

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Centro de Desenvolvimento Tecnológico
Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos



Tese

Aplicabilidade de curvas-chave para modelagem de produção de sedimentos a partir da Modified Universal Soil Loss Equation (MUSLE)

Viviane Rodrigues Dorneles

Pelotas, 2020

Viviane Rodrigues Dorneles

Aplicabilidade de curvas-chave para modelagem de produção de sedimentos a partir da Modified Universal Soil Loss Equation (MUSLE)

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, do Centro de Desenvolvimento Tecnológico, da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Doutora em Recursos Hídricos.

Orientador: Samuel Beskow

Coorientadora: Maria Cândida Moitinho Nunes

Pelotas, 2020

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação na Publicação

D713a Dorneles, Viviane Rodrigues

Aplicabilidade de curvas-chave para modelagem de produção de sedimentos a partir da Modified Universal Soil Loss Equation (MUSLE) / Viviane Rodrigues Dorneles ; Samuel Beskow, orientador ; Maria Cândida Moitinho Nunes, coorientadora. — Pelotas, 2020.

175 f.

Tese (Doutorado) — Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, 2020.

1. Modelagem. 2. Escoamento superficial. 3. Vazão de pico. 4. Transporte de sedimento. 5. Descarga em suspensão. I. Beskow, Samuel, orient. II. Nunes, Maria Cândida Moitinho, coorient. III. Título.

CDD : 627

Viviane Rodrigues Dorneles

Aplicabilidade de curvas-chave para modelagem de produção de sedimentos a partir da Modified Universal Soil Loss Equation (MUSLE)

Tese aprovada, como requisito parcial para obtenção do grau de Doutora em Recursos Hídricos, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas.

Data da Defesa: 29 de julho de 2020.

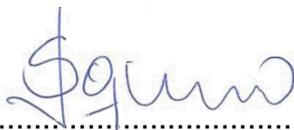
Banca Examinadora:



.....
Prof. Dr. Samuel Beskow (Orientador)
Doutor em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Lavras



.....
Prof. Dr. Hugo Alexandre Soares Guedes
Doutor em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Viçosa



.....
Prof. Dr. Leandro Sanzi Aquino
Doutor em Agronomia pela Universidade Federal de Pelotas



.....
Prof. Dr. Junior Cesar Avanzi
Doutor em Ciência do Solo pela Universidade Federal de Lavras

Aos meus pais, Vitorino e Marilaine, dedico.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer aos que auxiliaram-me, de alguma forma, a alcançar à conclusão desta etapa tão importante na minha vida acadêmica.

Primeiramente e em especial aos meus pais, Vitorino e Marilaine, minha base, que sempre me encorajam e me guiam em qualquer que seja o caminho, por me proporcionarem estudo, apoio e amor. Aos meus amados irmãos, Marion e Pedro, por me concederem este privilégio. E ao meu namorado Sergio por estar ao meu lado, me apoiando e incentivando sempre.

Ao meu orientador Samuel pela orientação, atenção e dedicação voltada ao desenvolvimento desta pesquisa, exemplo de pesquisador e profissional.

À minha coorientadora Maria Cândida, pela orientação e atenção voltada a mim e ao meu trabalho, com seu jeito único, que muito eu admiro.

Às minhas amigas e colegas Alice, Cássia, Daiane, Jéssica e Nelva, por me acompanharem e me apoiarem em todo o doutorado e por tantos momentos compartilhados juntos.

Ao Grupo de Pesquisa em Hidrologia e Modelagem Hidrológica, aos colegas integrantes e ao técnico Reginaldo pela ajuda na realização das campanhas hidrológicas e aquisição dos dados da rede de monitoramento, fundamentais para execução da pesquisa.

Ao Laboratório de Águas e Efluentes da Agência de Desenvolvimento da Bacia da Lagoa Mirim da Universidade Federal de Pelotas pela colaboração na realização das análises.

Aos demais professores e colegas do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, pelo conhecimento e convivência nesses anos.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (Fapergs), pelo suporte através da concessão de bolsas de pesquisa.

À Universidade Federal de Pelotas e ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, pela infraestrutura, recursos oferecidos e a oportunidade de realização deste Curso.

E a todos que me incentivaram e torceram por mim.

Meu muito obrigada.

Resumo

DORNELES, Viviane Rodrigues. **Aplicabilidade de curvas-chave para modelagem de produção de sedimentos a partir da Modified Universal Soil Loss Equation (MUSLE)**. Orientador: Samuel Beskow. 2020. 175 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos) – Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2020.

A intensa utilização do solo e dos recursos hídricos em bacias hidrográficas geram consideráveis impactos sobre o ambiente, sendo estreitamente associados a processos erosivos. Desta forma, em sua consequência, torna-se importante o conhecimento e a quantificação do transporte de sedimentos. O objetivo desta pesquisa consistiu em i) avaliar a utilização de curvas-chave em estações sedimentométricas do Rio Grande do Sul e ii) avaliar a capacidade da Modified Universal Soil Loss Equation em quantificar a produção de sedimentos na bacia hidrográfica do arroio Cadeia, correlacionada aos dados observados (nível de água e fluxo) combinados com curva-chave de sedimentos. Foram testados três cenários de manipulação dos dados e duas propostas de dados de entrada para o ajuste das curvas-chave de sedimento para o estado, ajustando analiticamente à uma função de potência: dados completos, subdivididos em período de 10 anos e subdivididos em intervalos de vazão; aplicando: dados de concentração de sedimentos em suspensão e descarga de sedimentos em suspensão. Na bacia hidrográfica do arroio Cadeia, a produção de sedimentos para eventos isolados de chuva foi estimada e comparada com os valores observados, em duas propostas de curva-chave, provenientes do conjunto de informações de monitoramento (pluviográfico, limimétrico e sedimentométrico). Essas informações também serviram para obter o volume de escoamento superficial direto e a vazão de pico. Os fatores de erodibilidade, topográfico e cobertura foram obtidos e os coeficientes a e b analisados em três diferentes cenários, i) Williams (1975); ii) Avanzi *et al.* (2008); e iii) calibrados para bacia. Os testes estatísticos de eficiência do coeficiente de determinação, Erro Relativo Percentual Médio e coeficiente de Nash Sutcliffe demonstraram que para os dados de concentração de sedimentos em suspensão maiores incertezas foram observadas e que os melhores resultados da estimativa foram observados quando o modelo da curva-chave testado foi aplicado aos dados completos de descarga de sedimentos em suspensão. Os resultados demonstraram que a estimativa da produção de sedimentos pela Modified Universal Soil Loss Equation considerando o cenário i) é superestimada comparada com os valores observados para todos os eventos analisados. Por outro lado, para o cenário ii) parecem estar mais próximos dos valores observados, porém as características da bacia hidrográfica em que esses coeficientes foram calibrados devem ser consideradas. A Modified Universal Soil Loss Equation apresentou-se capaz de prever a produção de sedimentos quando os coeficientes a e b foram calibrados para a bacia hidrográfica do arroio Cadeia, apresentando estimativas aceitáveis de acordo com o coeficiente de Nash Sutcliffe, evidenciando a importância da calibração dos coeficientes para a bacia.

Palavras-chave: Modelagem. Escoamento superficial. Vazão de pico. Transporte de sedimento. Descarga em suspensão.

Abstract

DORNELES, Viviane Rodrigues. **Applicability of sediment curves for modeling sediment yield from Modified Universal Soil Loss Equation (MUSLE)**. Advisor: Samuel Beskow. 2020. 175f. Thesis (Doctorate in Water Resources) - Technological Development Center, Federal University of Pelotas, Pelotas, 2020.

The intense use of soil and water resources in watersheds can generate considerable impacts on the environment, being closely associated with erosive processes. In this way, consequently, knowledge and quantification of sediment transport becomes important. The main objectives of this research were to: i) evaluate the use of sediment curves in sedimentometric stations in Rio Grande do Sul; and ii) evaluate the ability of the Modified Universal Soil Loss Equation (MUSLE) to quantify sediment yield in the Cadeia river watershed (CRW), by using observed data (water level and streamflow) combined with sediment curves. The adjustment of the sediment curves to a power function were tested three analytical scenarios of data manipulation: complete data, subdivided into 10-year periods and subdivided into streamflow intervals, and two proposals of input data: data of suspended sediment concentration and suspended sediment load. In CRW, sediment yield for each rainfall event was estimated and compared with the respective observed value according to two proposed sediment curves, derived from the set of monitoring information (rainfall, water level and streamflow). This information also served to obtain the volume of direct surface runoff and the peak discharge. Erodibility, topographic and facing factors were obtained and coefficients a and b were analyzed for three different scenarios, i) Williams (1975); ii) Avanzi *et al.* (2008); and iii) calibration for the watershed. The coefficient of determination, Average Percent Relative Error and Nash Sutcliffe coefficient demonstrated that for the suspended sediment concentration data greater uncertainties were observed. The best results of the estimate were observed when the model of the tested sediment curve was applied to the complete suspended sediment load data. The results showed that the estimate of sediment yield through MUSLE considering scenario i) is overestimated compared with the values observed for all analyzed events. On the other hand, the scenario ii) seems to generate values closer to the observed values, however, the characteristics of the watershed where these coefficients were calibrated must be considered. MUSLE was able to predict sediment yield when coefficients a and b were calibrated for CRW, presenting acceptable estimates according to the Nash Sutcliffe coefficient, showing the importance of calibrating the coefficients for CRW.

Keywords: Modeling. Surface runoff. Peak flow. Sediment transport. Suspended discharge.

Lista de Figuras

Figura 1	(a) Localização do estado do Rio Grande do Sul (RS) no Brasil e na América do Sul e (b) localização das estações sedimentométricas registradas no sistema ANA no contexto das regiões hidrográficas do Uruguai e do Atlântico Sul, dentro do Rio Grande do Sul.....	27
Figura 2	(a) Status de funcionamento das estações sedimentométricas considerando o ano de 2017 como consulta; (b) Extensão dos dados sedimentométricos de cada estação considerando até o ano de 2017.....	34
Figura 3	Boxplot representando os resultados do (a) R^2 , (b) ERP e (c) NS, para o ajuste da curva-chave de sedimentos aos dados de Concentração de sedimentos em suspensão (C_{ss}) e Descarga de sedimentos em suspensão (Q_{ss}), completos (Comp), subdivididos em período de 10 anos (Sub 10) e subdivididos em intervalos de vazão (Sub Q).....	39
Figura 4	Localização da bacia hidrográfica do arroio Pelotas (BHAP) à montante da Ponte Cordeiro de Farias (seção de controle monitorada pela ANA) e da sub-bacia hidrográfica do arroio Cadeia (BHAC), inserida na BHAP, e localização das seções de monitoramento hidrológico para ambas bacias.....	67
Figura 5	Rede de monitoramento hidrológico utilizada para registros de chuva na BHAC.....	68
Figura 6	Curva-chave nível x vazão obtida pelas medições das campanhas hidrológicas na seção de controle da BHAC.....	70
Figura 7	Utilização de Micromolinetete para medição de velocidade de água realizada a vau na seção de controle da BHAC.....	71
Figura 8	Medição de velocidade realizada com o auxílio do guincho sobre a ponte na seção de controle da BHAC.....	72

Figura 9	Amostragem de sedimento em suspensão realizada a vau com o amostrador USDH-48 (AMS-1) na seção de controle da BHAC.....	73
Figura 10	Amostragem de sedimento em suspensão realizada com o amostrador USDH-59 (AMS-2) e com o auxílio do guincho sobre a ponte na seção de controle da BHAC.....	74
Figura 11	Fluxograma do cálculo da produção de sedimentos a partir da Modified Universal Soil Loss Equation (MUSLE). Fonte: Elaborado pela autora.....	80
Figura 12	Classes de solo para a bacia hidrográfica do arroio Cadeia (BHAC) conforme Cunha et al. (2006) e Laboratório de Planejamento Ambiental da EMBRAPA Clima Temperado.....	84
Figura 13	Curvas-chave de sedimentos em suspensão (Q _{ss}) para sub-bacia BHAC, (a) ajustada aplicando os dados completos e (b) ajustada aplicando os dados divididos em dois intervalos de excedência de frequência de vazões (50%) baixas e vazões altas.....	92
Figura 14	Fator K, em Mg h MJ ⁻¹ mm ⁻¹ , para cada tipo de solo da bacia hidrográfica do arroio Cadeia (BHAC) conforme equacionamento de Denardin (1990).....	94
Figura 15	Modelo Digital de Elevação (MDE) constituído a partir de imagens da missão Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), com resolução espacial de 30m para bacia hidrográfica do arroio Cadeia (BHAC).....	97
Figura 16	Curvas de nível traçadas a partir do MDE, com resolução espacial de 30m, para bacia hidrográfica do arroio Cadeia (BHAC).....	98
Figura 17	Classificação das imagens de satélite para Água, Mata, Solo exposto, Agricultura e Campo para as datas de a) 07/05/2015, b) 27/08/2015, c) 28/09/2015, d) 18/01/2016, e) 28/02/2016, f) 13/08/2016, g) 09/10/2016, h) 02/03/2017, i) 21/05/2017, j) 08/07/2017, k) 15/10/2018.....	99

