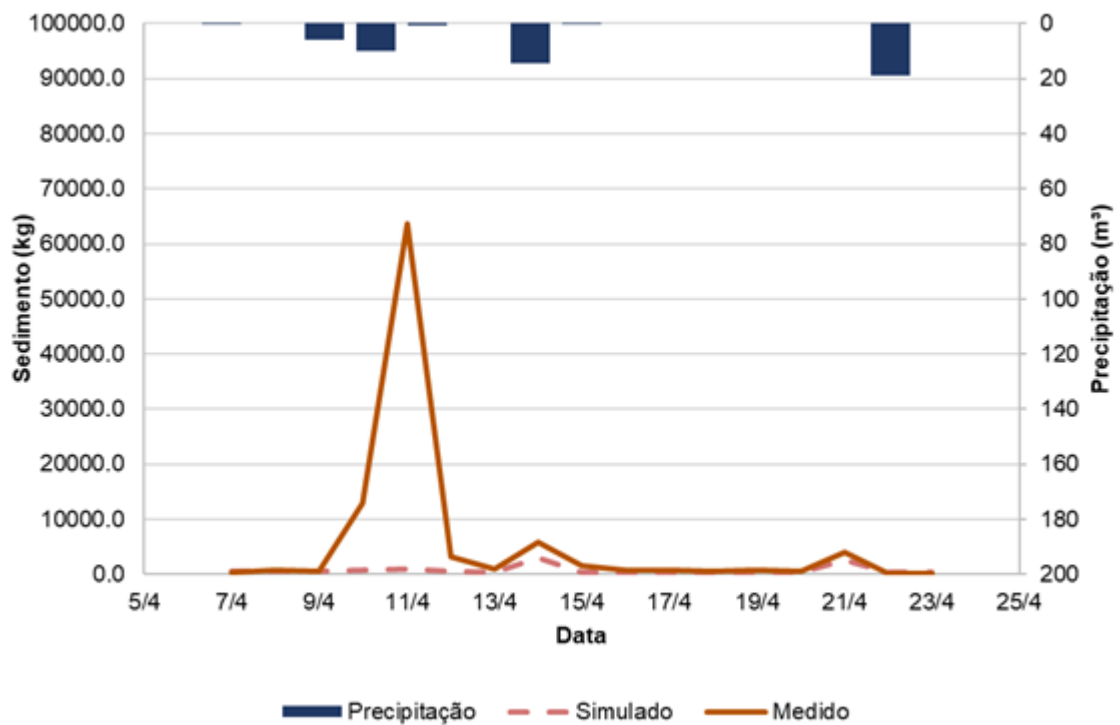


Figura 39 – Evento 6: geração de sedimento medida e simulada

Nota-se que o evento de chuva considerado causou pouco estímulo na simulação do GeoWEPP. Este fato, grave, é atribuído a um erro de medição do sensor de nível, conforme mencionado por Goerl (2014). Portanto, a performance insatisfatória deste evento tem origem na inconsistência dos dados medidos e não na simulação (Tabela 24).

Tabela 24 – Evento 6: métricas e performance da validação de acordo com Moriasi *et al.* (2007)

		Evento 6	Performance
NSE	Escoamento	-1,91	Insatisfatório
	Sedimento	-0,14	Insatisfatório
PBIAS	Escoamento	94	Insatisfatório
	Sedimento	90	Insatisfatório
RSR	Escoamento	1,71	Insatisfatório
	Sedimento	1,07	Insatisfatório

5.2.2 Evento 7

O evento 7 durou dez dias, com a precipitação máxima de 64,6 mm em um dia. Na Tabela 25 estão as medidas do evento e os resultados simulados.

Tabela 25 – Evento 7: comparação entre valores medidos e simulados pelo GeoWEPP

Data	Medido			Simulado	
	Precipitação (mm)	Escoamento (m ³)	Sedimento (kg)	Escoamento (m ³)	Sedimento (kg)
23/04/12	0	0,0	172,9	1461,1	293,4
24/04/12	1,4	0,0	160,2	1711,1	338,3
25/04/12	9,6	7387,8	445,4	2312,7	590,0
26/04/12	64,6	298905,0	181038,3	58526,6	65745,6
27/04/12	0,4	24901,0	1466,6	4399,3	2080,8
28/04/12	30	45212,6	10187,2	39766,8	49412,7
29/04/12	0	43744,3	2601,5	5206,9	2650,3
30/04/12	0	15769,4	491,6	2886,4	768,3
01/05/12	0	8453,2	303,8	2182,2	392,2
02/05/12	0	4749,4	244,4	1865,0	329,1

Na Figura 40 e na Figura 41 estão as representações gráficas dos resultados

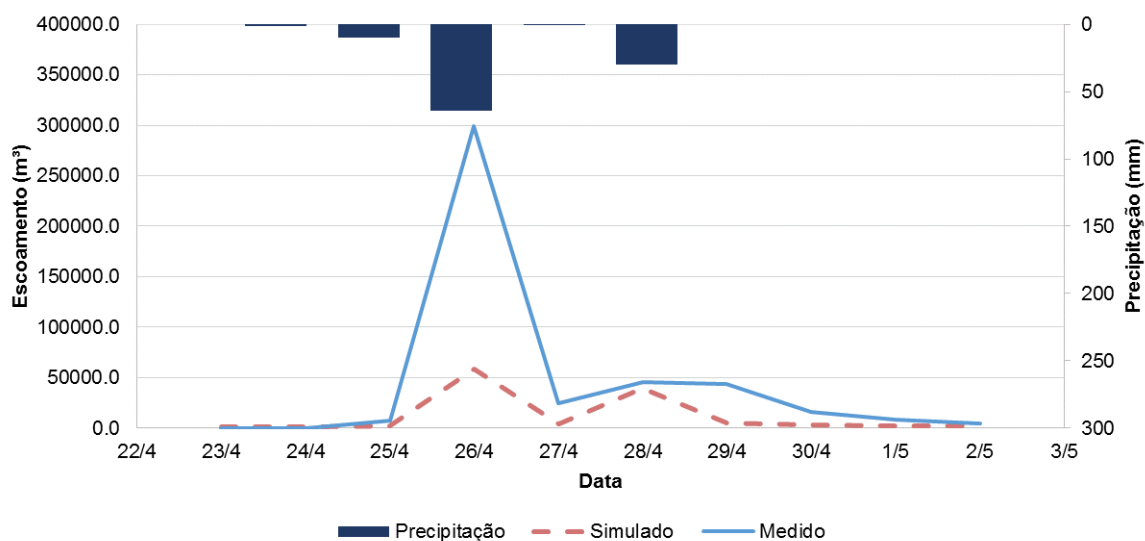


Figura 40 – Evento 7: hidrograma medido e simulado

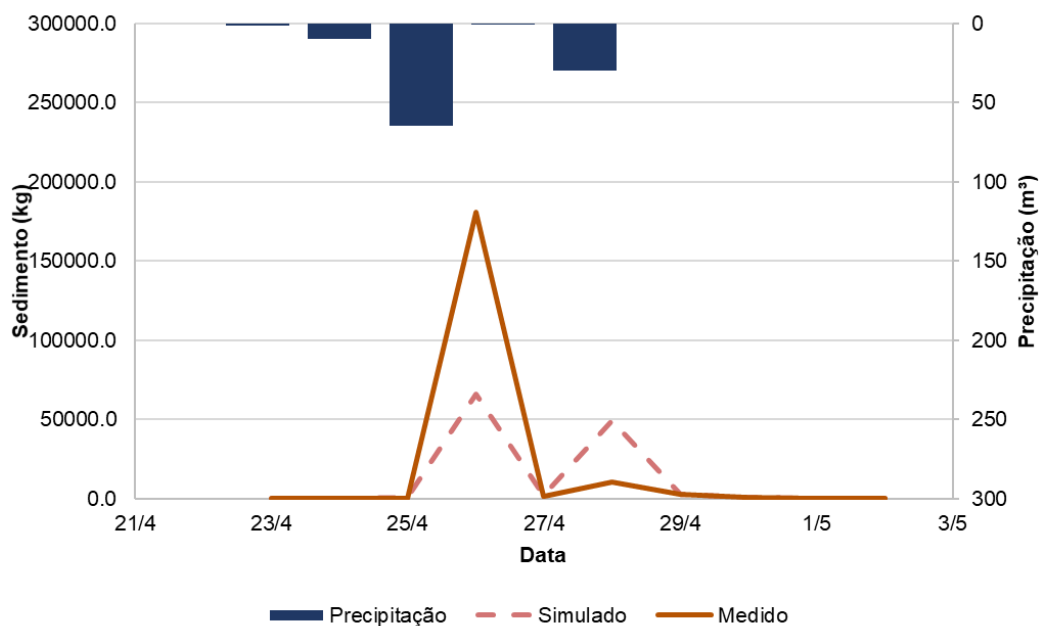


Figura 41 – Evento 7: geração de sedimento medida e simulada

Novamente, a validação se mostrou insatisfatória. A simulação de escoamento e de sedimentos foi subestimada, além de ter sido criado um outro pico de geração de sedimentos. Nota-se que os dados medidos quase não registraram sedimentos para a chuva de 30 mm em um dia (28/04), algo que é atípico. Pode-se desconfiar da consistência dos dados medidos. A performance da simulação comparada com os dados observados está exposta na Tabela 26.

Tabela 26 – Evento 7: métricas e performance da validação de acordo com Moriasi *et al.* (2007)

		Evento 7	Performance
NSE	Escoamento	0,19	Insatisfatório
	Sedimento	0,49	Insatisfatório
PBIAS	Escoamento	73	Insatisfatório
	Sedimento	38	Satisfatório
RSR	Escoamento	0,90	Insatisfatório
	Sedimento	0,72	Insatisfatório

5.2.3 Evento 8

O evento 8, usado para validação, teve nove dias e chuvas relativamente bem distribuídas. O resultado da simulação está na Tabela 27.

Tabela 27 – Evento 8: comparação entre valores medidos e simulados pelo GeoWEPP

Data	Medido			Simulado	
	Precipitação (mm)	Escoamento (m ³)	Sedimento (kg)	Escoamento (m ³)	Sedimento (kg)
17/01/13	0	0,0	192,6	660,4	2,1
18/01/13	9,4	121724,7	114656,6	1443,5	5,0
19/01/13	25,2	92848,9	85632,8	50674,9	45264,6
20/01/13	19,8	44821,8	10582,3	37906,2	29733,8
21/01/13	1	22152,3	1291,1	2274,0	10,0
22/01/13	1,2	12690,9	518,6	1640,4	5,7
23/01/13	2,2	11824,7	433,5	1303,0	4,3
24/01/13	0	8157,1	296,4	711,3	1,9
25/01/13	0	5246,4	245,0	775,4	2,6

A representação gráfica dos resultados está na Figura 42 e na Figura 43.

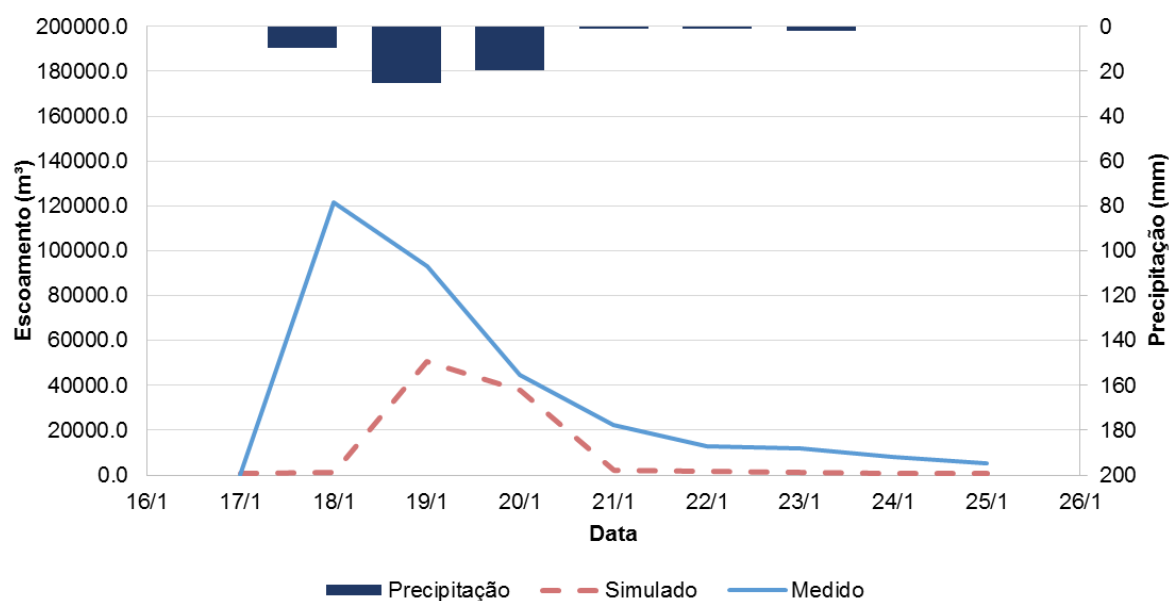


Figura 42 – Evento 8: hidrograma medido e simulado

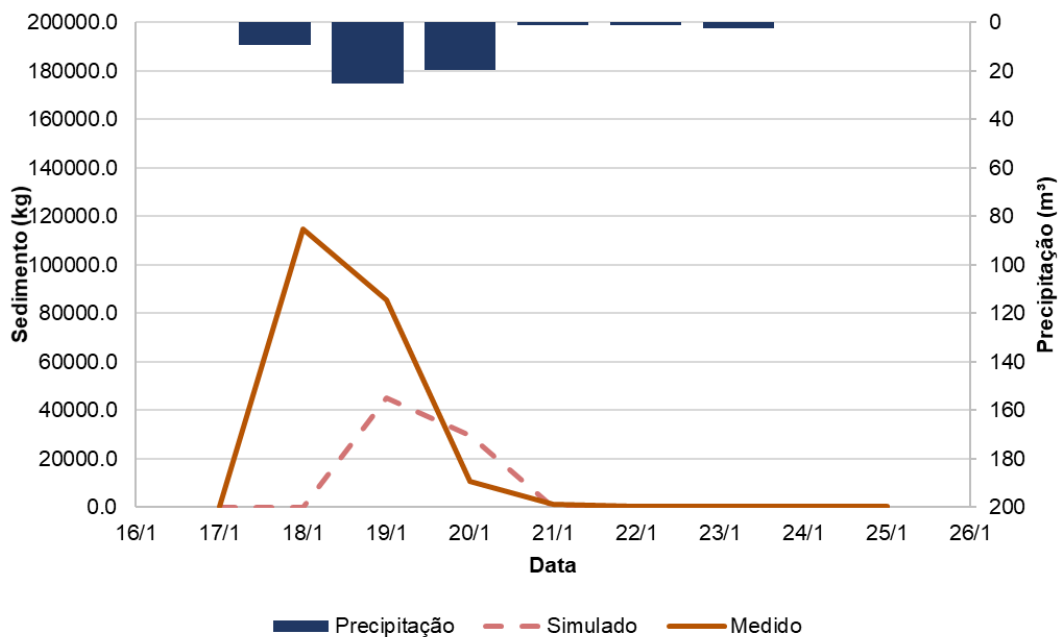


Figura 43 – Evento 8: geração de sedimento medida e simulada

O resultado da validação deste evento se mostrou insatisfatório. Tanto a geração de escoamento quanto a de sedimentos ficaram subestimados e levemente atrasados no tempo. O atraso pode ser devido à resolução temporal dos dados medidos e simulados serem diferentes. Na Tabela 28 é exposta a performance da validação do evento 8.

Tabela 28 – Evento 8: métricas e performance da validação de acordo com Moriasi *et al.* (2007)

		Evento 8	Performance
NSE	Escoamento	-0,13	Insatisfatório
	Sedimento	0,02	Insatisfatório
PBIAS	Escoamento	70	Insatisfatório
	Sedimento	65	Insatisfatório
RSR	Escoamento	1,06	Insatisfatório
	Sedimento	0,99	Insatisfatório

5.2.4 Evento 9

O evento 9 durou onze dias, com uma precipitação de grande intensidade de 73,8 mm em um dia, sendo um dos eventos mais intensos de toda a série histórica de dados. O resultado da simulação está disposto na Tabela 29.

Tabela 29 – Evento 9: comparação entre valores medidos e simulados pelo GeoWEPP

Data	Medido			Simulado	
	Precipitação (mm)	Escoamento (m ³)	Sedimento (kg)	Escoamento (m ³)	Sedimento (kg)
02/05/13	0	0,0	75,3	493,4	1,2
03/05/13	0	2559,2	86,2	471,0	1,1
04/05/13	0	5814,6	99,8	448,9	2,7
05/05/13	73,8	100228,2	29807,0	37763,7	83425,3
06/05/13	0	28986,4	1780,7	3140,8	168,2
07/05/13	0,4	0,0	123,3	2161,3	11,8
08/05/13	0,2	0,0	56,1	1415,4	3,9
09/05/13	0,2	0,0	32,3	1074,1	2,6
10/05/13	0,2	0,0	23,3	769,6	1,6
11/05/13	0	0,0	27,3	375,1	0,6
12/05/13	0	0,0	25,8	459,0	1,0

A representação do hidrograma está na Figura 44 e a representação da geração de sedimento está na Figura 45.