Figura 18	Fator C para as classes de Água, Mata, Solo exposto, Agricultura e Campo para as datas de a) 07/05/2015, b) 27/08/2015, c) 28/09/2015, d) 18/01/2016, e) 28/02/2016, f) 13/08/2016, g) 09/10/2016, h) 02/03/2017, i) 21/05/2017, j) 08/07/2017, k) 15/10/2018.....	100
Figura 19	Dispersão dos valores de produção de sedimentos observados e estimados ajustando os coeficientes a e b da MUSLE para BHAC pela a) PSt1 em calibração; b) PSt1 em validação; c) PSt2 em calibração e d) PSt2 em validação.....	117

Lista de Tabelas

Tabela 1	Número e porcentagens de estações com NS positivo, para o ajuste do modelo da curva-chave aos dados de Css e Qss, para os cenários para dados completos, período de 10 anos e intervalo de vazão para as estações analisadas.....	35
Tabela 2	Estatística descritiva dos índices estatísticos de R ² e ERP, para o ajuste do modelo da curva-chave aos dados de Css e Qss, para os cenários para dados completos, período de 10 anos e intervalo de vazão para as estações analisadas.....	36
Tabela 3	Valores do parâmetro permeabilidade (Per), considerando a classe textural do solo conforme Wischmeier <i>et al.</i> (1971).....	82
Tabela 4	Classes de solo, matéria orgânica, teores de areia, silte e argila, textura e estrutura para solos presentes na bacia hidrográfica do arroio Cadeia (BHAC), conforme Cunha e Silveira (1996), Cunha <i>et al.</i> (1996), Cunha <i>et al.</i> (1997) e Cunha <i>et al.</i> (2006).....	83
Tabela 5	Valores do fator C para a sub-bacia BHAC, para as respectivas classes de uso e ocupação do solo.....	87
Tabela 6	Valores do fator C médio para a sub-bacia BHAC, para a classe de Área Cultivada, considerando o período das imagens classificadas.....	88
Tabela 7	Resumo de informações obtidas a partir de campanhas hidrológicas realizadas na seção de controle da sub-bacia do arroio Cadeia (BHAC).....	91
Tabela 8	Valores do fator K de erodibilidade calculados a partir da equação de Denardin (1990) para os solos da BHAC.....	94
Tabela 9	Valores do Fator C médio para as datas analisadas, calculado a partir respectiva área para cada uma das classes encontradas para bacia hidrográfica do arroio Cadeia (BHAC).....	102
Tabela 10	Datas dos eventos chuva-vazão selecionados para análise de produção de sedimentos aplicando a MUSLE e as respectivas datas das imagens de satélite classificadas.....	103

Tabela 11	Eventos selecionados para a sub-bacia analisada, suas respectivas datas, tempo de ocorrência do evento, valores observados de precipitação total (P total), volume de escoamento (Qs), vazão de pico (qp) e produção de sedimentos suspensos total (PSt) para cada evento, estimados pelo sedimentograma para BHAC.....	105
Tabela 12	Produção de sedimento (PS) estimada pela MUSLE, aplicando os coeficientes <i>a</i> e <i>b</i> de Williams (1975) e Avanzi <i>et al.</i> (2008) para BHAC e produção de sedimentos total (PSt) considerando diferentes propostas de curva-chave (PSt1 e PSt2).....	109
Tabela 13	Valores dos coeficientes <i>a</i> e <i>b</i> da MUSLE calibrados e validados para BHAC e resultados dos índices estatísticos de RMSE, NS e R ² , para as duas propostas de curva-chave.....	116
Tabela 14	Produção de sedimentos total (PSt) observada e estimada para os eventos de validação, em duas propostas de curva-chave, considerando a calibração dos coeficientes <i>a</i> e <i>b</i> da MUSLE obtidos para BHAC.....	119

Lista de abreviaturas e siglas

AMS	Amostrador de Material em Suspensão
ANA	Agência Nacional de Águas
APHA	American Public Health Association
ARS	Agricultural Research Service
BHAC	Bacia Hidrográfica do Arroio Cadeia
BHAP	Bacia Hidrográfica do Arroio Pelotas
Css	Concentração de Sedimentos em Suspensão
EH-H	Estação Hidrológica
EH-M	Estação Meteorológica
EH-P	Estação Pluviométrica
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ERP	Erro Relativo Percentual Médio
ERPCss	Erro Relativo Percentual Médio aplicado aos dados de Concentração de Sedimentos em Suspensão
ERPQss	Erro Relativo Percentual Médio aplicado aos dados de Descarga de Sedimentos em Suspensão
ESRI	Environmental Systems Research Institute
EUPS	Equação Universal de Perda de Solo
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
LISEM	Limburg Soil Erosion Model
MDE	Modelo Digital de Elevação
MUSLE	Modified Universal Soil Loss Equation

NS	Nash Sutcliffe
NSC _{ss}	Nash Sutcliffe aplicado aos dados de Concentração de Sedimentos em Suspensão
NSQ _{ss}	Nash Sutcliffe aplicado aos dados de Descarga de Sedimentos em Suspensão
Q _{ss}	Descarga de Sedimentos em Suspensão
R ²	Coeficiente de Determinação
R ² C _{ss}	Coeficiente de Determinação aplicado aos dados de Concentração de Sedimentos em Suspensão
R ² Q _{ss}	Coeficiente de Determinação aplicado aos dados de Descarga de Sedimentos em Suspensão
RHN	Rede Hidrometeorológica Nacional
RMSE	Erro Quadrático Médio
RUSLE	Revised Universal Soil Loss Equation
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SNIRH	Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
SWAT	Soil and Water Assessment Tool
SYHDA	System of Hydrological Data Acquisition and Analysis
USDA	United States Department of Agriculture
USDH	Modelo Norte Americano (US) de amostrador operado manualmente para coleta de sedimentos em suspensão por integração vertical
USLE	Universal Soil Loss Equation
WEPP	Watershed Erosion Prediction Project
WMO	World Meteorological Organization

Lista de símbolos

C	Fator de cobertura
D	Estação com medição de vazão
DMP	Diâmetro Médio Ponderado
$\overline{\text{ERP}}$	Média do Erro Relativo Percentual Médio
$\overline{\text{ERPCss}}$	Média do Erro Relativo Percentual Médio aplicado aos dados de Concentração de Sedimentos em Suspensão
$\overline{\text{ERPQss}}$	Média do Erro Relativo Percentual Médio aplicado aos dados de Descarga de Sedimentos em Suspensão
F	Estação com observação do nível d'água
K	Fator de erodibilidade
L	Comprimento de declive
LS	Fator topográfico
MO	Matéria orgânica
N	Número de amostragens de sedimentos em suspensão
P	Fator de práticas conservacionistas
P total	Precipitação total
Per	Permeabilidade
PS	Produção de sedimentos
PSt	Produção de sedimento total
Q	Vazão
Qa	Estação com medição de qualidade de água
qp	Vazão de pico
Qs	Volume de escoamento superficial

R	Estação com registrador linígrafo
$\overline{R^2}$	Média do Coeficiente de Determinação
$\overline{R^2C_{ss}}$	Média do Coeficiente de Determinação aplicado aos dados de Concentração de Sedimentos em Suspensão
$\overline{R^2Q_{ss}}$	Média do Coeficiente de Determinação aplicado aos dados de Descarga de Sedimentos em Suspensão
S	Grau de declive
Sds	Estação com medição de descarga sólida

Sumário

1	Introdução	1	
1.1	Objetivo Geral	4	
1.2	Objetivos Específicos	4	
1.3	Hipóteses	4	
2	Revisão de Literatura	6	
2.1	Erosão hídrica e seus impactos	6	
2.2	Transporte de Sedimentos	7	
2.3	Curva-chave de Sedimentos	9	
2.4	Modelos Preditivos de Perda de Solo	13	
2.4.1	Universal Soil Loss Equation (USLE)	15	
2.4.2	Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)	16	
2.4.3	Modified Universal Soil Loss Equation (MUSLE)	17	
Capítulo 1 - Aplicabilidade de curvas-chave de sedimentos: análise no estado do Rio Grande do Sul			21
1	Introdução	22	
2	Metodologia	26	
2.1	Descrição da área de estudo	26	
2.2	Dados hidrológicos usados	26	
2.3	Ajuste das curvas-chave de sedimentos	28	
3	Resultados e discussão	33	
3.1	Análise quantitativa e qualitativa da rede de monitoramento	33	
3.2	Ajuste da curva-chave de sedimento em suspensão	35	
3.2.1	Ajuste da curva-chave de sedimento em suspensão aos dados de C _{ss} ...	41	
3.2.1.1	Ajuste da curva-chave aos dados completos de C _{ss}	41	
3.2.1.2	Ajuste da curva-chave aos dados de C _{ss} subdivididas em períodos de 10 anos.....	44	
3.2.1.3	Ajuste da curva-chave aos dados de C _{ss} subdivididos em intervalos de vazão	46	
3.2.2	Ajuste da curva-chave de sedimento em suspensão aos dados de Q _{ss} ...	48	

3.2.2.1	Ajuste da curva-chave para os dados completos de Qss	49
3.2.2.2	Ajuste da curva-chave aos dados de Qss subdivididos em períodos de 10 anos.....	50
3.2.2.3	Ajuste da curva-chave aos dados de Qss subdivididos em intervalos de vazão.....	53
3.3	Análise dos coeficientes e interpretação das curvas-chave	54
4	Conclusões	60

Capítulo 2 - Estimativa da produção de sedimentos a partir da Modified Universal Soil Loss Equation (MUSLE) usando dados observados derivados de curva-chave

1	Introdução	63
2	Metodologia	66
2.1	Área de estudo	66
2.2	Dados de precipitação	67
2.3	Monitoramento de descarga líquida	69
2.4	Monitoramento de descarga sólida em suspensão	72
2.5	Análises de laboratório	75
2.6	Curva-chave de sedimentos	75
2.7	Modelo utilizado	78
2.7.1	Fator K	81
2.7.2	Fator LS	85
2.7.3	Fator C	86
2.7.4	Fator P	88
2.7.5	Fatores <i>a</i> e <i>b</i>	89
2.7.6	Fatores Qs e qp	90
3	Resultados e Discussão	90
3.1	Monitoramento da descarga sólida em suspensão	90
3.2	Determinação dos fatores do modelo MUSLE	93
3.2.1	Fator K	93
3.2.2	Fator LS	96
3.2.3	Fator C	98
3.2.4	Fatores Qs e qp	103

3.3	Estimativa pela MUSLE e comparação com os dados observados	108
4	Conclusões	121
3	Considerações finais	122
	Referências	124
	Apêndices	136

1 Introdução

Das formas mais prejudiciais de degradação do solo, destacam-se os processos de erosão, os quais são condicionados pela combinação de fatores climatológicos, geográficos e ações antrópicas (GHAFARI *et al.*, 2017). Além de reduzir a capacidade produtiva para as culturas, diante da desestruturação do solo e perda de nutrientes, a erosão pode causar sérios danos ambientais, como poluição das fontes de água, alteração da vida aquática e assoreamento de rios (PIMENTEL; BURGESS, 2013). Esses danos ocorrem devido a intensiva desagregação de partículas do solo que são erodidas, chegam ao leito do curso d'água e são transportadas por esses até sua deposição.

O transporte de partículas sólidas, ou transporte de sedimentos como é tecnicamente denominado, está presente em todos os cursos d'água, ocorrendo de maneira natural, porém, de formas e características diferentes. Sua quantificação, em bacias hidrográficas, se torna extremamente importante para o planejamento e gestão de recursos hídricos, em razão desses dados servirem de base para o dimensionamento, implantação, operação e manutenção de obras hidráulicas, por exemplo. Essas informações são obtidas por meio do monitoramento, realizado em campanhas hidrológicas na área de estudo, que por sua vez, pode ser considerado custoso de ser realizado, principalmente em pequenas bacias.

O modelo da curva-chave de sedimentos é uma ferramenta alternativa à ausência de monitoramento contínuo de transporte de sedimentos, amplamente empregada para obter a descarga de sedimentos (ASSELMAN, 2000; FAN *et al.*, 2012; GARRIDO *et al.*, 2018; HOROWITZ, 2003; HU *et al.*, 2011; LIMA; SILVA, 2007; MIRAKHORLO; RAHIMZADEGAN, 2020; SADEGHI *et al.*, 2008; TABATABAEI *et al.*, 2019; ZHANG *et al.*, 2012). Empiricamente, as curvas-chaves descrevem a relação entre vazão e a descarga de sedimentos (HAPSARI *et al.*, 2019; IADANZA; NAPOLITANO, 2006; ZHENG, 2018). Hidrólogos e profissionais da área utilizam-na, com frequência, para converter hidrogramas em sedimentogramas, por exemplo, em locais onde o monitoramento de sedimentos não se faz regularmente (GAO *et al.*, 2018). Contudo, a aplicação do modelo da curva-chave pode gerar incertezas nos valores previstos de sub ou superestima, frente à utilização do modelo que descreva a relação, tamanho e períodos contemplados dos dados utilizados, confiabilidade dos

dados observados obtidos para o ajuste, frequência das campanhas hidrológicas, entre outros (HAPSARI *et al.*, 2019; HASSANZADEH *et al.*, 2018). Desta forma, o conhecimento do comportamento do modelo da curva-chave de sedimentos torna-se importante.