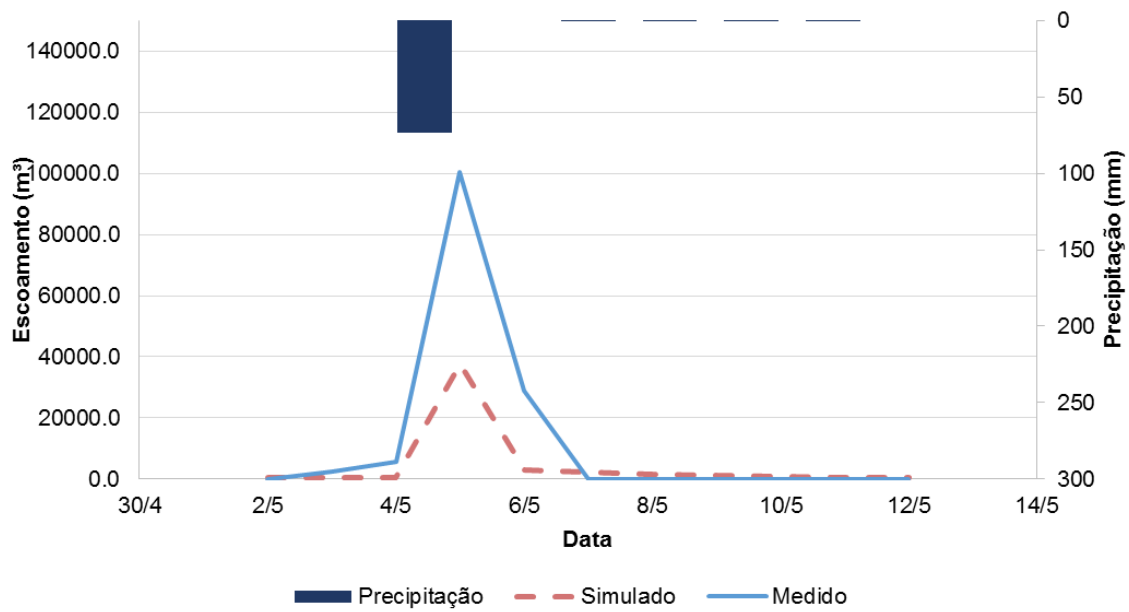


Figura 44 – Evento 9: hidrograma medido e simulado

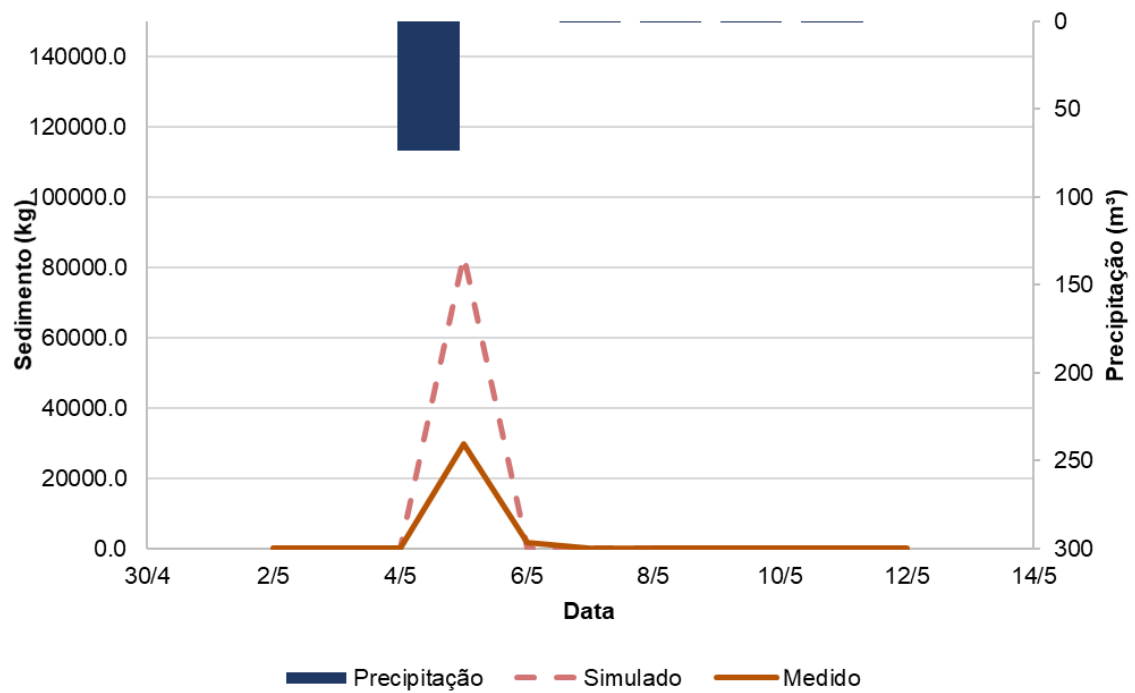


Figura 45 – Evento 9: geração de sedimento medida e simulada

Constata-se que neste evento, a validação não foi satisfatória. Enquanto a geração de escoamento foi subestimada na simulação, a geração de sedimento

foi superestimada. Este comportamento é incomum, pois normalmente escoamentos de volumes muito altos carregam mais sedimentos. A performance do modelo para este evento foi insatisfatória, conforme consta exposta na Tabela 30.

Tabela 30 – Evento 9: métricas e performance da validação de acordo com Moriasi *et al.* (2007)

		Evento 9	Performance
NSE	Escoamento	0,70	Bom
	Sedimento	-1,91	Insatisfatório
PBIAS	Escoamento	65	Insatisfatório
	Sedimento	-160	Insatisfatório
RSR	Escoamento	0,55	Bom
	Sedimento	1,70	Insatisfatório

5.2.5 Análise dos eventos de validação

A análise geral de todos os eventos de validação está na Tabela 31 e na Tabela 32, analisando a performance do modelo para escoamento superficial e para a produção de sedimentos respectivamente.

Tabela 31 – Performance do modelo para cada evento de chuva de validação para escoamento superficial. Em vermelho estão as métricas consideradas insatisfatórias

	Evento	NSE	PBIAS	RSR	Performance
Validação	6	-1,91	94	1,71	Insatisfatório
	7	0,19	73	0,90	Insatisfatório
	8	-0,13	70	1,06	Insatisfatório
	9	0,70	65	0,55	Insatisfatório

Tabela 32 – Performance do modelo para cada evento de chuva de validação para produção de sedimentos. Em vermelho estão as métricas consideradas insatisfatórias

	Evento	NSE	PBIAS	RSR	Performance
Validação	6	-0,14	90	1,07	Insatisfatório
	7	0,49	38	0,72	Insatisfatório
	8	0,02	65	0,99	Insatisfatório
	9	-1,91	-160	1,70	Insatisfatório

5.3 ANÁLISE DAS INCERTEZAS

Analisando todos os resultados expostos anteriormente, conclui-se que calibração se mostrou satisfatória, entretanto a validação, não. Em seguida serão discutidos os prováveis motivos para esta falha na validação dos dados e do uso do GeoWEPP.

5.3.1 Modelo inadequado

O modelo pode não ter representando corretamente os fenômenos hidrossedimentológicos que ocorrem na bacia hidrográfica do rio Cunha. As aproximações feitas das equações físicas para representar os fenômenos naturais podem estar causando erros ou podem não estar representando todos os fenômenos que ocorrem. Ressalta-se que o GeoWEPP simula somente erosão superficial do solo, sem considerar outros fenômenos que produzem sedimentos na bacia do rio Cunha, como escorregamentos e rastejo do solo. Ressalta-se que não houve registro de movimentos de massa no período analisado e, portanto, esta hipótese de fonte de erro pode ser descartada.

Uma hipótese é que o modelo tem um nível de incertezas alto devido a sua alta complexidade na avaliação de fenômenos, conforme já havia sido discutido por Kinnell (2017). Assim, podem se propagar diversos erros, desde erros estruturais do programa até erros nos dados de entrada, como os diversos parâmetros do solo, uso do solo e o histórico da chuva.

Flanagan *et al.* (2012) recomendaram usar o modelo GeoWEPP para bacias de até 260 hectares, pois acima desta área ocorrem outros fenômenos que o modelo não foi programado para considerar. A medida que a área de uma bacia aumenta e passa a ter rios perenes, há a geração de sedimentos por causa do próprio rio que escava suas laterais. O GeoWEPP não considera este tipo de produção de sedimento. Sendo assim, esta lacuna do GeoWEPP ocorre principalmente na representação de geração de sedimentos em um exutório. A bacia do rio Cunha tem aproximadamente 1700 hectares e, portanto, o GeoWEPP pode não ter considerado todos os processos físicos adequadamente.

A determinação do comprimento do rio e da densidade de drenagem pelo GeoWEPP pode ter influenciado consideravelmente nos resultados. Quanto mais a densidade de drenagem, mais rapidamente a água e os sedimentos são escoados na bacia, gerando picos maiores.

Notou-se uma limitação do GeoWEPP, que forçou a desconsideração de um evento de calibração: a resolução temporal da análise. O evento 4 obteve resultados insatisfatórios provavelmente devido ao pico no hidrograma defasado em um dia. Enquanto os dados observados têm resolução de 10 minutos, o GeoWEPP analisa a geração de escoamento e sedimentos diariamente. A bacia do rio Cunha é pequena e o seu tempo de resposta a um evento de chuva é de poucas horas, em torno de uma a três horas. Assim, para calibrar os eventos de chuva, o ideal seria o GeoWEPP considerar eventos de chuva com resolução maior, no mínimo horária.

Além disso, na série de dados medidos, observa-se, ocasionalmente, que ocorre mais de um evento de chuva em um mesmo dia. Ressalta-se que, em geral, as simulações têm resultados piores para tempos mais curtos (MORIASI *et al.*, 2007). Ou seja, resultados diários costumam ser piores do que mensais.

5.3.2 Calibração do modelo inadequada

O resultado da calibração do modelo gerou um conjunto de parâmetros que se mostrou inadequado para a validação e isto pode ter acontecido por diferentes motivos.

Um motivo é que houve uma má separação de eventos de calibração e de validação, gerando condições diferentes para o período de calibração comparado ao de validação. Como a série de dados disponíveis era curta, não houve grande possibilidade de escolha entre os eventos.

Constatou-se que diminuir a condutividade hidráulica do solo nos eventos de validação poderia gerar boas métricas para o hidrograma, pois a maioria dos eventos de validação ficaram com os valores de escoamento subestimados. Isto mostra que seria necessário ter mais eventos para encontrar uma melhor representatividade hidrológica e pedológica. A melhor representatividade de eventos alcançaria uma melhor média para os parâmetros de validação. Como alternativa a este contratempo, poderia ter sido escolhido uma outra forma de determinar esses parâmetros a serem usados na validação. Verificou-se que a mediana e moda dos valores ainda não seriam satisfatórios.

Outro motivo que pode ter implicado uma calibração inadequada foi a escolha dos parâmetros a serem calibrados, assim como a determinação de quais parâmetros não modificar. Usualmente, modifica-se a condutividade hidráulica para modificar o valor de escoamento por ser um parâmetro sensível, conforme foi feito. Entretanto, os valores calibrados da condutividade hidráulica modificaram consideravelmente entre eventos. Isso pode indicar que os outros parâmetros estão fixos devem estar variando consideravelmente e, assim, houve uma concentração dos efeitos de outros parâmetros em somente um parâmetro. Esta escolha de modificar somente a condutividade hidráulica pode ter facilitado a calibração do escoamento dos eventos, mas impossibilitou a validação.