Diante dos resultados adquiridos no desenvolvimento das curvas-chave de sedimentos, a utilização do modelo para quantificação do transporte de sedimentos, de forma mais eficiente deve ser aplicada, uma vez que o modelo da curva-chave pode ser empregado na obtenção dos valores de descarga sólida de sedimentos em suspensão, a Q_{ss} , em bacias hidrográficas. Neste contexto, os valores de Q_{ss} estimados pela curva-chave podem ser considerados como valores observados e comparados com os obtidos por modelos de estimativa de produção de sedimento, como é o caso da Modified Universal Soil Loss Equation (MUSLE), ou para aplicação de modelos preditivos de erosão de solo, no intuito de avaliar a sua capacidade preditiva para a modelagem dos processos hidrossedimentológicos.

Entre as formas de se avaliar o transporte de sedimentos originados dos processos erosivos pode-se destacar a produção de sedimentos, que se refere ao potencial de perda de solo, para um evento de chuva em uma bacia hidrográfica, transportado pelo curso d'água (SILVA; SCHULZ; CAMARGO, 2003; SIQUEIRA; VANZELA, 2018). A produção de sedimentos pode ser determinada por vários métodos, dos quais se destaca a MUSLE. A estimativa da produção de sedimentos, obtida pela aplicação da MUSLE, em bacias hidrográficas, compreende fatores de solo, topografia, cobertura e manejo, práticas conservacionistas, além do volume de escoamento e vazão de pico, resultantes de um evento de chuva monitorado (WILLIAMS, 1975). Desta forma, a MUSLE se diferencia de outros modelos por considerar diretamente as características do escoamento superficial direto de um evento isolado, o qual representa um componente-chave no transporte de sedimentos (KINNELL, 2005).

Além disso, existe a possibilidade do modelo ser calibrado e validado para uma área de estudo de interesse, sendo avaliada a aplicabilidade em regiões diferentes daquela em que o modelo foi desenvolvido. Esse ajuste é importante para reduzir as incertezas e aumentar a confiabilidade na capacidade do modelo em realizar as simulações de forma mais eficaz (ODONGO *et al.*, 2013). Desta forma, a MUSLE foi aplicada e testada em diferentes bacias hidrográficas, como forma de estimativa da

produção de sedimentos (AREKHI, 2008; AVANZI, 2005; BAGARELLO *et al.*, 2017; KINNELL, 2016; SANTOS *et al.*, 2014; SHEN *et al.*, 2009; VIGIAK *et al.*, 2015).

Em aspectos de localização definiu-se como área de interesse de pesquisa o estado do Rio Grande do Sul, localizado no sul do Brasil, que apresenta por limites o estado de Santa Catarina, Argentina e Uruguai, além do Oceano Atlântico, com uma área que abrange 281.738 km² (IBGE, 2016), dispondo de 497 municípios. O estado do Rio Grande do Sul contribuí intensamente para produção agrícola nacional, destacando-se por ser o terceiro maior produtor de grãos nacional, com expressiva colheita de arroz, soja e milho, possuindo também um dos maiores rebanhos bovinos do país destinado tanto ao mercado interno como à exportação (FEIX; LEUSIN JÚNIOR, 2019).

Na região sul do Rio Grande do Sul encontra-se a bacia hidrográfica do arroio Pelotas (BHAP), importante bacia hidrográfica na região, localizada entre os municípios de Pelotas, Morro Redondo e Canguçu. Em seu curso principal está o arroio Pelotas, recurso hídrico que mais fornece água bruta para os municípios, além de também ser utilizado para irrigação de diversas culturas. A BHAP, diante de seus múltiplos usos, sofre interferências pelos processos de urbanização, expansão de cultivos e pecuária, extração de areia e despejo de efluentes, os quais alteram suas condições naturais podendo provocar degradação do solo e dos ambientes hídricos. A bacia do arroio Cadeia (BHAC), objeto deste estudo, está inserida na BHAP, com uma área de aproximadamente 122,5 km², contribuindo expressivamente para o arroio Pelotas. Seu uso principalmente rural, favorece os aspectos de transporte de sedimentos, podendo influenciar na qualidade de água desses recursos hídricos.

Desta forma, estudos técnicos voltados a qualidade de água, produção de sedimentos, dinâmica hidrossedimentológica e estudos de erosão do solo são de fundamental importância, uma vez que as interferências supracitadas de uso e ocupação do solo e da água, contribuem a uma possível fragilidade ambiental, a qual, se diagnosticada, interferirá significativamente a região. Todas as informações obtidas, subsidiam tecnicamente e cientificamente o planejamento e gestão do solo e dos recursos hídricos, contribuindo para recuperação, melhorias e conservação ambiental da região.

1.1 Objetivo Geral

Avaliar a aplicabilidade de curvas-chave de sedimentos, com base na análise de dados disponibilizados para o estado do Rio Grande do Sul, para representar o transporte de sedimentos em suspensão, bem como a capacidade preditiva da MUSLE para quantificação da produção de sedimentos, utilizando registros de eventos de chuva isolados, comparando com dados observados provindos da combinação de hidrogramas com curvas-chave de sedimentos, em uma sub-bacia monitorada.

1.2 Objetivos Específicos

- Avaliar a viabilidade de curvas-chaves de sedimentos em suspensão, para representar o transporte de sedimentos em cursos d'água monitorados pela Agência Nacional de Águas, para o estado do Rio Grande do Sul.
- Analisar o desempenho da curva-chave de sedimentos em forma de potência;
- Avaliar diferentes formas de subdivisão dos dados disponibilizados, para aplicação do método da curva-chave de sedimentos;
- Estimar a produção de sedimentos por meio da MUSLE na bacia hidrográfica do arroio Cadeia, dotada de monitoramento hidrológico;
- Calibrar e validar os coeficientes a e b da MUSLE para a bacia hidrográfica do arroio Cadeia.
- Comparar os coeficientes a e b da MUSLE existentes na literatura para estimativa de produção de sedimentos na bacia hidrográfica do arroio Cadeia com os coeficientes determinados para a bacia.

1.3 Hipóteses

- O método da curva-chave de sedimentos se mostra viável em representar o transporte de sedimentos em cursos d'água monitorados pela Agência Nacional de Águas, para o estado do Rio Grande do Sul;
- O equacionamento do método da curva-chave de sedimentos, em forma de potência se mostra efetivo para representar os dados analisados;

- O método da curva-chave de sedimentos apresenta melhor eficiência quando aplicado aos dados de descarga sólida em suspensão comparativamente aos de concentração de sedimento em suspensão;
- Quando o conjunto de dados de transporte de sedimentos são subdivididos em períodos e intervalos, o método da curva-chave de sedimentos apresenta melhora na estimativa;
- Há correlação entre vazão x concentração de sedimentos em suspensão x descarga sólida em suspensão na sub-bacia analisada;
- A produção de sedimentos, na bacia hidrográfica do arroio Cadeia, é representada adequadamente pela equação MUSLE, por meio da calibração e validação dos coeficientes a e b ;
- Os coeficientes a e b da MUSLE existentes na literatura não são adequados para estimar a produção de sedimentos na bacia hidrográfica de arroio Cadeia, enquanto o ajuste desses parâmetros, para bacia, permite estimar os mesmos processos com acurácia.

2 Revisão de Literatura

2.1 Erosão hídrica e seus impactos

Destaca-se a erosão do solo como uma das ameaças mais graves enfrentadas na agricultura. Pimentel e Burgess (2013) salientam que cerca de 10 milhões de hectares de terras cultiváveis são perdidos a cada ano devido à erosão do solo, reduzindo as terras disponíveis para a produção mundial de alimentos. Isto ocorre, porque, nessas circunstâncias, dificulta-se o plantio, perde-se água, nutrientes, matéria orgânica, biota do solo, que conduz a limitação da capacidade produtiva, além do assoreamento e poluição de mananciais, colocando em perigo a segurança alimentar regional, resultando numa problemática social e ambiental grave. Pimentel e Burgess (2013) ressaltam ainda que, comparativamente com a taxa de formação do solo, as perdas desse, nas áreas agrícolas, são 10 a 40 vezes mais rápidas, dificultando a recuperação natural das áreas.

Os processos erosivos são causados, sobretudo, por dois agentes: a ação eólica, principalmente em regiões áridas e semiáridas, e pela energia da água, denominada de erosão hídrica. Essa última, refere-se ao movimento e transporte de partículas de solo de um local para outro devido à ação da precipitação e do escoamento superficial (VAN PELT *et al.*, 2017), ocorrendo por meio natural, tendo o impacto da gota da chuva e o escoamento superficial direto como principais causadores. Atividades antrópicas que removam a cobertura vegetal do solo, por exemplo, o expõe à intensa ação aos processos erosivos, tornando-o instável devido a modificações da sua estrutura. Desta forma, o uso e o manejo inadequado dos recursos naturais influenciam negativamente a manifestação do processo de erosão hídrica, principalmente pela inexistência de cobertura vegetal (COMINO *et al.*, 2016).

O processo erosivo compreende três fases, a desagregação, que ocorre quando o solo se fragmenta, tornando-se disponível para o transporte, onde as partículas são transportadas e arrastadas, e a deposição, quando o transporte é cessado e as partículas arrastadas se depositam. A pesquisa de Ghafari *et al.* (2017) expõe uma reflexão contextualizada sobre a problemática da erosão hídrica no âmbito mundial, os autores afirmam que para alcançar um sistema, que identifique as áreas de alto risco à erosão, é necessário considerar tanto o local de deslocamento do solo

erodido como o de deposição, tornando o entendimento muito mais complexo. Verstraeten e Poesen (1999) afirmam que a deposição na área a jusante diminui a capacidade de armazenamento de água em bacias de retenção, o que aumenta a possibilidade de escoamento superficial direto e reduz a vida útil projetada de estruturas de aproveitamento e controle de recursos hídricos, e que além disso, esses sedimentos podem causar ainda o assoreamento de cursos d'água e de barragens de pequeno porte no meio rural.

Nesta perspectiva, o estudo dessa dinâmica é de grande utilidade para direcionar os formuladores de princípios de conservação do solo e agências de proteção ambiental para planejamento das regiões de risco elevado. Como consequência da erosão hídrica, pode-se citar o abandono das terras agrícolas, pela redução da fertilidade do local, e o aumento das despesas com fertilizantes (VERSTRAETEN; POESEN, 1999). Diante disso, torna-se importante quantificar a erosão hídrica e o transporte de sedimentos de uma determinada área e conhecer a dinâmica hidrossedimentológica dessa, visando estratégias de conservação do solo e da água e a prevenção de impactos econômicos, sociais e ambientais.

O planejamento para conhecimento dos processos hidrossedimentológicos depende, dentre outros fatores, do objetivo da pesquisa e a abrangência da área. O monitoramento pode ser realizado de longo termo, ou para um estudo específico e de curta duração, onde é definida a necessidade do número de amostragens realizadas. Conhecer os padrões, as predisposições e as tendências do solo à erosão e dos cursos ao transporte de sedimento, é de amplo interesse e podem ser obtidos por modelagem, permitindo a análise de cenários em relação aos usos atuais ou potenciais da terra (DE VENTE *et al.*, 2013). A atividade hidrossedimentológica de uma bacia hidrográfica é complexa e envolve vários fatores que interferem a sua dinâmica. Esses fatores, como por exemplo as classes de solo que apresentam diferente suscetibilidade a erosão e transporte de sedimento, uso e cobertura, relevo, entre outros, são de extrema importância e devem ser entendidos e diferenciados.

2.2 Transporte de sedimentos

Em cursos d'água existe uma movimentação de partículas sólidas, que são erodidas e sedimentam-se, e entre esses processos ocorre o transporte para jusante

(MEDEIROS; CORDERO, 2008) ou seja, o transporte de sedimentos contempla o processo entre a erosão e a deposição. Para o seu entendimento e quantificação, as formas de transporte de sedimentos são divididas em descarga sólida de arraste (partículas mais grosseiras) e descarga em suspensão, que devem ser assim diferenciadas e consideradas quanto ao monitoramento e a amostragem num curso d'água. A porção suspensa é predominante e geralmente representa boa parte da carga total transportada (CARVALHO, 2008; ZHANG *et al.*, 2012). Porém, da mesma forma, torna-se importante estimar a quantidade de sedimentos transportado por arraste e conhecer as características granulométricas desse, uma vez que o tipo de solo de uma região está diretamente relacionado com a disposição desse a erosão e transporte.

O monitoramento do transporte de sedimentos num curso d'água necessita de muitas saídas a campo, grande cuidado operacional e elevado número de amostragens (CARVALHO, 2008), que podem ser realizadas de forma manual (a vau ou com guincho hidrométrico), ou de forma automática em tempos pré-determinados. Nesta perspectiva, estudos baseados em monitoramento hidrossedimentológico podem apresentar limitações devido às dificuldades metodológicas e operacionais, como implementação das estações sedimentométricas, necessidade de equipe para saídas a campo, equipamentos ainda de elevado custo para aquisição, entre outros. Desta forma, dados de transporte de sedimentos obtidos de campanhas hidrológicas e disponíveis na literatura são limitados (MOLINAS *et al.*, 2001).

Porém, no Brasil, a Agência Nacional de Águas (ANA), que é responsável pela coordenação das atividades da Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN) e oferece acesso ao portal integrante do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH), disponibiliza dados, oriundos de coletas e registros de estações, climatológicos e hidrológicos, como volume de chuvas, níveis fluviais, vazões dos rios e quantidade de sedimentos, evaporação e qualidade das águas. Esses dados são oriundos de coletas e registros de estações, dos quais alguns, ainda em quantidade menor comparativamente às estações fluviométricas e pluviométricas, possuem informações de sedimentos em suspensão associadas a vazões, o que permite calcular a descarga de sedimentos em suspensão.

Para o estado Rio Grande do Sul a ANA administra e monitora os dados sedimentométricos de 87 estações sedimentométricas localizadas em diferentes

regiões do estado. Desta forma, torna-se possível o entendimento da dinâmica hidrossedimentológica e estudos de erosão do solo, os quais são de fundamental importância para essa região, uma vez que contribuí expressivamente para produção agropecuária nacional, destinada tanto ao mercado interno como à exportação (FEIX; LEUSIN JÚNIOR, 2019), o que sugere elevada propensão para efeitos de degradação do solo.

2.3. Curva-chave de sedimentos

Modelos empíricos têm sido utilizados, já que são ferramentas simples para descrever a relação entre a vazão e a descarga de sedimentos. Campbell e Baueder (1940) observaram que a relação entre o logaritmo da concentração de sedimentos e o logaritmo da vazão era aproximadamente linear, e assim desenvolveram um método simples, mas confiável e frequentemente usado, para calcular o transporte de sedimentos em suspensão, a chamada técnica de curva-chave, que permite a extrapolação de medições de campo com a ajuda de equações de regressão. Em outras palavras, usa-se essa curva-chave em diferentes locais, devido à ausência de monitoramento de sedimentos de forma contínua, especialmente os em suspensão (SADEGHI *et al.*, 2008), devido as dificuldades já citadas.

Desta forma, torna-se possível estimar o transporte de sedimentos mediante a relação com a vazão nos cursos d'água. Assim, diversos pesquisadores, tais como Asselman (2000), Fan *et al.* (2012), Garrido *et al.* (2018), Hassanzadeh *et al.* (2018), Horowitz (2003), Hu *et al.* (2011), Iadanza e Napolitano (2006), Lima e Silva (2007), Sadeghi *et al.* (2008) e Zheng (2018), têm trabalhado na aplicação das curvas-chave de sedimentos que, empiricamente, descrevem a relação entre a concentração de sedimentos em suspensão (C_{ss}) ou a descarga sólida em suspensão (Q_{ss}) e a vazão para um determinado local.

Pesquisas científicas na área têm sugerido que a relação entre sedimento e vazão apresenta-se com um comportamento de forma potencial (GAO; JOSEFSON, 2012; HAPSARI *et al.*, 2019; ZENG *et al.*, 2018). Desta forma, a curva-chave de sedimentos em suspensão comumente utilizada é uma função de potência, representada pela Equação 1 (ASSELMAN, 2000; GAO *et al.*, 2018; ZHANG *et al.*, 2012):

$$C_{ss} = a Q^b \quad (1)$$

em que:

C_{ss} : concentração de sedimentos em suspensão (mg L^{-1});

Q : vazão ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$);

a e b : coeficientes de ajuste.

Desta forma, desenvolve-se uma relação entre os valores de cota e vazão em cursos d'água *versus* os valores provenientes de amostragens de sedimento em suspensão, obtidos em campanhas hidrológicas a campo, para determinar a C_{ss} nessas condições. Em outras palavras, obtém-se, a partir de várias saídas a campo, em determinadas condições de cota/vazão, específicas C_{ss} , estabelecendo assim a curva-chave de sedimentos, tornando possível estimar a descarga sólida. Desta maneira, com o monitoramento contínuo de cotas d'água, pode-se obter as vazões e transformar essas em C_{ss} e em Q_{ss} .

Partindo-se dos valores de C_{ss} obtidos a partir de amostragens a campo e da vazão, outra forma de obtenção de curvas-chave de sedimento é por meio da utilização do valor de Q_{ss} para a curva na função de potência, que da mesma forma que a C_{ss} é associada a valores de vazão. Primeiramente, a Q_{ss} é obtida pela multiplicação da C_{ss} e do valor de vazão, mediante Equação 2, que corresponde à relação da C_{ss} com a velocidade que a mesma está sendo transportada no curso d'água, sendo expressa a quantidade transportada em massa por unidade de tempo (ASSELMAN, 2000; HASSANZADEH *et al.*, 2018; HOROWITZ, 2003). Assim, o valor de C_{ss} é convertido em Q_{ss} após a multiplicação de Q e uma simples conversão de unidades.

$$Q_{ss} = 0,0864 C_{ss} Q \quad (2)$$

em que:

Q_{ss} : descarga sólida de sedimentos em suspensão (t dia^{-1});

C_{ss} : concentração de sedimentos em suspensão (mg L^{-1});

Q : vazão ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$).

Após, a curva-chave de sedimentos em suspensão é apresentada pela Equação 3, considerando então a Q_{ss} , utilizada assim, da mesma forma, por vários autores (HASSANZADEH *et al.*, 2018; MIRAKHORLO; RAHIMZADEGAN, 2020; TABATABAEI *et al.*, 2019)

$$Q_{ss} = a Q^b \quad (3)$$

em que:

Q_{ss} : descarga de sedimentos em suspensão ($t \text{ dia}^{-1}$);

Q : vazão ($m^3 s^{-1}$);

a e b : coeficientes de ajuste.

Segundo Horowitz (2010), existem duas formas de utilizar as curvas-chave de sedimentos. A primeira implica em combinar todos os dados disponíveis de vazão e sedimentos, para o período de interesse, para gerar uma única curva-chave. Já a segunda, é a geração de curvas-chave anuais individuais, usando dados de vazão e sedimentos para um determinado ano. Ambas as abordagens confiam nas equações de regressão (por exemplo, linear, polinomial) que são calculadas e, subsequentemente, avaliadas. Existem algumas maneiras de se estimar os coeficientes das curvas-chave de sedimentos. Asselman (2000), para diferentes locais na bacia do rio Reno, no noroeste da Europa, apontou que as curvas-chave obtidas por regressão linear por mínimos quadrados tendem a subestimar as taxas de transporte de sedimentos para a bacia e que estimativas melhores são obtidas quando são utilizadas as curvas-chave enquadradas na forma de uma função de potência, baseadas em regressão não-linear por mínimos quadrados.

Os coeficientes da curva-chave de sedimentos, estimados por análise de regressão, não têm um significado físico, no entanto, algumas interpretações físicas são muitas vezes atribuídas, como quando associados com a morfologia do leito do rio ou com a erodibilidade do solo. De acordo com Zhang *et al.* (2012), altos valores do coeficiente a indicam a disponibilidade dos sedimentos na bacia, oriundos de solos que podem ser facilmente erodidos e transportados pelo escoamento. Já o expoente b é utilizado para indicar a unidade erosiva do rio, quando apresenta elevados valores

indica um forte aumento da capacidade de transporte de sedimento com um aumento na vazão do rio.

Além disso, a inclinação e a forma da própria curva-chave podem ser empregadas para inferir sobre fatores e processos hidrológicos específicos. Heng e Suetsugi (2014) explicam que uma curva-chave com um comportamento mais plano revela que sedimentos ou depósitos sedimentares soltos estão disponíveis para transporte em quase todas as vazões. E que, de outro modo, uma forma côncava indica que os materiais são transportados coincidentemente com os fluxos superiores dos eventos anteriores.

Asselman (2000) também concluiu que a inclinação das curvas-chave diminui ao longo do canal principal do Reno numa direção à jusante e que as curvas mais íngremes são encontradas nos afluentes. O autor afirma que geralmente o grau de inclinação da curva-chave está relacionado com a disponibilidade de sedimento em suspensão numa certa área, em combinação com a energia erosiva do rio para transportar este material, porém, a inclinação da curva-chave não fornece informações sobre o regime de transporte de sedimentos.

Zhang *et al.* (2012) utilizaram curvas-chave de sedimentos para estudar as variações nas relações entre vazão e a C_{ss} , com base em 50 anos de dados mensais, obtidos em três estações dos principais rios do Delta do Rio das Pérolas, localizado no sul da China. As curvas-chave das três estações foram obtidas por dados de regressão logarítmicas, que é outro modo para representar as curvas, em que os coeficientes foram estimados usando regressão de mínimos quadrados sobre os logaritmos de vazão e os dados de C_{ss} . Os resultados mostraram que quando a série de dados foi dividida em décadas, para cada uma das estações, os coeficientes das curvas-chave variaram com o tempo. Os autores também identificaram que o coeficiente a mais baixo, e o maior expoente b , ocorreram na década de 1980, indicando que o transporte de sedimentos atingiu seu pico ao mesmo nível que a vazão.

A precisão de vida útil de reservatório e barragens de recursos hídricos é um aspecto de aplicabilidade da curva-chave de sedimentos, sendo, nas últimas décadas, desenvolvidos vários métodos de investigação. Hassanzadeh *et al.* (2018), avaliaram diferentes formas de obtenção da curva-chave de sedimentos, de séries anuais, sazonais, mensais, períodos secos e úmidos, de forma linear aplicando diferentes

coeficientes de correção (FAO e QMILE) para o rio Karkhein, terceiro maior rio do Irã, possuindo sobre ele a maior barragem construída do Oriente Médio. Os autores diagnosticaram que a forma mais eficiente para representar o transporte de sedimentos no rio Karkhein, pela curva-chave de sedimentos, seria utilizando séries anuais a aplicando os coeficientes de correção.

Esses coeficientes de correção (FAO, QMILE, Smearing, entre outros) das curvas estão sendo amplamente utilizados e representam a atualização em relação a utilização das curvas-chave de sedimento (HASSANZADEH *et al.*, 2018; TABATABAEI *et al.*, 2019; GIROLAMO; LO PORTO, 2015). Além disso, outras técnicas, como por exemplo algoritmo genético e otimização multi-objetivo, representam o estado da arte para estimativa de sedimento obtidas a partir de curvas-chave. Tabatabaei *et al.* (2019) com o objetivo de avaliar e aumentar a eficiência do modelo de curva-chave de sedimentos, aplicaram essa abordagem de otimização multi-objetivo propondo a utilização de algoritmo genético para o Ghorichay, Irã. Os autores relevaram pela análise comparativa aos métodos tradicionais, o modelo através do algoritmo genético, algoritmo de otimização e análise multi-objetiva apresentaram resultados ótimos e superiores aos métodos tradicionais, aumentando a eficiência do modelo.

2.4 Modelos Preditivos de Perda de Solo

Em 1947, um grupo de pesquisadores dos Estados Unidos, conduzidos por George Wallace Musgrave, reuniram-se a fim de avaliar os fatores envolvidos na erosão do solo. Eles listaram vários fatores intervenientes no processo de erosão, como, por exemplo, tipo e uso do solo, a produção de culturas e a influência climática. A partir deste trabalho, foi desenvolvida uma equação completa para prever a erosão do solo chamada de equação de Musgrave (MUSGRAVE, 1947), que produziu resultados muito úteis para grande parte do país.

De acordo com Pandey *et al.* (2016), a partir de 1954, o foco foi desenvolver um esquema global para verificação e análise dos conjuntos de dados existentes para apoiar uma tecnologia mais ampla de previsão de perda de solo. Para a realização deste objetivo, a primeira pesquisa publicada neste âmbito foi de Smith e Wischmeier (1957), em que os autores discutiram os dois principais processos pelos quais pode

ocorrer a erosão, sendo eles o impacto da gota da chuva e o transporte das partículas do solo através do escoamento superficial. O trabalho abordou os seis fatores que afetam a magnitude da perda de solo, tratando-se: do comprimento e percentual de declive, do cultivo, do tipo de solo, do manejo e da precipitação. Além disso, a eficiência das três principais práticas de conservação no controle da erosão: cultivo de contornos, cultivo em faixas e terraços foram apresentadas, e os fatores e práticas foram combinados em uma equação de erosão racional para calcular a perda de solo para uso na aplicação de práticas de conservação.

Outro trabalho, desenvolvido pelos mesmos autores, para esta finalidade, foi publicado em 1958, onde foi avaliada a relação da energia da chuva com a perda de solo (WISCHMEIER; SMITH, 1958). Mais adiante, Wischmeier (1959) desenvolveu um índice de erosão pluviométrico, e após Wischmeier (1960) avaliou um fator de cultivo. Posteriormente, foi desenvolvida por Wischmeier e Smith (1961) e publicada pelo Agricultural Research Service (ARS) a Equação Universal de Perda de Solo (EUPS), originalmente denominada de Universal Soil Loss Equation (USLE). Essa equação permite estimar a perda de solo por erosão da chuva, auxiliando assim o planejamento para conservação em regiões úmidas. Nesta sequência, as pesquisas diante desse tema seguiram avançando e Olson e Wischmeier (1963) avaliaram a erodibilidade de diferentes tipos de solos.

Em 1965, Wischmeier e Smith (1965) publicaram pela primeira vez a USLE no Manual de Agricultura do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA), como previsão de perdas por erosão da chuva em terras de cultivo a leste das Montanhas Rochosas, como um guia para seleção de práticas de conservação de solo e água (WISCHMEIER; SMITH, 1965). Treze anos depois, em 1978, os autores avançaram na pesquisa e foi divulgada a segunda publicação da USLE, no Manual de Agricultura do USDA, intitulada como “Previsão de perdas por erosão hídrica - Um guia para conservação na agricultura” (WISCHMEIER; SMITH, 1978).