Para geração de sedimentos, escolheu-se manter fixos os parâmetros erodibilidade entressulcos e tensão de cisalhamento crítica e modificar somente a erodibilidade nos sulcos, sendo que poderia ter sido feito o oposto (FLANAGAN *et al.*, 2012) ou mais parâmetros poderiam ser calibrados. Além disso, a medição dos

dados de uso do solo que permaneceram com os valores padronizados sugeridos pelo próprio GeoWEPP poderia ter contribuído para uma melhor calibração.

Além destas questões, há a incerteza causada por causa da determinação do escoamento de base para cada evento. O método utilizado foi o filtro de Chapman, que faz uma notável simplificação do que ocorre na realidade. Como o GeoWEPP não contabiliza o escoamento de base, esta correção obrigatoriamente teve de ser feita. Entretanto, observou-se que escolhas, de certa forma subjetivas, como quais os dias de começo e de término do evento a ser analisado no hidrograma, modificavam consideravelmente os valores do escoamento de base e, conseqüentemente, o volume escoado e de massa de sedimento gerado que foram comparados com os resultados do GeoWEPP.

5.3.3 Imprecisão nos dados medidos e de entrada

Há grandes indícios que o período de 11/04/2012 a 23/04/2012 da série de dados de vazão foi superestimada devido à uma interferência na leitura do sensor de nível. Goerl (2014) decidiu não utilizar os dados desde o início da medição até esta interferência. Na análise do presente trabalho, isto não foi feito. Assim, o evento 6 não obteve uma validação aceitável. O evento 1, que obteve uma calibração satisfatória, também pode ter sido influenciado por esta interferência.

Uma possibilidade que implicou em resultados insatisfatórios foi a simplificação no cálculo da duração da chuva, parâmetro em que o GeoWEPP é bastante sensível (NEARING *et al.*, 1990). A duração da chuva foi considerada como o somatório do tempo no qual a estação identificou chuva. Assim, se houve uma pausa de 30 minutos na chuva, estes minutos não foram contabilizados. Neste sentido, a duração da chuva desta análise foi subestimada, aumentando a intensidade da chuva e, conseqüentemente, o volume escoado e a geração de sedimentos. Por outro lado, houve dificuldade em determinar qual foi a duração da chuva quando houve mais de um evento de chuva no mesmo dia. Com esta perspectiva, pode ser que a duração da chuva tenha sido superestimada. Concluindo, estas incertezas na determinação da duração da chuva influenciaram

bastante o resultado obtido, já que este é um dos parâmetros mais sensíveis do GeoWEPP.

Outra discussão interessante é que, devido à grande diferença de altitude na bacia do rio Cunha, ocorrem chuvas orográficas na região. A estação pluviométrica onde os dados foram medidos localiza-se no centro urbano da cidade de Rio dos Cedros, na planície do rio dos Cedros. Assim, a estação pluviométrica pode não captar as chuvas orográficas que ocorrem na bacia do rio Cunha. Isto fica evidenciado pelo registro do aumento do nível e da turbidez na bacia do rio Cunha sem que tenha sido registrado ocorrência de precipitação na estação.

Por fim, deve-se ressaltar que a curva-chave cota *versus* vazão e a curva turbidez *versus* sólidos suspensos foram ajustadas com medições em épocas de relativamente baixas vazões do rio. Os eventos de chuva escolhidos para calibração e validação têm a tendência de ter alta vazão e, portanto, os valores medidos utilizaram a região de extrapolação dessas curvas. Assim, a medição de vazão e de sólidos suspensos dos eventos escolhidos tem incertezas associadas à extrapolação dessas curvas.

5.3.4 Falta de dados de entrada

A série de dados medidos na bacia do rio Cunha tem diversas falhas nos valores de precipitação, vazão e sólidos suspensos. Para agravar ainda mais o problema, se tinham disponíveis apenas os dados de uma série histórica de um ano e meio. Moriasi *et al.* (2007) expuseram que para fazer uma correta calibração, a série de dados deve ter entre 3 e 5 anos, no mínimo, a fim de considerar anos mais secos e mais úmidos, contemplando diferentes eventos hidrológicos. Já Flanagan *et al.* (2012) expuseram que idealmente a série de dados deveria ser muito mais longa, 10 a 20 anos, para garantir uma boa calibração.

Outros dados de entrada sobre solo e tipo de solo poderiam contribuir para uma boa calibração. Análises de erodibilidade dos solos, tensão de cisalhamento

crítica, entre outros parâmetros, poderiam contribuir para uma calibração e validação adequadas.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O GeoWEPP não obteve um funcionamento adequado na área da bacia hidrográfica rio Cunha. Apesar de a calibração ter se mostrado satisfatória, a validação não teve resultados similares. Entretanto, pode-se modificar diversos fatores de incerteza conforme discutidos neste trabalho a fim de tornar o GeoWEPP satisfatório.

Retirando as falhas do período de dados de um ano e meio (18/01/2012 a 09/07/2013), foram escolhidos 5 eventos para calibração e 4 eventos para validação. Os eventos 2, 3 e 5 apresentaram boa calibração. O evento 1 apresentou calibração satisfatória. O evento 4 não pôde ser calibrado devido à resolução temporal diária do GeoWEPP, implicando um deslocamento do pico do hidrograma em um dia. Os eventos 6, 7, 8 e 9 apresentaram validações insatisfatórias. Notou-se que o evento 6 obteve a pior validação devido a erro nos dados medidos e supõe-se que este erro também interferiu na calibração do evento 1. O resumo da análise dos eventos encontra-se exposto na Tabela 33.

Tabela 33 – Resumo da análise dos eventos de calibração e validação

	Evento	Performance	Observação
Calibração	1	Satisfatório	Provável erro de medição do sensor de nível
	2	Muito bom	Baixo desempenho na recessão e em vazões baixas
	3	Muito bom	Baixo desempenho na ascensão e na recessão-
	4	Insatisfatório	Defasagem no pico da chuva devido à resolução temporal do GeoWEPP
	5	Bom	Baixo desempenho na recessão e em vazões baixas
Validação	6	Insatisfatório	Provável erro de medição do sensor de nível
	7	Insatisfatório	Escoamento e sedimentos subestimados
	8	Insatisfatório	Escoamento e sedimentos subestimados
	9	Insatisfatório	Escoamento subestimado e sedimentos superestimado

Além destas adversidades notadas durante os processos de calibração e de validação, outras hipóteses de geração de incertezas foram levantadas: (1) o modelo pode estar representando erroneamente os fenômenos que geram produção de sedimentos na bacia devido ao tamanho elevado da área de estudo; (2) a série temporal de dados deveria ser mais longa para considerar mais eventos que sejam representativos de diferentes fenômenos hidrológicos; (3) a simplificação na determinação do escoamento de base causa erros consideráveis na magnitude do volume de escoamento e na massa de sedimentos; (4) a estação pluviométrica pode não ter sido atingida por chuvas orográficas da cabeceira do rio Cunha; (5) a simplificação na determinação da duração dos eventos de chuva, um dos parâmetros mais sensíveis do GeoWEPP.

As incertezas de todas estas situações podem ter se somado e resultaram em uma validação insatisfatória. Para usos futuros do GeoWEPP, recomenda-se a análise e a quantificação de outros fenômenos que geram a produção de sedimentos, principalmente em rios perenes. Pode-se fazer uma análise de como o comprimento do rio principal e a densidade de drenagem na bacia determinados pelo GeoWEPP modifica o resultado de geração de sedimentos. Recomenda-se uma determinação menos sintetizada da duração da chuva e uma verificação se a determinação do escoamento de base está adequada. Idealmente, o GeoWEPP deveria ser utilizado para locais com uma série de dados maior, minimamente de 3 a 5 anos. A série de dados medidos deve ser consistida, a fim de corrigir suas falhas. Devem ser feitos mais trabalhos de campo para determinar mais propriedades geotécnicas do solo que ocorrem na área de estudo, além de analisar e determinar se a erosão ocorre mais nos sulcos ou entressulcos, a fim de modificar o parâmetro correto na calibração. Recomenda-se também utilizar mais parâmetros para a calibração. Outra possibilidade é determinar os valores dos parâmetros para a validação de outra forma, descartando o uso da média. Os dados de pluviosidade devem ser medidos na própria área de estudo, notadamente quando há diferença de cota, para minimizar os efeitos de chuvas orogênicas.

Estas sugestões devem melhorar o resultado da calibração e validação do modelo. Assim, ainda pode ser possível o uso do modelo para analisar a produção de sedimentos na bacia com o objetivo de realizar prognósticos de melhor uso do solo no futuro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEDEIJ, J. & ESEN, I. Modified Green-Ampt Infiltration Model for Steady Rainfall. **J. Hydrol. Eng**, v.19, n.9. 2013.

AMORIM, R.S.S.; SILVA, D.D.; PRUSKI, F.F.; MATOS, A.T. Avaliação do Desempenho dos Modelos de Predição da Erosão Hídrica USLE, RUSLE e WEPP para Diferentes Condições Edafoclimáticas do Brasil. **Eng. Agríc.**, Jaboricabal, v.30, n.6, p.1046-1049, 2010.

ANGSTRÖM, A. Solar and atmospheric radiation. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 50, p. 121-126, 1924.

ARAGÃO, R.; CRUZ, M.A.; AMORIM, J.R.A.; MENDONÇA, L.C.; FIGUEIREDO, E.E.; SRINIVASAN, V.S. Modelo SWAT e Simulação dos Processos Hidrossedimentológicos em uma Bacia no Agreste Nordestino. **R. Bras. Ci. Solo**, v.37, p.1091-1102, 2013.