Em meio ao desenvolvimento de modelos, atualmente, existem vários que têm sido amplamente utilizados para estimar a erosão e/ou produção de sedimentos em bacias hidrográficas. Além dos propostos fundamentalmente pela USLE (RUSLE e MUSLE), que serão tratados separadamente a seguir, pode-se destacar também o modelo Watershed Erosion Prediction Project (WEPP) (LAFLEN *et al.*, 1991; NEARING, 1989), desenvolvido pela USDA (1995), sendo um modelo

conceitualmente distribuído utilizado para simulação em vertentes, o modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT) (ARNOLD *et al.*, 1998), também desenvolvido pela USDA largamente utilizado no Brasil, sendo um modelo de base conceitual, computacionalmente eficiente e capaz de realizar simulações contínuas por longos períodos de tempo, e o modelo Limburg Soil Erosion Model (LISEM) (DE ROO *et al.*, 1996; JETTEN, 2002) que é um modelo espacialmente distribuído, com a finalidade de simular a desagregação e a deposição de sedimento em bacias hidrográficas como resposta a um único evento independente de chuva.

Devido à grande variedade dos fatores envolvidos na erosão do solo e produção de sedimentos, esses processos podem ser fisicamente difíceis de modelar. Em virtude da ampla gama de modelos disponíveis para essa estimativa, que basicamente se distinguem em termos de complexidade, heterogeneidade dos parâmetros e diversidade dos dados de entrada requeridos, no geral não existe um único modelo ou o melhor modelo para todas as aplicações. Desta forma, o modelo mais adequado dependerá da finalidade e objetivos do estudo e das características da área de interesse para aplicação.

2.4.1 Universal Soil Loss Equation (USLE)

A Universal Soil Loss Equation (USLE) é a ferramenta empírica mais amplamente utilizada para prever a erosão hídrica, em áreas com sistemas específicos de cultivo e manejo. Foi obtida a partir de análise estatística de mais de 10.000 dados básicos de escoamento e erosão de solo, sendo desenvolvida para prever a longo prazo (20 anos), de forma acessível, a perda média anual de solo (BAGARELLO *et al.*, 2017). Essa equação permite estimar a erosão hídrica, auxiliando assim a seleção de práticas de conservação de solo e da água (WISCHMEIER; SMITH, 1978). O modelo consiste no produto de seis fatores principais, que estima a erosão de solo por unidade de área (WISCHMEIER; SMITH, 1965, 1978), sendo representada pela Equação 4:

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

em que:

A: erosão anual de solo calculada por unidade de área ou taxa de perda de solo ($\text{Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$);

R: erosividade da chuva ou índice de erosão pela chuva ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ ano}^{-1}$);

K: fator de erodibilidade do solo ($\text{Mg h MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$);

LS: fator topográfico, comprimento e grau de declive (adimensional);

C: fator de uso e manejo do solo (adimensional); e

P: fator de práticas conservacionistas (adimensional).

A USLE tem como vantagem a exigência de dados de entrada relativamente simples, sendo o modelo direto de predição de erosão mais utilizado no mundo (KINNELL, 2010), composta por fatores numéricos, como visto na Equação 4, que representam os componentes que influenciam no processo de erosão hídrica. Por ser um modelo empírico, os fatores da equação devem ser calibrados para condições específicas de cada localidade. Assim, dada a extensão e a grande variabilidade ambiental observada no Brasil, o desenvolvimento de um banco de dados completo dos fatores da USLE é um desafio (KINNELL, 2010).

2.4.2 Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)

Em 1997, foi feita a publicação da Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) em um manual de Agricultura do USDA, como “Previsão da erosão do solo pela água: um guia para o planejamento da conservação com a Equação Universal de Perda de Solo Revisada (RUSLE)” (RENARD *et al.*, 1997). A RUSLE é um modelo empiricamente baseado na USLE, porém, é mais diversificada e possibilita o uso de bancos de dados que eram indisponíveis quando a USLE foi desenvolvida. Desta forma, a RUSLE usa a mesma estrutura de fórmula que a USLE (Equação 4), mas com melhorias na estimativa dos fatores, uma vez que leva em conta combinações mais complexas de práticas de cultivo, técnicas de manejo e práticas de controle de erosão, bem como uma variedade mais ampla de formas de declive, possibilitando prever uma taxa média anual de erosão do solo para um local de interesse para qualquer número de cenários. Nesta perspectiva, a principal diferença entre os modelos USLE e RUSLE está nos valores dos fatores e na metodologia de como eles são derivados (NETELER; MITASOVA, 2002).

Porém, como modelo de erosão do solo mais amplamente utilizado, a eficiência da RUSLE é um desafio. Vários autores, ainda atualmente, avaliam seu desempenho em diferentes regiões do mundo. Mirakhorlo e Rahimzadegan (2020) investigaram a produção de sedimentos pela RUSLE por nove diferentes procedimentos de obtenção dos fatores, na bacia hidrográfica Talar, no Irã. Os resultados indicaram que o modelo estima de maneira eficiente a produção de sedimentos na bacia e que métodos de classificação de imagens para o fator de cobertura (C) oferecem os melhores resultados.

As equações USLE e RUSLE foram concebidas como ferramentas de grande importância para o apoio à decisão de gestão, estimando a taxa média de erosão durante um longo período de tempo (~20 anos). Porém, as equações não consideram como eventos isolados, que contribuem para o valor anual médio, negligenciando o domínio de eventos relativamente raros na determinação das médias de erosão de longo prazo (BAGARELLO *et al.*, 2017). Com isso, surge mais uma equação desenvolvida fundamentada na série USLE, a Modified Universal Soil Loss Equation (MUSLE) ou Equação Universal da Perda de Solo Modificada.

2.4.3 Modified Universal Soil Loss Equation (MUSLE)

As tentativas de aplicação da USLE para eventos de chuva individuais, levam a possíveis erros na estimativa, em razão de que a USLE não considera diretamente o escoamento superficial direto, o qual representa um componente-chave no transporte de sedimentos (KINNELL, 2005). Porém, modelos como a Equação Universal de Perda de Solo Modificada, ou Modified Universal Soil Loss Equation (MUSLE), parecem, em princípio, mais adequados para prever a erosão do solo em eventos de chuva isolados, pois incluem informações de escoamento superficial direto como uma variável adicional (BAGARELLO *et al.*, 2017).

Williams (1975) e Williams e Berndt (1977) propuseram a MUSLE, que substitui o fator de precipitação pelo fator de escoamento superficial direto, ou seja, a MUSLE se diferencia da USLE e RUSLE no fator R, substituindo a energia cinética da precipitação pelo efeito da vazão de pico e volume escoado (Equação 5), para eventos isolados na produção de sedimentos (WILLIAMS, 1975). Williams e Berndt (1977) demonstraram que esta alteração prevê, de maneira eficiente, a produção de

sedimentos, referindo-se ao potencial de perda de solo na saída na bacia hidrográfica para um evento de chuva individual.

$$PS = a (Qs qp)^b K L S C P \quad (5)$$

em que:

PS: produção de sedimentos na bacia devido a uma chuva individual (Mg);

Qs: volume de escoamento superficial direto do evento (m³);

qp: vazão de pico do escoamento superficial direto do evento (m³ s⁻¹);

K, LS, C, P: fatores da USLE descritos anteriormente;

a e b: coeficientes calibrados para a bacia em análise.

Entre os fatores empíricos necessários para a utilização deste modelo, estão os coeficientes de ajuste (“a” e “b”) que representam as condições locais. Vale ressaltar, que o ajuste dos coeficientes a e b é realizado com base em dados experimentais, desta forma, pode haver variação nas unidades de Qs e qp, sendo, portanto, importante observar para que unidades de Qs e qp os coeficientes a e b foram ajustados. Para as áreas onde a equação foi desenvolvida, esses coeficientes são considerados como 11,80 e 0,56, respectivamente (WILLIAMS, 1975). Essas constantes são para quando o fator K, de erodibilidade, estiver em unidades dos EUA. Quando o fator K estiver em Sistema Internacional de Unidades (SI), o coeficiente a passa a ser de 89,6 (FOSTER *et al.*, 1981). Além disso, esses coeficientes podem variar em função das condições fisiográficas e hidrológicas das bacias, uma vez que a relação de produção de sedimentos é muito variável (WILLIAMS, 1975). Assim, se os coeficientes a e b estiverem inadequados para as condições locais, pode ocorrer a super ou subestimativa da produção de sedimentos, reduzindo a eficiência das predições da MUSLE.

Apesar de estudos com a MUSLE indicarem um bom ajuste entre os valores da produção de sedimento calculados pelo modelo e os observados (AREKHI, 2008; SHEN *et al.*, 2009), há alguns casos em que os coeficientes de ajuste do modelo tiveram de ser modificados para melhor explicar o comportamento sedimentológico das bacias estudadas. Avanzi *et al.* (2008), para uma microbacia ocupada por plantações de eucalipto e floresta nativa, com ocorrência de Argissolo Amarelo e

Plintossolo, na região dos Tabuleiros Costeiros, Aracruz, Espírito Santos, obtiveram valores de 14,96 e 0,59 para os coeficientes a e b da MUSLE, respectivamente, ajustados para a bacia considerando Q_s em mm.

Dos Santos *et al.* (2014) objetivaram calibrar e validar os coeficientes a e b da MUSLE, para três coberturas no semiárido brasileiro. Para a calibração dos coeficientes foram empregados 50% dos dados registrados nas microbacias, utilizados para melhorar o coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe (1970). Foi analisado, também, o desempenho do modelo com os coeficientes originalmente recomendados por Williams (1975), sendo “ a ” e “ b ” com valor de 11,80 e 0,56, respectivamente. Os resultados obtidos pelos autores mostraram que os coeficientes de ajuste calibrados foram apropriados de acordo com o coeficiente de Nash e Sutcliffe, o índice de Willmott e o índice de confiança ou desempenho para as coberturas estudadas: Caatinga Nativa ($a = 36,80$ e $b = 0,55$), Caatinga Raleada ($a = 90,18$ e $b = 0,53$) e capim ($a = 48,57$ e $b = 0,43$). Porém, quando os autores aplicaram os coeficientes originalmente recomendados por Williams (1975), a modelagem apresentou altos erros de estimativa para as microbacias estudadas, evidenciando a importância da calibração desses coeficientes para cada região.

Ainda atualmente, os modelos de erosão do solo e previsão de sedimentos são avaliados e comparados em diferentes partes do mundo, uma vez que sua aplicação em áreas extensas e sem medição contínua é um verdadeiro desafio devido à disponibilidade e qualidade dos dados necessários. Djoukbala *et al.* (2019) avaliaram e compararam, com o auxílio de ferramentas de Sistema de Informações Geográficas (SIG), as taxas de erosão pelos três modelos (USLE, RUSLE, MUSLE) originados da Equação Universal de Perda de Solo, em Wadi Gazouana noroeste da Argélia. Os modelos USLE, RUSLE e MUSLE, produziram resultados relativamente semelhantes, entretanto do modelo MUSLE apresentou uma maior dispersão espacial do risco de erosão. Além disso, o modelo MUSLE apresentou maior eficácia nos fatores de precipitação, o que explica a maior taxa de erosão obtida por este modelo comparativamente com os demais.

Adegede e Mbajjorgu (2019), objetivando a estimativa da produção de sedimentos, calibraram e validaram o modelo MUSLE para a bacia hidrográfica de Ofuloko, localizada no centro-norte da Nigéria. Com dados de 20 eventos pluviométricos e medição de sedimento, os autores observaram a efetiva adequação

da MUSLE para estimar a produção de sedimentos na bacia, mostrando que os valores previstos e observados não diferiram significativamente pelos resultados da estatística de Qui-Quadrado 5%. Além disso, os autores identificaram pelo coeficiente de Nash-Sutcliffe que a estimativa foi aceitável para as aplicações hidrológicas, demonstrando que o modelo MUSLE é útil como feramente de gestão de bacias hidrográficas na região.

Diante da possibilidade de aplicação de modelos preditivos da produção de sedimentos em bacias hidrográficas, é interessante discutir as atualizações e aplicações desses modelos. Paiva *et al.* (2019) buscaram identificar o estado da arte em pesquisas realizadas no Brasil e na América Latina, sob o aspecto metodológico de avaliação de perda de solo e controle da erosão voltados a avaliação do impacto de iniciativas conservacionistas. Os autores realizaram um levantamento de 85 artigos científicos e identificam a USLE, RUSLE, MUSLE e SWAT dentre os modelos de maior aplicação para medição de potencial erosivo e geração de sedimentos, em que a maioria dos estudos 75% foram desenvolvidos em áreas agrícolas, seguido por florestas (28%) e pastagem (25%).

Capítulo 1 - Aplicabilidade de curvas-chave de sedimentos: análise no estado do Rio Grande do Sul

1 Introdução

Tendo em vista a adequada gestão dos recursos hídricos, o estudo e a compreensão dos fatores que integram os processos hidrossedimentológicos em bacias hidrográficas são de grande importância para minimizar os efeitos negativos da erosão do solo. Esses processos integram um ciclo aberto que envolve a separação, o deslocamento, o transporte e o depósito de partículas sólidas presentes na superfície da bacia (VAN PELT *et al.*, 2017).

O transporte das partículas sólidas, também chamado de transporte de sedimentos, em cursos d'água, está estreitamente associado a fatores geomorfológicos, climáticos, de uso, ocupação e manejo do solo e práticas agrícolas de uma bacia hidrográfica. Para ser monitorado e avaliado o transporte deve ser dividido em sedimentos em suspensão, sendo a parcela de partículas de maior predomínio, finas e leves que permanecem suspensas, e o de sedimento em arraste, que compreende uma menor parcela, porém de sedimentos mais grosseiros que se deslocam sobre o fundo do curso d'água (CARVALHO, 2008; POLETO, 2014; ZHANG *et al.*, 2012).

Para o conhecimento da dinâmica numa bacia hidrográfica, parte do transporte de sedimentos pode ser monitorada a partir da descarga sólida de sedimentos em suspensão (Q_{ss}), sendo sua quantificação importante, uma vez que influencia a qualidade da água, a capacidade de reservatórios (GHAFARI *et al.*, 2017), a pesca, a drenagem, a eutrofização de cursos d'água devido ao excesso de nutrientes (ZHANG *et al.*, 2012), a sedimentação de canais e o assoreamento de portos, bem como outros impactos ecológicos e recreativos (SADEGHI *et al.*, 2008).

No Brasil, a Agência Nacional de Águas (ANA) disponibiliza um portal integrante do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH), que oferece acesso ao banco de dados que contém todas as informações coletadas pela Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN). Essas informações reúnem dados climatológicos e hidrológicos, oriundos de coletas e registros de 12.731 estações pluviométricas e 9.748 estações fluviométricas, administradas pela ANA no país, das quais algumas (1747 estações), ainda insuficientes para o adequado conhecimento dos processos hidrossedimentológicos de algumas regiões, possuem informações de

concentração de sedimentos em suspensão (C_{ss}) associadas a vazões, o que permitem calcular a Q_{ss} .

As estações que realizam o monitoramento de sedimentos são denominadas de estações sedimentométricas e sua menor disponibilidade, comparativamente a estações fluviométricas (cota/vazão), está associada a dificuldades operacionais e financeiras (CARVALHO, 2008). Os esforços para assegurar o monitoramento de sedimentos são devido ao elevado custo de implementar e manter as amostragens, diante da necessidade de muitas saídas a campo, elevado número de medições, grande cuidado operacional desde a escolha e manutenção de equipamentos, equipe técnica especializada e análises de laboratório.

Considerando a necessidade de quantificar o transporte de sedimentos, para obtenção da descarga sólida, em diferentes bacias hidrográficas, de maneira mais acessível, perante as dificuldades operacionais supracitadas, ferramentas alternativas, tal como modelos empíricos de curvas-chave de sedimentos, têm sido aplicados para representar a relação entre a vazão e C_{ss} e/ou Q_{ss} (GAO *et al.*, 2018; HAPSARI *et al.*, 2019; HU *et al.*, 2011; TABATABAEI *et al.*, 2019). Em outras palavras, a curva-chave de sedimentos é utilizada devido à ausência de monitoramento do transporte de sedimentos de forma contínua (SADEGHI *et al.*, 2008). Desta forma, profissionais da área de recursos hídricos utilizam-na com frequência para converter hidrogramas em dados de descarga sólida. Contudo, mesmo com o uso e aplicação da curva-chave de sedimentos, faz-se necessário a realização de campanhas hidrológicas para a amostragem de sedimentos, uma vez que, é a partir delas e dos valores obtidos por elas que a curva-chave é gerada.

Apesar de seu uso geral, vários problemas são reconhecidos e devem ser levados em consideração por profissionais ao utilizar a técnica da curva-chave. Essas limitações e dificuldades da utilização da curva-chave, que serão discutidas a seguir, estão relacionadas, sobretudo, à alteração na relação entre Q e C_{ss} nos dados utilizados, à defasagem no tempo entre o hidrograma e o sedimentograma que existe, mas, pode não ser representada, como o impacto da histerese, além da escolha do modelo de função para o ajuste dos dados observados, bem como à dispersão dos valores sobre a linha de regressão podendo ocorrer a extrapolação de resultados que não estejam contemplados nos valores observados (ASSELMAN, 2000; HAPSARI *et al.*, 2019; HASSANZADEH *et al.*, 2018; SADEGHI *et al.*, 2008).

Invariavelmente, busca-se uma boa relação, ou seja, uma curva-chave que apresente alta correlação entre os dados (SADEGHI *et al.*, 2008). Porém, devido às alterações geomorfológicas e/ou de uso e manejo do solo, a relação entre os Q e C_{ss} pode ser modificada, apresentando alterações ao longo do tempo, em que curvas-chaves utilizadas no passado nem sempre representarão adequadamente a relação atual entre Q e C_{ss} (ZHANG *et al.*, 2012). Outra contrariedade das curvas-chave de sedimento é que o efeito da histerese nem sempre é identificado, representando o atraso na evolução de um fenômeno físico em relação a outro (MINELLA *et al.*, 2011; YANG; LEE, 2018), que neste contexto seria da Q e C_{ss}. De maneira geral, a dinâmica da Q e da C_{ss} durante os eventos não apresenta simultaneidade, em que o valor de pico da Q não necessariamente ocorre no mesmo instante que o da C_{ss} (MINELLA *et al.*, 2011). A limitação do uso da curva-chave de sedimentos, neste sentido, está associada à transformação de uma série de Q, principalmente séries contínuas de pequeno intervalo de tempo, em dados de C_{ss} e/ou de Q_{ss}, a partir da curva-chave, em que o efeito da histerese não será considerado.

De outro modo, incertezas nos valores previstos podem estar relacionadas também à forma estatística utilizada para ajustar as curvas-chave de transporte de sedimentos aos valores observados de vazão e de C_{ss} e/ou Q_{ss} (ASSELMAN, 2000), que por mais amplamente utilizadas elas sejam, para uma grande variedade de fins, elas podem subestimar ou superestimar os resultados. Na obtenção dos valores de C_{ss}, por exemplo, esses são normalmente subestimados quando se utiliza a regressão de mínimos quadrados de variáveis log-transformadas (COHN *et al.*, 1992).

Além disso, discordâncias na estimativa de C_{ss} e Q_{ss} mediante curvas-chave de sedimentos são originadas na extrapolação para determinação em altas vazões, que está relacionado com a quantidade e a qualidade dos dados observados (IADANZA; NAPOLITANO, 2006). Porém, na prática, a extrapolação da curva-chave é inevitável. Portanto, é importante conhecer quais são as incertezas que resultam do uso da curva-chave. Sadeghi *et al.* (2010) argumentam que coeficientes de determinação (R^2) menores que 50%, para os modelos testados na bacia de Khamesan, representaram um sinal de incapacidade das curvas-chave para estimar o transporte de sedimentos.

Da mesma forma, imprecisões estão associadas à dispersão dos valores sobre a linha de regressão, que entre outros fatores é causada por variações na oferta de

sedimento devido a efeitos sazonais, condições antecedentes na bacia hidrográfica e diferenças na disponibilidade de sedimentos no início ou no fim de um evento significativo de chuva (ASSELMAN, 2000). Estes fatores não são contabilizados pela curva-chave, contudo, ainda existe uma carência de estudos que avaliem a representatividade de tais curvas.

Considerações estatísticas mostram que resultados da aplicação da curva-chave podem ser obtidos incorretamente quando estimados a partir da utilização de todo o conjunto de dados (ASSELMAN, 2000; GAO *et al.*, 2018; GIROLAMO *et al.*, 2015). Para corrigir essa inadequabilidade, várias formas de dividir, usando conjuntos de dados subdivididos, têm sido recentemente aplicadas (HARRINGTON; HARRINGTON, 2013; HASSANZADEH *et al.*, 2018; TÓTH; BÓDIS, 2015; ZENG *et al.*, 2018). Zhang *et al.* (2012) sugerem a separação das vazões em períodos, ou dividi-las em trechos (de anos, épocas de seca e úmida, trimestres, meses, estações do ano ou primavera-verão e outono-inverno) e a partir disso curvas-chave podem ser traçadas isoladamente. Contudo, a dinâmica hidrossedimentológica e, portanto, o desempenho de curvas-chave de sedimentos em diferentes formas, são distintos para cada local, tornando importante a averiguação para regiões de interesse.

O estado Rio Grande do Sul contribuí expressivamente para produção agropecuária nacional, destinada tanto ao mercado interno como à exportação (FEIX; LEUSIN JÚNIOR, 2019). Desta forma, a concepção da dinâmica hidrossedimentológica e estudos de erosão do solo são de fundamental importância para essa região. Tendo em vista a disponibilidade de 87 estações sedimentométricas para o estado e a escassez de estudos nesta temática, o transporte de sedimentos pode ser analisado. O objetivo desta pesquisa foi avaliar a viabilidade de curvas-chaves de sedimentos em suspensão, empregando diferentes alternativas de subdivisões, com base na análise de dados, de estações sedimentométricas, disponibilizados para o estado do Rio Grande do Sul.

2 Metodologia

2.1 Descrição da área de estudo

O estado do Rio Grande do Sul (RS), compreendido pelos paralelos 27° 04' 49" e 33° 45' 00" Sul e pelos meridianos 49° 42' 22" e 57° 38' 34" Oeste, localiza-se no Sul do Brasil (Figura 1), e tem por limites o estado de Santa Catarina, Argentina e Uruguai, além do Oceano Atlântico, com uma área que abrange 281.738 km² (IBGE, 2016), dispendo de 497 municípios. Segundo a classificação de Köppen, o clima da região se enquadra no tipo "Cf" ou temperado úmido, apresentando chuva bem distribuída em todo o decorrer do ano. Na maioria do estado predomina o clima tipo "Cfa" apresentando temperatura do mês mais quente superior a 22°C (SPAROVEK *et al.*, 2007).

A codificação das estações da Agência Nacional de Águas (ANA) é adotada desde a década de 70, que, para conveniente aplicação do código, foi considerada então a divisão hidrográfica, sendo o país dividido por 8 regiões hidrográficas. Neste estudo, foram consideradas as estações sedimentométricas que estão inseridas no território do estado do Rio Grande do Sul (Figura 1), o qual tem áreas dentro de duas regiões hidrográficas: a do Uruguai e do Atlântico Sul, de codificação inicial de número 7 e 8, respectivamente. Essas regiões ainda são subdivididas em sub-bacias, que são representadas pelo segundo número do código. A bacia hidrográfica do Uruguai é subdividida em 9 sub-bacias, das quais 8 estão localizadas no Rio Grande do Sul e a região do Atlântico Sul possui 4 sub-bacias no estado.

2.2 Dados hidrológicos usados

A ANA disponibiliza dados de C_{ss} de estações sedimentométricas, que são postos onde são realizadas campanhas hidrológicas com amostragem de sedimentos em suspensão, dos quais ainda são pouco utilizadas comparativamente às estações fluviométricas e pluviométricas gerenciadas pela agência. Realizou-se um levantamento dessas estações (Figura 1), considerando o Rio Grande do Sul, com auxílio do Inventário das Estações Fluviométricas (ANA, 2009). Essa publicação divulga todas as estações cadastradas no Sistema de Informações Hidrológicas

(HidroWeb) e contém informações, tais como o código e o nome da estação, o nome do curso d'água, a entidade responsável, a localização geográfica, os demais tipos de parâmetros avaliados relativamente ao ponto considerado, a área de drenagem e o período de observação.

Os dados de Css disponibilizados pela ANA são oriundos de campanhas hidrológicas de medição de vazão x amostragem de sedimentos em suspensão, fornecidos na unidade de mg L^{-1} , cujas estações são monitoradas por entidades responsáveis.