AUGUSTO FILHO, O. Caracterização Geológica-geotécnica voltada à Estabilização de Encostas: Uma proposta Metodológica. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS, 1, 1992, Rio de Janeiro. **Anais**. Rio de Janeiro: ABMS-ABGE-ISSMGE, 1992, v. 2, p.721-733.

BACCHI, O.O.S.; REICHARD, K.; SPAROVEK, G.; RANIERI, S.B.L. Soil erosion evaluation in a small watershed in Brazil through ¹³⁷Cs fallout redistribution analysis and conventional models. **Acta Geologica Hispanica**, v.35, n.3-4, p. 251-259, 2000.

BARRETO, A.G.O.P.; BARROS, M.G.E.; SPAROVEK, G. Bibliometria, história e geografia da pesquisa brasileira em erosão acelerada do solo. **R. Bras. Ci. Solo**, v.32, p. 2443-2460, 2008.

BATHURST, J.C.; MORETTI, G.; EL-HAMES, A.; MOAVEN-HASHEMI, A.; BURTON, A. Scenario modelling of basin-scale, shallow landslide sediment yield, Valsassina, Italian Southern Alps. **Nat. Hazards Earth Syst. Sci.**, v. 5, n. 2, p. 189-202, 2005.

BIZZI, L.A.; SCHOBENHAUS, C.; VIDOTTI, R.M.; GONÇALVES, J.H. **Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil**: texto, mapas & SIG. Brasília: CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 2003. 692 p.

BLASCHKE, P. M.; TRUSTRUM, N. A.; HICKS, D. L. Impacts of mass movement erosion on land productivity: a review. **Progress in Physical Geography**, v. 24, n. 1. p. 21-52. 2000.

BORDAS, M.P. & SEMMELMAN, F.R. Elementos de Engenharia de Sedimentos. In: TUCCI, C.E.M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. Porto Alegre: Ed. UFRGS/ABRH, 2012. p. 915-943.

BORTOLOTTI, N.L. **Avaliação Hidrossedimentológica da Bacia do Rio Cunha, Município de Rio dos Cedros, Santa Catarina com o Modelo SWAT**. Trabalho de conclusão (Graduação) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2011.

BURTON, A.; BATHURST, J. C. Physically based modelling of shallow landslide sediment yield at a catchment scale. **Environmental Geology**, Newcastle. v. 35, n. 2-3, p. 89-99, 1998.

CARDOSO, A. T.; KOBAYAMA, M.; GRISON, F. Problemas na estimativa de sólidos em suspensão associados à elaboração da curva-chave para sensor de turbidez. In: POLETO, C.; PLETSCHE, A. L.; MELLO, E. E.; CARVALHO, N. O. (orgs) **X ENES Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos**: artigos selecionados. Porto Alegre: ABRH, 2012. P. 58-68.

CARNEIRO, C.D.R.; GONÇALVES, P.W.; LOPES, O.R. O Ciclo das Rochas na Natureza. **Terra Didática**, v. 5, n.1, p. 50-62. 2009.

CARVALHO, N.O.; FILIZOLA JUNIOR, N.P.; SANTOS, P.M.C.; LIMA, J.E.F.W. **Guia de Práticas Sedimentométricas**. Brasília: ANEEL. 2000. 154p.

CARVALHO, N.O. **Hidrossedimentologia Prática**. 2ª ed. Rio de Janeiro, RJ: Editora Interciência, 2008. 599p.

CECÍLIO, R.A.; RODRIGUEZ, R.G.; BAENA, L.G.N.; OLIVEIRA, F.G.; PRUSKI, F.F. Aplicação dos Modelos RUSLE e WEPP para a Estimativa da Erosão Hídrica em Microbacia Hidrográfica de Viçosa (MG). **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável Grupo Verde de Agricultura Alternativa**, Mossoró. v.4, n.2, p.39-45, 2009.

CHAVES, H.M.L.; NEARING, M. Uncertainty analysis of the WEPP soil erosion model. **Trans. ASABE**, v. 34, n.6, p. 2437-2444, 1991.

COLLISCHONN W.; DORNELLES, F. **Hidrologia: para engenharia e ciências ambientais**. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH), 2013. 336p.

DALBIANCO, L. **Simulação Hidrossedimentológica com o Modelo LISEM em uma Pequena Bacia Hidrográfica Rural**. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2013.

DE MARIA, I.C.; CHAVES, M.O.; DECHEN, S.C.F. Comparação dos resultados do modelo WEPP com os obtidos em condições de chuva natural, durante sete anos, em um latossolo vermelho distroférico típico em Campinas, SP. In: VII Simpósio Nacional de Controle de Erosão, 2001, Goiânia, **Anais**. Goiânia: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 2001. v. 1, p. 1-9.

FAO. **Status of the World's Soil Resources (SWSR)** – Main Report., Rome: ONU – FAO & ITPS, 2015. 608 p.

FILL, H.D.; SANTOS, I. Estimativa da concentração de sedimentos em suspensão através da profundidade Sechi. In: XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos e V Simpósio de Hidráulica de Recursos Hídricos de Língua Oficial Portuguesa. **Anais**. Porto Alegre: ABRH, 2001. p.1-9.

FLANAGAN, D.C.; ASCOUGH II, J.C.; NICKS, A.D.; NEARING, M.A.; LAFLEN, J.M. Overview of the WEPP Erosion Prediction Model. In: **USDA. Water Erosion Prediction Project – WEPP**. West Laffayette: USDA-ARS-MWA-SWCS, cap. 1, p.1.1-1.12. 1995. (Technical documentation, NSERL Report no. 10)

FLANAGAN, D.C.; FRANKENBERGER, J.R.; ASCOUGH, J.C. WEPP: Model use, calibration, and validation. **Trans. ASABE**. v. 55, n. 4, p. 1463–1477. 2012.

FLANAGAN, D.C.; GILLEY, J.E.; FRANTI, T.G. Water Erosion Prediction Project (WEPP): Development History, Model Capabilities, and Future Enhancements. **Trans. ASABE**, v. 50 n. 5, p. 1603-1612. 2007.

FLANAGAN, D.C.; LIVINGSTON, S.J. **WEPP User Summary**. West Laffayette: USDA-ARS-MWA-SWCS, 1995.

FOSTER, G.R.; FLANAGAN, M.A.; NEARING, L.J.; LANE, L.J.; RISSE, L.M.; FINKNER, S.C. Hillslope erosion component. In: **USDA. Water erosion prediction project – WEPP**. West Laffayette: USDA-ARS-MWA-SWCS, 1995. cap. 11, p.11.1-11.12 (Technical documentation. NSERL. Report no. 10).

FUJITA, M.; YAMANOI, K.; IZUMIYAMA, H. A combined model of sediment production, supply and transport. **IAHS Publication**, v. 367, p. 357-365, 2015.

GALHARTE, C.A.; VILLELA, J.M.; CRESTANA, S. Estimativa da produção de sedimentos em função da mudança de uso e cobertura do solo. **R Bras Eng Agric Ambiental**, Campina Grande, v.18, n.2, p.194-201, 2014.

GLOVER, J.; MCCULLOCH, J.S.G. The empirical relation between solar radiation and hours of sunshine. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 84, p. 172-175, 1958.

GOERL, R.F. **Evolução da paisagem e conectividade hidrogeomorfológica na bacia do rio Cunha.- SC**. 2014. 142 f. Tese (Doutorado). - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Curitiba, 2014.

GOMES, N.M.; MELLO, C.R.; SILVA, A.M.; BESKOW, S. Aplicabilidade do LISEM (Limburg Soil Erosion) para Simulação Hidrológica em uma Bacia Hidrográfica Tropical. **R. Bras. Ci. Solo**, v.32, p.2483-2492, 2008.

GONÇALVES, F.A. **Validação do Modelo WEPP na Predição de Erosão Hídrica para Condição Edafoclimática da Região de Viçosa-MG**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2007.

GUERRA, A.J.T. Experimentos e Monitoramentos em Erosão dos Solos. **Revista do Departamento de Geografia (USP)**, v. 16, p. 32-37, 2005.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Ferramenta Cidades**. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sc/rio-dos-cedros/panorama>>. Acesso em outubro de 2017.

IBGE. **Manual Técnico da Vegetação Brasileira**. 2ª ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2012. 271p.

KINNELL, P.I.A. A comparison of the abilities of the USLE-M, RUSLE2 and WEPP to model event erosion from bare fallow areas. **Science of the Total Environment**, v. 596–597, p. 32–42. 2017.

KOBIYAMA, M.; GOERL, R.F.; CORREA, G.P.; MICHEL, G.P. Debris flow occurrences in Rio dos Cedros, Southern Brazil: meteorological and geomorphic aspects. In: WRACHIEN, D.; BREBBIA, C.A. (Orgs.) **Monitoring, Simulation, Prevention and Remediation of Dense Debris Flows III**. Southampton: WITpress, 2010. p.77-88.

KOBIYAMA, M.; MOTA, A.A.; GRISON, F.; GIGLIO, J.N. Landslide influence on turbidity and total solids in Cubatão do Norte River, Santa Catarina, Brazil. **Natural Hazards**, v.59, n.2, p.1077-1086, 2011.

LANE, L.J. & NEARING, M.A. **USDA – Water Erosion Prediction Project: Hillslope Profile Model Documentation**. Indiana: NSERL. USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory, 1989. Report no. 2

LELIS, T.A. **Modelagem do Escoamento Superficial e Perda de Solo na Bacia do Ribeirão São Bartolomeu, Zona da Mata de Minas Gerais, utilizando o simulador SWAT**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2011.