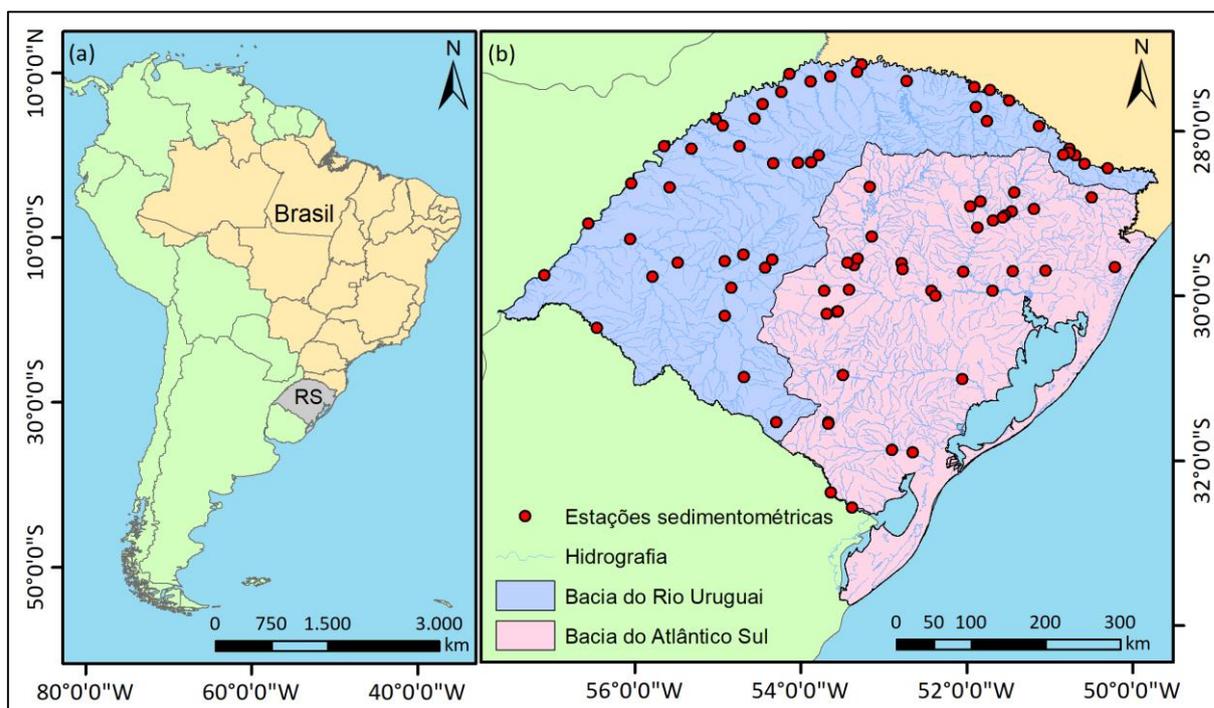


Figura 1 – (a) Localização do estado do Rio Grande do Sul (RS) no Brasil e na América do Sul e (b) localização das estações sedimentométricas registradas no sistema ANA no contexto das regiões hidrográficas do Uruguai e do Atlântico Sul, dentro do Rio Grande do Sul

Após ao levantamento inicial de 87 estações sedimentométricas para o estado (Figura 1), junto Hidroweb, fornecido pela ANA (<http://www.snirh.gov.br/hidroweb/>), identificou-se e eliminou-se aquelas que, apesar de estarem cadastradas no sistema, não continham dados de Css. As estações com disponibilidade de dados foram selecionadas e os dados organizados a fim de verificar a extensão do conjunto de dados, quantificar as estações que permanecem em funcionamento e as que encerraram as medições/amostragens e a partir disso obter os coeficientes de ajuste da curva-chave de sedimentos.

Associado ao período dos dados referentes às campanhas hidrológicas para determinação de C_{ss} , para cada estação sedimentométrica, séries de vazões médias anuais foram constituídas com auxílio do software System of Hydrological Data Acquisition and Analysis (SYHDA) (VARGAS *et al.*, 2019), a partir de dados de vazão diários disponibilizados pela ANA, para fins de aplicação do teste Mann-Kendall (MANN, 1945; KENDALL, 1975), por meio da rotina “Mann-Kendall with Missing Values and Same Values” desenvolvida por Lee (2020) em MATLAB (MATLAB, 2013), com o objetivo de verificar a existência de tendência nas séries históricas de vazão, para os períodos considerados. O teste Mann-Kendall é amplamente utilizado em pesquisas para examinar tendência em séries históricas de diferentes variáveis hidrometeorológicas (BLAIN; CAMARGO, 2012; BLAIN; MESCHIATTI, 2014; LI *et al.*, 2017; GAO *et al.*, 2017; CASSALHO *et al.*, 2017; DORNELES *et al.*, 2019), sendo que, para essa pesquisa, o resultado do teste, aplicado em cada uma das séries de vazões médias anuais, serviu como requisito de continuidade da modelagem.

2.3 Ajuste das curvas-chave de sedimentos

As curvas-chave de sedimentos devem ser baseadas em uma ampla gama de vazões, que requer medições em todas as condições de fluxo, incluindo um número suficiente de medições realizadas em alta vazão. Em vista disso, foi decidido realizar o ajuste das curvas-chaves utilizando todos os dados, em períodos subdivididos de 10 anos considerando como base o início das medições e subdivididos em intervalos de vazão (excedência de frequência de vazão em até 20%, de 20 a 70% e acima de 70%), para cada uma das estações sedimentométricas. A escolha do período de 10 anos de dados, se deu pelo fato de que, os dados disponibilizados pela ANA, têm como característica, a pouca quantidade de medições de vazão e amostragens de sedimentos realizadas anualmente. Portanto, por mais que, a maioria das estações apresente amostragens entre 30 e 40 anos de dados, a quantidade de medições totais por estação não é muito extensa, sendo ela, em média, o total de 60 campanhas hidrológicas. Entretanto, quando analisada a média da quantidade de campanhas hidrológicas realizadas em um ano, a quantidade é de duas por ano. Desta forma, se os dados fossem subdivididos em períodos menores, como por exemplo 5 anos,

muitos intervalos ficariam com número de campanhas hidrológicas insuficiente para fazer-se a modelagem da curva-chave de sedimentos.

Contudo, para dez estações analisadas (72430000, 73010000, 74470000, 75320000, 75500000, 76310000, 76440000, 85600000, 85623000 e 87380000), foi observado que, ao fechar os períodos de 10 anos de dados, algumas medições finais excederam o limite do último período subdividido, pois para divisão de 10 em 10 anos foi considerado o primeiro ano de campanha hidrológica. Desse modo, para essas estações, onde o critério foi de que apresentassem até 5 campanhas hidrológicas excedidas, para que não se descartassem esses dados, eles foram unidos aos demais do último período de divisão.

Da mesma forma, optou-se por testar outra forma de divisão dos dados para o ajuste das curvas-chave, discutida e recomendada por vários autores (ASSELMAN, 2000; SADEGHI *et al.*, 2008; GIROLAMO *et al.*, 2015; ZENG *et al.*, 2018), que consiste em dividir os dados em subconjuntos definidos em função das condições das vazões para cada uma das estações, definidas como: altas vazões, médias vazões e baixas vazões. Para isso, os dados foram divididos em três intervalos de excedência de frequência de vazão, como sugerido por Girolamo *et al.* (2015): (a) de 0 a 20% definidas como altas vazões; (b) de 20 a 70% consideradas médias vazões; e (c) acima de 70% determinadas como baixas vazões. Os valores de vazão considerados limitantes nos intervalos, para cada um dos subconjuntos, foram definidos para cada uma das séries, dependentes do intervalo de excedência de frequência.

Para aquelas estações que apresentam menor quantidade de dados observados, ao aplicar a subdivisão nos três intervalos de excedência de frequência supracitados, uma pequena amostra em cada intervalo foi constituída, impossibilitando o ajuste da curva-chave pela pequena quantidade de dados. Em vista disso, para as estações que apresentaram essa característica (73480000, 74800000, 76120000, 88680000), decidiu-se dividir os dados em apenas dois intervalos, considerando, desta forma, a excedência de frequência em 50%, definindo as altas vazões e baixas vazões.

Assim, aplicou-se a função da curva-chave em diferentes cenários, totalizando três tipos de análise, considerando tanto para os dados de C_{ss} quanto para Q_{ss}, sendo: 1) dados completos; 2) dados subdivididos em períodos de 10 anos; e 3) dados subdivididos pelas condições de vazão, por intervalos de excedência de frequência

de vazão de 50%. A comparação das curvas ajustadas em diferentes períodos de campanhas hidrológicas fornece uma indicação da robustez das curvas-chave de sedimentos sob momentos ligeiramente diferentes, bem como para condições de vazão.

A curva-chave de sedimentos em suspensão, para cada estação de monitoramento, conforme recomendado por Asselman (2000), Zhang *et al.* (2012) e Hassanzadeh *et al.* (2018), foi ajustada analiticamente à uma função de potência (Equação 6 e 7), considerando diretamente os dados de C_{ss} e transformando-os em Q_{ss} , respectivamente.

$$C_{ss} = a Q^b \quad (6)$$

$$Q_{ss} = a Q^b \quad (7)$$

em que:

C_{ss} : concentração de sedimentos em suspensão (mg L^{-1});

Q_{ss} : descarga de sedimentos em suspensão (t dia^{-1});

Q : vazão ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$);

a e b : coeficientes de ajuste.

A partir dos valores de C_{ss} determinados e da vazão, calcula-se a Q_{ss} , para obtenção da curvas-chave de sedimento por meio da utilização do valor de Q_{ss} , pela multiplicação da C_{ss} , do valor de vazão e de um fator de conversão de unidades, conforme Equação 8 (ASSELMAN, 2000; GARRIDO *et al.*, 2018; HOROWITZ, 2003; HASSANZADEH *et al.*, 2018), que corresponde à relação da C_{ss} com a velocidade que a mesma está sendo transportada no curso d'água, sendo expressa a quantidade transportada em massa por unidade de tempo:

$$Q_{ss} = 0,0864 C_{ss} Q \quad (8)$$

em que:

C_{ss} : concentração de sedimentos em suspensão (mg L^{-1});

Q_{ss} : descarga de sedimentos em suspensão (t dia^{-1});

Q: vazão ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$).

Na sequência, diferentes critérios estatísticos foram aplicados para avaliar a adequação do modelo das curvas-chaves ao conjunto de dados. Foi estimado o erro relativo percentual médio (ERP) a fim de avaliar o desempenho de cada curva-chave analisada. O ERP foi estabelecido para confrontar os valores de C_{ss} (ERP_{Css} - Equação 9) e Q_{ss} (ERP_{Qss} - Equação 10) estimados pela curva-chave com aqueles observados nas campanhas hidrológicas, como recomendado por Horowitz (2003) e Sadeghi *et al.* (2008), variando de zero a mais infinito, o qual espera-se valores mais próximos a zero, identificando menores erros associados.

$$\text{ERP}_{\text{Css}} = \frac{\sum \left[\left| \frac{\text{C}_{\text{ssCalc}} - \text{C}_{\text{ssObs}}}{\text{C}_{\text{ssObs}}} \right| \right]}{N} 100 \quad (9)$$

$$\text{ERP}_{\text{Qss}} = \frac{\sum \left[\left| \frac{\text{Q}_{\text{ssCalc}} - \text{Q}_{\text{ssObs}}}{\text{Q}_{\text{ssObs}}} \right| \right]}{N} 100 \quad (10)$$

em que:

C_{ssCalc}: concentração de sedimentos em suspensão estimada pelo modelo da curva-chave (mg L^{-1});

C_{ssObs}: concentração de sedimentos em suspensão observada (mg L^{-1});

Q_{ssCalc}: descarga de sedimentos em suspensão estimada pelo modelo da curva-chave (t dia^{-1});

Q_{ssObs}: descarga de sedimentos em suspensão observada determinada a partir dos dados de Q e C_{ss} observados (t dia^{-1});

N: número de observações.

Da mesma forma, para avaliar a qualidade do ajuste do modelo da curva-chave foi utilizado o coeficiente de determinação (R^2) (LEVINE; BERENSON; STEPHAN, 2000; YADOLAH, 2008), para o ajuste dos dados de C_{ss} (R^2_{Css} - Equação 11) e Q_{ss} (R^2_{Qss} - Equação 12). O R^2 , que pode variar de 0 a 1, é a medida descritiva da qualidade do ajuste obtido, ou seja, a variabilidade nos dados que é explicada pelo modelo de regressão ajustado, em que o valor de 1 indica perfeita relação entre os

dados observados e aqueles obtidos pelo modelo ajustado (ZHENG *et al.*, 2012; GIROLAMO *et al.*, 2015; ZENG *et al.*, 2018).

$$R^2_{C_{ss}} = \left(\frac{\sum (C_{ss_{Calc}} - \overline{C_{ss_{Calc}}}) (C_{ss_{Obs}} - \overline{C_{ss_{Obs}}})}{\sqrt{\sum (C_{ss_{Calc}} - \overline{C_{ss_{Calc}}})^2 \cdot \sum (C_{ss_{Obs}} - \overline{C_{ss_{Obs}}})^2}} \right)^2 \quad (11)$$

$$R^2_{Q_{ss}} = \left(\frac{\sum (Q_{ss_{Calc}} - \overline{Q_{ss_{Calc}}}) (Q_{ss_{Obs}} - \overline{Q_{ss_{Obs}}})}{\sqrt{\sum (Q_{ss_{Calc}} - \overline{Q_{ss_{Calc}}})^2 \cdot \sum (Q_{ss_{Obs}} - \overline{Q_{ss_{Obs}}})^2}} \right)^2 \quad (12)$$

em que:

$\overline{C_{ss_{Obs}}}$: média das concentrações de sedimentos em suspensão observadas (mg L⁻¹);

$\overline{Q_{ss_{Obs}}}$: média das descargas de sedimentos em suspensão observadas (t dia⁻¹).

Outro critério de eficiência utilizado foi o de Nash e Sutcliffe (NS), conforme definido por Nash e Sutcliffe (1970), descrito nas Equações 13 e 14, que determina a eficiência de um modelo em comparação com o valor médio observado.

$$NS_{C_{ss}} = \frac{\sum (C_{ss_{Obs}} - \overline{C_{ss_{Obs}}})^2 - \sum (C_{ss_{Calc}} - C_{ss_{Obs}})^2}{\sum (C_{ss_{Obs}} - \overline{C_{ss_{Obs}}})^2} \quad (13)$$

$$NS_{Q_{ss}} = \frac{\sum (Q_{ss_{Obs}} - \overline{Q_{ss_{Obs}}})^2 - \sum (Q_{ss_{Calc}} - Q_{ss_{Obs}})^2}{\sum (Q_{ss_{Obs}} - \overline{Q_{ss_{Obs}}})^2} \quad (14)$$

A eficiência da estatística NS mostra se o modelo aplicado fornece melhores estimativas do que a aplicação do valor médio observado. Valores de NS variam entre menos infinito e mais 1, onde 1 indica perfeita concordância entre as concentrações e descargas de sedimentos em suspensão observadas e calculadas. Valores negativos indicam que o valor médio da C_{ss} e Q_{ss} observada é uma estimativa melhor do que as obtidas pelo modelo (ASSELMAN, 2000).