MEIN, R.G. & LARSON, C.L. Modeling Infiltration during a steady rain. **Water Resources Research**, Washington, v.9, p. 384-394, 1973.

MICHEL, G. P. **Estudo de escorregamentos na Bacia do Rio Cunha, Rio dos Cedros/SC, com os modelos SHALSTAB e SINMAP**. 2011. 84 f. Trabalho de conclusão (Graduação) - UFSC/CTC/ENS, Florianópolis, 2011.

MICHEL, G. P. **Modelagem de estabilidade de encostas com consideração do efeito da vegetação**. 2013. 152 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. Florianópolis, 2013.

MITASOVA, H. & MITAS, L. **Modeling Soil Detachment with RUSLE 3D Using GIS**. University of Illinois at Urbana-Champaign. 1999. Disponível em: <<http://www4.ncsu.edu/~hmitaso/gmslab/denix/usle.html>>. Acesso em: jan 2018

MOORE, I.D.; BURCH, G.J. Physical basis of the length-slope factor in the Universal Soil Loss Equation. **Soil Science Society of America Journal**, v. 50, p. 1294-1298, 1986.

MORAES, I.C. **Avaliação dos Modelos de Predição de Erosão Hídrica MEUPS e WEPP: contribuição em bacias hidrográficas**. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Rio Claro, 2016.

MORIASI, D.N; ARNOLD, J.G.; VAN LIEW M.W.; BINGNER, R.L.; HARMEL R.D.; VEITH, T.L. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. **Trans. ASABE**, v. 50, n. 3, p. 885–900. 2007.

NEARING, M.A.; ASCOUGH, L.D.; LAFLEN, J.M. Sensitivity Analysis of the WEPP Hillslope Profile Erosion Model. **Trans. of ASABE**. v.33, n.3, p. 839-849. 1990.

NICKS, A.D.; LANE, L.J.; GANDER, G.A. Weather Generation. In: **USDA. Water Erosion Prediction Project – WEPP**. West Laffayette: USDA-ARS-MWA-SWCS, cap. 2, p 2.1-2.20. 1995. (Technical documentation, NSERL Report no. 10)

OLIVEIRA, F.P. **Modelagem de Escoamento Superficial e da Erosão Hídrica em Bacia Rural em Arvorezinha, RS, Utilizando WEPP**. Tese (Doutorado), Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, UFRGS, Porto Alegre, 2010.

OLIVEIRA, H.; MORTATTI, J.; MORAES, G.M.; VENDRAMINI, D.; CAMPOS, K.B.G. Caracterização físico-química da carga dissolvida dos rios Jundiá e Capivari. **Geochimica Brasiliensis**, São Paulo, v. 28, n. 1, p. 23-35, 2014.

PIMENTEL, D.; HARVEY, C.; RESOSUDARMO, P; SINCLAIR, K.; KURZ, D.; MCNAIR, M.; CRIST, S.; SHPRITZ, L.; FITTON, L.; SAFFOURI, R.; BLAIR, R. 1995. Environmental and Economic Costs of Soil Erosion and Conservation Benefits. **Science, New Series**, Ithaca, v. 267, n. 5201, p. 1117-1123, fev. 1995.

PINTO, D.B.F. **Aplicação do modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) na simulação hidrossedimentológica em bacia hidrográfica da Serra da Mantiqueira, MG**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.

POTTER, R.O., CARVALHO, A.P., FLORES, C.A.; BOGNOLA, I. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento: Solos do Estado de Santa Catarina**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2004. v. 46, p. 721.

PRESCOTT, J.A. Evaporation from a water surface in relation to solar radiation. **Transactions of the Royal Society of South Australia**, v. 64, p. 114-480, 1940.

RENARD, K.G.; FOSTER, G.R.; WEESIES, G.A.; PORTER, J.P. RUSLE: Revised Universal Soil Loss. **Journal of Soil and Water Conservation**, v.46, n.1, p 30-33. 1991.

RODRIGUES, E.L.; ELMIRO, M.A.T.; JACOBI, C.M.; LAMOUNIER, W.L. Aplicação do modelo SWAT na avaliação do consumo de água em áreas de florestas plantadas na bacia do Rio Pará, Alto São Francisco, em Minas Gerais. **Soc. & Nat.**, Uberlândia, v.27, n.3, p.485-500, 2015.

RODRIGUES, M.F.; REICHERT J.M.; MINELLA, J.P.G. Hydrossedimentology of nested subtropical watersheds with native and eucalyptus forests. **Journal of Soils and Sediments**, v.4 n.7, p.1311-1324, 2014.

SANTOS, I.S.; FILL, H.D.; SUGAI, M.R.B.; BUBA, H.; KISHI, R.T.; MARONE, E.; LAUTERT, L.F. **Hidrometria Aplicada**, v.1. Curitiba: LATEC, 2001. 372p.

SARI, V.; PEREIRA, M.A.; CASTRO, N.M.R.; KOBIYAMA, M. Efeitos do tamanho da partícula e da concentração de sedimentos suspensos sobre a turbidez. **Eng Sanit Ambient**, v.22, n.2, p.213-219. 2017.

SEBRAE. **Santa Catarina em Números**: Rio dos Cedros. Florianópolis: SEBRAE/SC. 2013. 131p.

SILVA, A.M.; SCHULZ, H.E. Redução do desprendimento das partículas do solo mediante uso de resíduos vegetais de origem urbana. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.6, n.3, p.531-534, 2002.

SILVA, A.M.; SCHULZ, H.E.; CAMARGO, P.B. **Erosão e Hidrossedimentologia em Bacias Hidrográficas**. 2ª ed. São Carlos: RIMA, 2007. 153p.

SILVA, F.G.B.; MINOTI, R.T.; PRIMAVESI, O.; ANGELOTTI NETO, A.; CRESTENA, S. Aplicação preliminar do modelo WEPP para determinação da perda de solo por erosão e parâmetros hidrológicos na bacia do Ribeirão dos Negros - São Carlos, SP. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 15., 2004, Santa Maria. **Anais**. Santa Maria: UFSM, 2004.

SILVA, F.V. **Mapeamento das áreas de inundação na zona urbana do município Rio dos Cedros (SC) por meio dos modelos HEC-RAS**. Trabalho de conclusão (Graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina. Centro Tecnológico. Engenharia Sanitária e Ambiental. Florianópolis. 2013.

SPAROVEK, G.; BACCHI, O.O.S.; SCHNUG, E.; RANIERI, S.B.L.; DE MARIA, I.C. Comparison of three water erosion prediction methods (¹³⁷Cs, WEPP, USLE) in South-East Brazilian sugarcane production. **Tropenwirtschaft**, v.101, n.2, p. 107-108, 2000.

STONE, J.L.; LANE, L.J.; SHIRLEY, E.D.; HERNANDEZ, M. Hillslope surface hydrology. In: **USDA. Water erosion prediction project – WEPP**. West Lafayette: USDA-ARS-MWA-SWCS, 1995. cap. 4, p.4.1-4.20 (Technical documentation. NSERL. Report no. 10).

TUCCI, C.E.M. **Modelos Hidrológicos**. 2ª ed. Porto Alegre: Ed. UFRGS/ABRH. 2005. 678p.

TUNDISI, J. G. The exploitation of the hydroelectric potential of the Amazon Region. **Estudos Avançados**, São Carlos. v. 21, n. 59, p. 109-117. 2007.

UCHIDA, T.; OKAMOTO, A.; HAYASHI, S.; SUZUKI, T.; FUKUMOTO, A.; YAMASHITA, S.; TAGATA, S. Hydrophone observations of bedload transport in mountainous rivers of Japan. In: FUKUOKA et al. **Advances in River Sediment Research**. London: Taylor & Francis Group. 2013. p.1749-1756.

VIANA, J. H. M.; COSTA, A. M. **A ciência do solo como instrumento para a recuperação das áreas afetadas pelo desastre de Mariana e dos solos na Bacia do Rio Doce**. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2016, v. 42, n. 1, p. 24-27.

WILLIAMS, J.R. Sediment-yield Prediction with Universal Equation Using Runoff Energy Factor. In: **Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yield and Sources**. Publication ARS-S-40. US Department of Agriculture: Washington, DC. 1975.

WISCHMEIER, W.H.; SMITH, D.D. **Predicting Soil Erosion Losses: A Guide do Conservation Planning**. USDA Agricultural Handbook no. 537, 58 pp. 1978.

APÊNDICE A – Separação de escoamentos de cada evento

As figuras 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54 e 55 a seguir demonstram a separação do escoamento superficial e de base de cada evento de precipitação. Esta separação teve que ser feita a fim de comparar os resultados do GeoWEPP somente com o escoamento superficial.

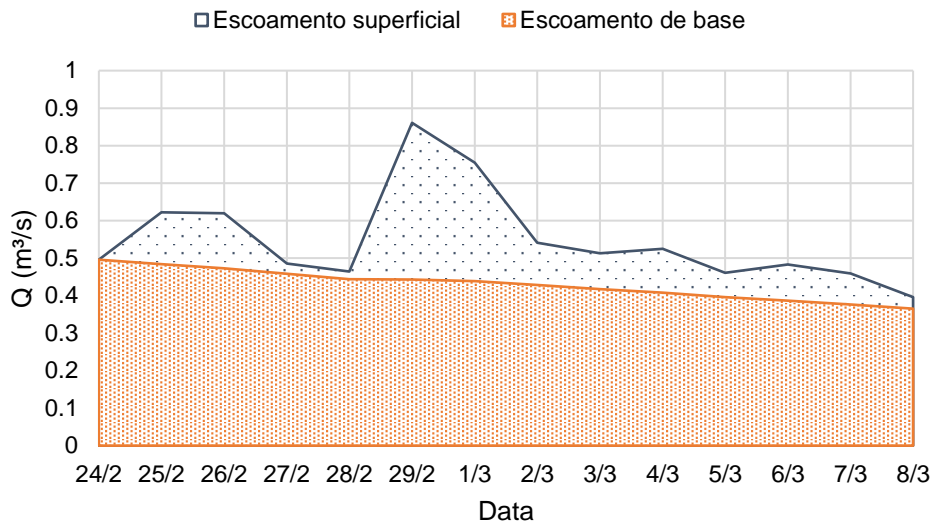


Figura 46 – Separação de escoamentos para o evento 1

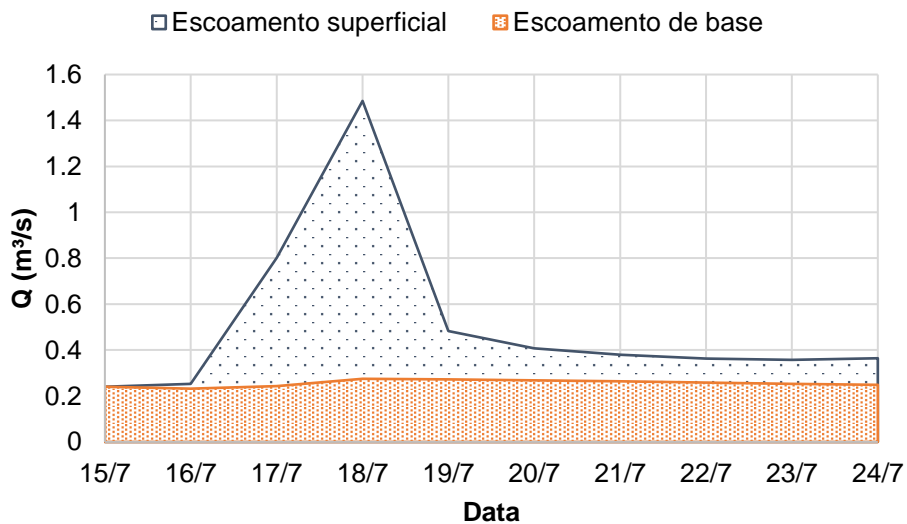


Figura 47 – Separação de escoamentos para o evento 2

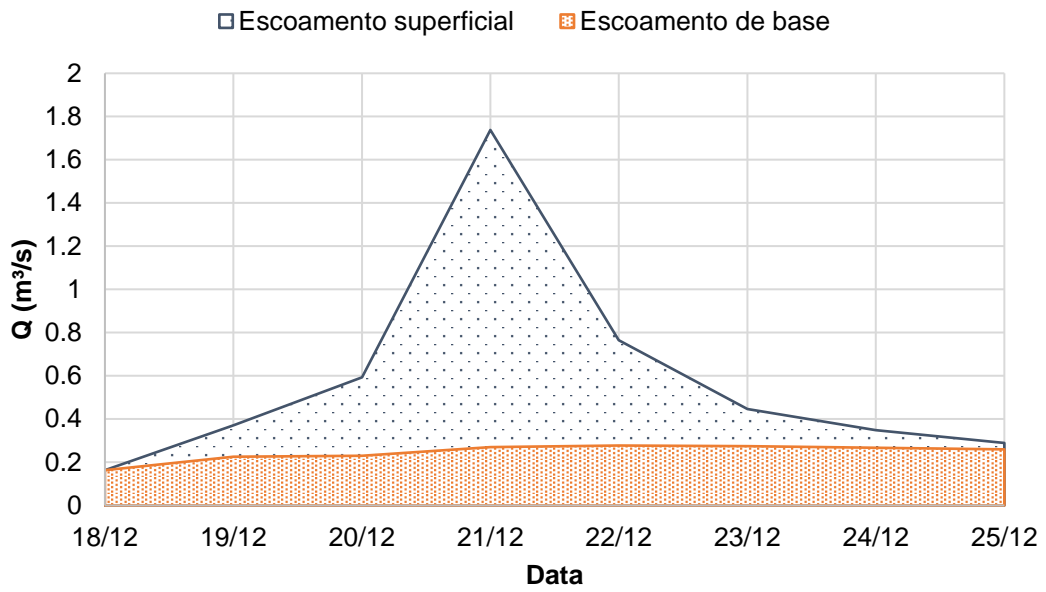


Figura 48 – Separação de escoamentos para o evento 3

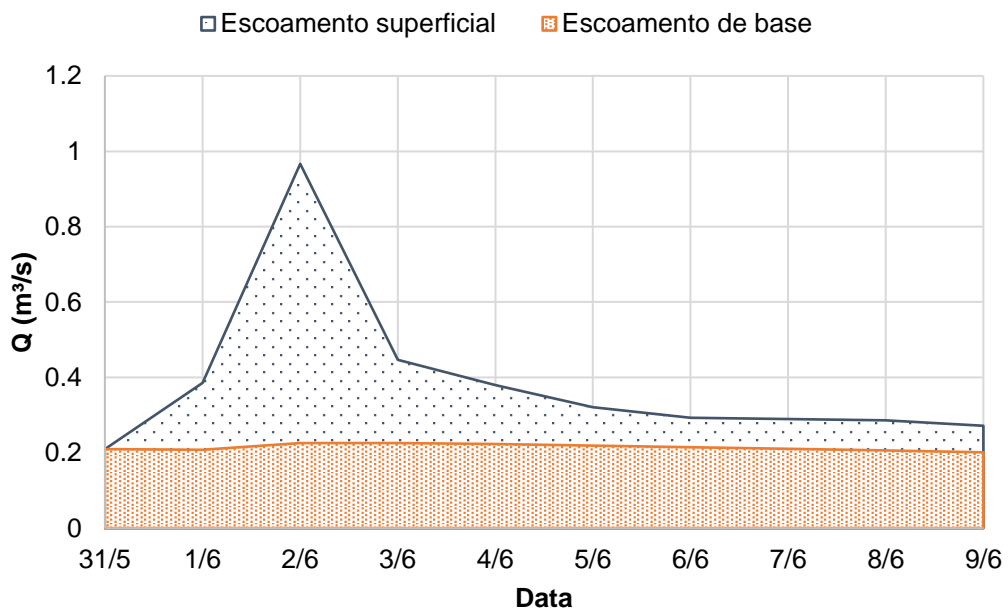


Figura 49 – Separação de escoamentos para o evento 4

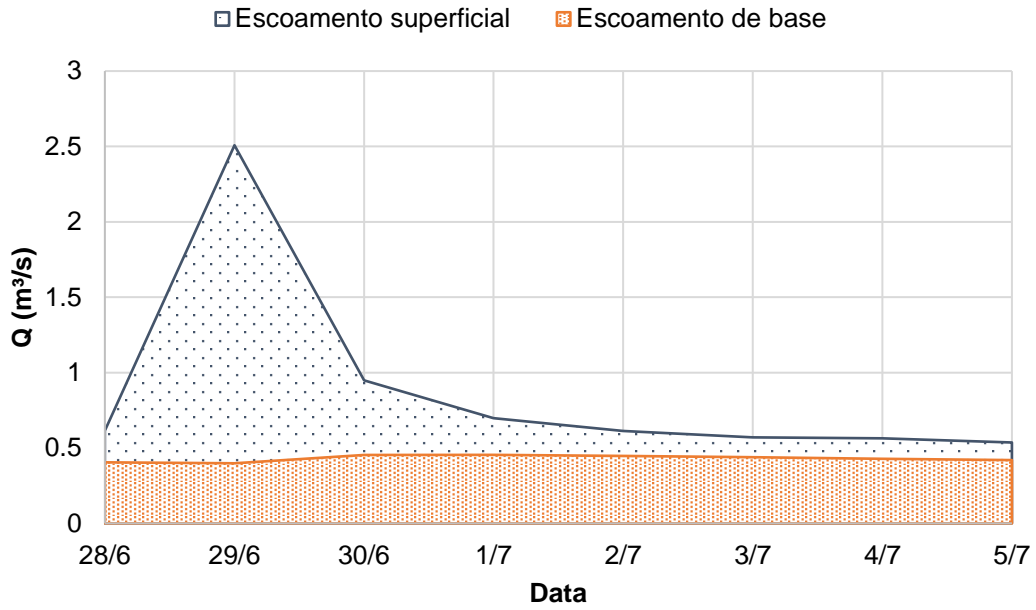


Figura 50 – Separação de escoamentos para o evento 5

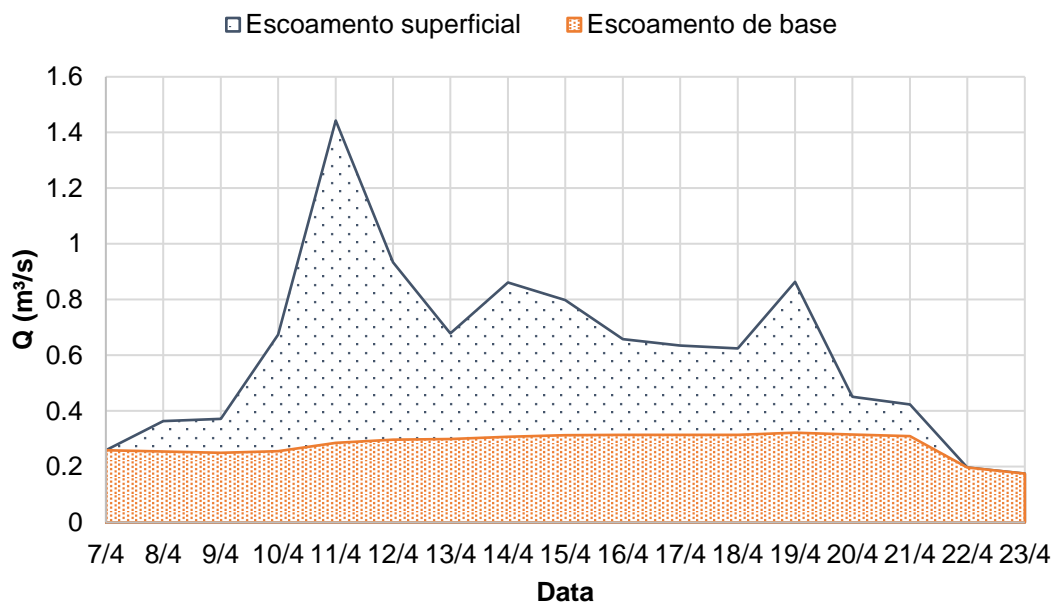


Figura 51 – Separação de escoamentos para o evento 6

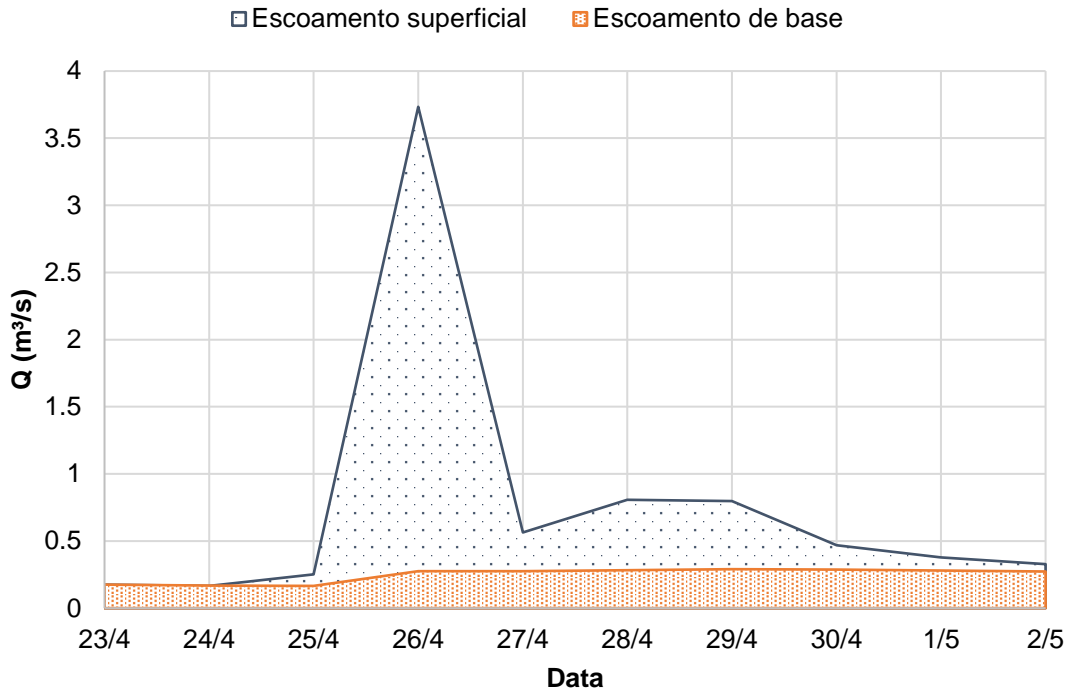


Figura 52 – Separação de escoamentos para o evento 7

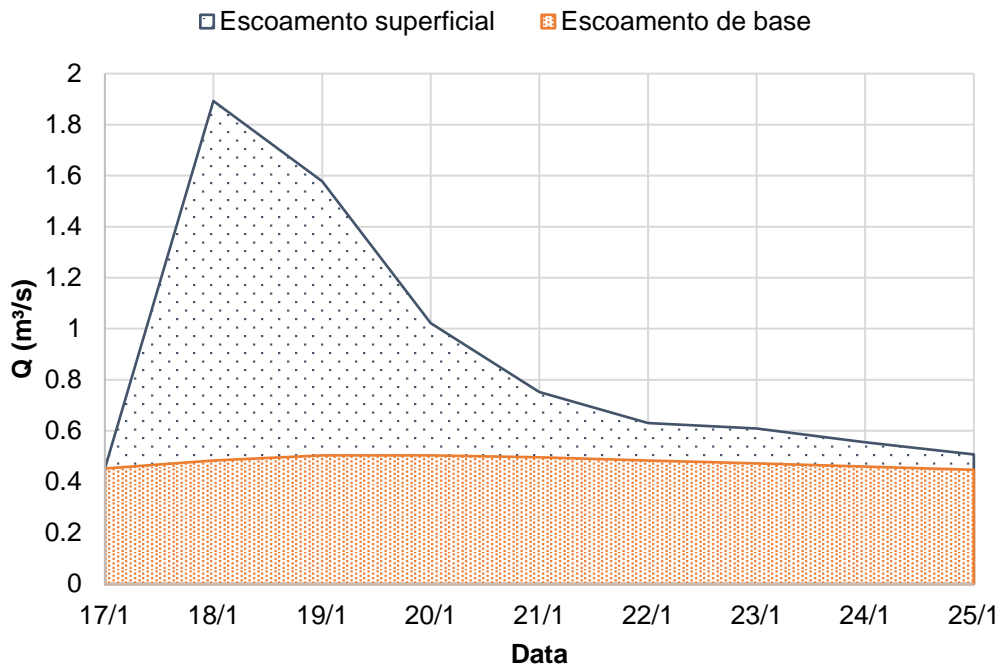


Figura 53 – Separação de escoamentos para o evento 8

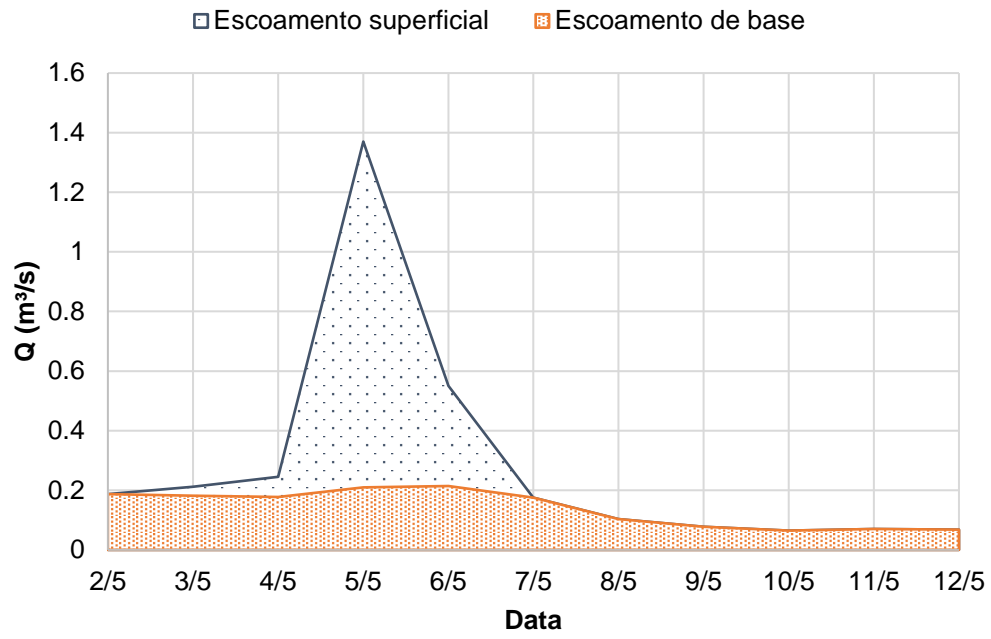


Figura 54 – Separação de escoamentos para o evento 9

APÊNDICE B – Parâmetros padrão de uso de solo do GeoWEPP

	Pavimento	Floresta Perene	Floresta 5 anos	Solo Exposto	Pastagem	Agricultura (milho)
Densidade aparente após a última lavoura (g/cm ³)	1	1,1	1,1	1	1,1	1,1
Cobertura inicial do dossel (0-100%)	0	90	50	0	15	0
Dias desde a última lavoura	2000	1000	1000	0	2000	210
Dias desde a última colheita	2000	1000	1000	0	92	60
Profundidade inicial de geada (cm)	0	0	0	0	0	0
Cobertura inicial entressulcos (0-100%)	0	100	100	0	50	90
Resíduo inicial do sistema de cultivo	Solo exposto	Perene	Perene	Solo Exposto	Perene	Anual
Precipitação acumulada desde a última lavoura (mm)	50800	1000	1000	0	5000	500
Altura inicial da crista após a última lavoura (cm)	0	10	10	0	2	2
Cobertura inicial nos sulcos (0-100%)	0	100	100	0	50	90
Rugosidade inicial após a última lavoura (cm)	0	10	10	0	2	2
Espaçamento dos sulcos (cm)	0	0	0	0	0	0
Tipo de largura dos sulcos	Temporário	Temporário	Temporário	Temporário	Temporário	Temporário
Profundidade inicial da neve (cm)	0	0	0	0	0	0
Profundidade inicial de descongelamento (cm)	0	0	0	0	0	0
Profundidade da segunda camada da lavoura (cm)	0	10	10	0	10	10
Profundidade da primeira camada da lavoura (cm)	0	20	20	0	20	20
Largura inicial dos sulcos (cm)	0	0	0	0	0	0
Massa total inicial das raízes mortas (kg/m ²)	0	0,5	0,5	0	0,2	0,4
Massa total de resíduos submersos iniciais (kg/m ²)	0	0,5	0,5	0	0	0,1