3 Resultados e Discussão

3.1 Análise quantitativa e qualitativa da rede de monitoramento

Seguindo os critérios propostos, identificou-se que, no total, 87 estações sedimentométricas estavam devidamente registradas no portal Hidroweb/ANA, quando do desenvolvimento desta pesquisa que considerou uma análise até o final do ano de 2017, para o Rio Grande do Sul (RS). Contudo, verificou-se que destas, 63 efetivamente apresentam dados disponíveis para análise. As demais estão cadastradas no sistema, porém, não continham dados de Css. No Apêndices A são apresentadas informações acerca das 63 estações sedimentométricas cadastradas no sistema ANA, que possuem dados de Css, e informações, tais como, código da estação, nome da estação, tipo de monitoramento, curso d'água o qual a estação está inserida, entidade responsável, localização específica, área de drenagem, período de campanhas hidrológicas disponíveis até o ano de análise (2017) e número de campanhas. As informações faltantes no Apêndices A não estão disponibilizadas no Inventário das Estações Fluviométricas da ANA (ANA, 2009).

Pode-se observar, pelas informações contidas no Apêndices A, uma considerável amplitude dos dados, seguindo os valores máximos e mínimos de Css para as estações sedimentométricas do RS. As estações apresentam valores que abrangem desde pequenas Css máximas, como a estação 86100000 - Passo do Gabriel de 24,26 mg L⁻¹ até valores elevados como o máximo observado na estação 76440000 - Jaguari de 1965,5 mg L⁻¹. Da mesma forma, são observados valores mínimos de Css altos e baixos, como na estação 76380000 - Cacequi, com valor mínimo de 35,33 mg L⁻¹, com uma média de 85 mg L⁻¹, até o mínimo observado para todas as estações que foi apresentado pela estação 86410000 - Passo Barra do Guaiaveira com valor mínimo de 0,06 mg L⁻¹.

A World Meteorological Organization ou Organização Meteorológica Mundial (WMO, 2008) recomenda uma densidade mínima de 1 estação sedimentométrica a cada 12.500km², considerando uma média para regiões costeiras, montanhosas, interiores planas e onduladas. Considerando o levantamento feito, julgando-se para a área do RS, o número de estações disponibilizadas pela ANA está em conformidade com a densidade mínima sugerida. Contudo, isso não significa que este valor seja

suficiente para projetos de engenharia e gestão de recursos hídricos na região. As estações com e sem disponibilidade de dados, bem como, a situação atual operacional das estações e a extensão dos dados, são apresentadas na Figura 2.

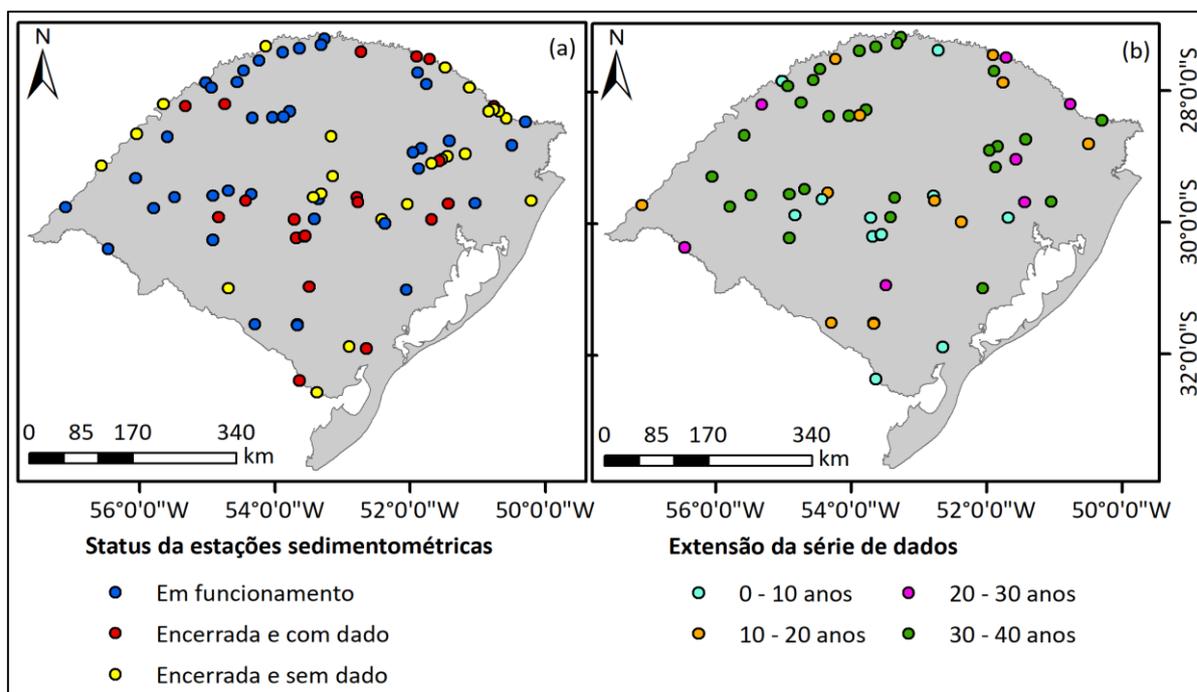


Figura 2 – (a) Status de funcionamento das estações sedimentométricas considerando o ano de 2017 como consulta; (b) Extensão dos dados sedimentométricos de cada estação considerando até o ano de 2017.

Observa-se na Figura 2 que a maioria das estações com dados disponíveis estão em devido funcionamento (42), ou seja, com registros de dados atuais, o que é interessante do ponto de vista da continuidade na atualização das curvas-chave. As demais estações (21) encerraram as campanhas hidrológicas ou apresentam como último registro uma data antiga. Das 63 estações, 48% possuem dados que cobrem um período entre 30 a 40 anos. Dessas, apenas duas não estão mais em funcionamento, as demais seguem com o monitoramento. Esta situação é de extrema importância em função de que, quanto maior a extensão dos dados, presumivelmente, maior seja a abrangência das vazões (períodos secos e de chuva), aumentando a confiabilidade das curvas-chave (ZHANG *et al.*, 2012). Como critério de continuidade para o ajuste da curva-chave, identificou-se que apenas uma (75186000) das 63 estações sedimentométricas apresentou tendência na série de vazão média anual pelo resultado do teste Mann-Kendall. Esta estação foi eliminada das análises.

3.2 Ajuste da curva-chave de sedimento em suspensão

As curvas-chave de sedimento foram ajustadas para os dados de C_{ss} e Q_{ss} completos, subdivididos nos períodos de 10 anos e em intervalo de vazões, para cada estação sedimentométrica no estado. Foi possível estimar os valores dos coeficientes *a* e *b* para os dados de C_{ss} e Q_{ss} em 58 das estações analisadas. Isto ocorreu, uma vez que, a estação 75186000 foi eliminada da análise por apresentar tendência de acordo com o teste Mann-Kendall, que serviu de requisito para as demais etapas da modelagem. Para as demais (85620000, 85625000, 87035000 e 88220000) não foi obtida a curva-chave, pois essas apresentam poucas campanhas hidrológicas disponíveis (menos de 5 medições) o que torna inviável a aplicação da metodologia da curva-chave, considerando-se viável a aplicação da metodologia a partir da disponibilidade de 6 medições. A Tabela 1 e 2 apresentam um resumo dos resultados da aplicação dos índices estatísticos, NS e R² e ERP, respectivamente, aos dados de C_{ss} e Q_{ss} completos, subdivididos em períodos de 10 anos e subdivididos em intervalos de vazão.

Tabela 1 – Número e porcentagens de estações com NS positivo, para o ajuste do modelo da curva-chave aos dados de C_{ss} e Q_{ss}, para os cenários para dados completos, período de 10 anos e intervalo de vazão para as estações analisadas

Índices estatísticos	Dados completos	Período de 10 anos	Intervalo de vazão
NSC _{ss} (N+)	29	105	51
NSC _{ss} % (+)	50	62	32
NSQ _{ss} (N+)	56	137	98
NSQ _{ss} % (+)	96	84	61

NSC_{ss} (N+): número de estações com valores positivos do índice Nash Sutcliffe (NS) para o ajuste aos dados de C_{ss}; NSC_{ss} % (+): porcentagem de estações com valores positivos do índice de Nash Sutcliffe (NS) para o ajuste aos dados de C_{ss}; NSQ_{ss} (N+): número de estações com valores positivos do índice Nash Sutcliffe (NS) para o ajuste aos dados de Q_{ss}; NSQ_{ss} % (+): porcentagem de estações com valores positivos do índice de Nash Sutcliffe (NS) para o ajuste aos dados de Q_{ss}.

Tabela 2 – Estatística descritiva dos índices estatísticos de R² e ERP, para o ajuste do modelo da curva-chave aos dados de Css e Qss, para os cenários para dados completos, período de 10 anos e intervalo de vazão para as estações analisadas

Índices estatísticos	Dados completos				Período de 10 anos				Intervalo de vazão			
	Média	Mín	Máx	Desv Pad	Média	Mín	Máx	Desv Pad	Média	Mín	Máx	Desv Pad
R ² Css	0,19	7E-04	0,67	0,15	0,28	7E-07	0,87	0,22	0,12	2E-05	0,83	0,16
ERPCss %	101	39	296	54	97	27	1939	154	89	19	473	65
R ² Qss	0,70	0,37	0,92	0,14	0,70	0,02	0,95	0,22	0,35	12E-04	0,88	0,25
ERPQss %	91	34	298	44	95	27	1949	154	89	19	473	65

R²Css: valores do Coeficiente de Determinação aplicado aos dados de Css; ERPCss %: valores de erro relativo percentual médio, em %, aplicados aos dados de Css; R²Qss: valores do Coeficiente de Determinação aplicado aos dados de Qss; ERPQss %: valores de erro relativo percentual médio, em %, aplicados aos dados de Qss.

A avaliação de NSC_{css} (Tabela 1) mostrou que, após os dados de Css serem subdivididos em períodos de 10 anos, mais estações apresentaram valor de NS positivos, o que indicaria que o ajuste do modelo da curva-chave apresentou melhora. Das 58 estações com dados completos, no total, após a divisão no período, obteve-se 168 novas subdivisões, em que em 105 dessas, ou seja 62%, a estatística de NSC_{css} mostrou que o modelo da curva-chave aplicado fornece melhores estimativas do que a aplicação do valor médio (valores positivos). Anteriormente, para as 58 com dados completos, esse comportamento do NSC_{css} era em 50% das estações (29 estações). Entretanto, quando subdivididos em intervalo de vazão os NSC_{css} indicou apenas 32% positivos.

Contudo, ao se analisar as estatísticas de ERPC_{css} e R²C_{css} para os dados de Css subdivididos em períodos de 10 anos, comparativamente aos dados completos, há uma pequena superioridade no ajuste do modelo, porém, esta percepção de melhora não é tão evidente como expresso na estatística de NSC_{css}. Para R²C_{css}, os resultados foram próximos, e considerados valores baixos, uma vez que resultados do índice estatístico de R² inferiores a 0,50 são um sinal de incapacidade das curvas-chave para estimar sedimentos (SADEGHI *et al.*, 2010).

Os dados de Css foram subdivididos em intervalos de vazão considerando os intervalos de excedência de frequência. Para esses resultados, pode-se observar que somente o \overline{ERPC}_{css} apresentou uma sucinta melhora no resultado médio, as demais estatísticas médias ($\overline{R^2}_{css}$ e NSC_{css}) os resultados pioraram. Desta forma, analisando

os resultados médios dos índices estatísticos é possível afirmar que entre todas os cenários testados, tanto para os dados de C_{ss} quanto Q_{ss}, a aplicação da curva-chave aos dados subdivididos em intervalos de vazão apresentaram as piores precisões na estimativa.

Para todas as estações sedimentométricas, quando os valores de C_{ss} foram transformados em Q_{ss} e o modelo aplicado aos dados completos, os resultados das estatísticas mudaram expressivamente. Desta forma, houve uma grande diferença de eficiência na estimativa de valores de Q_{ss} comparativamente àqueles de C_{ss} pelas curvas-chave ajustadas aos dados completos. Esse entendimento, se deu, essencialmente, a partir dos resultados das estatísticas de eficiência de NS e R². Com os dados completos de Q_{ss} somente em duas estações, das 58, a estatística de NSQ_{ss} indicou que o valor médio de Q_{ss} observado é uma estimativa melhor do que os obtidos pelo modelo (96% positivos). O comportamento do R²Q_{ss} para os valores de Q_{ss}, oriundos das curvas-chave ajustadas a esses dados completos, foi muito contrastante quando se analisa para os valores de C_{ss}. Em contrapartida, quando a mesma verificação é feita com o ERP, observa-se que para esta estatística os resultados não apresentaram discrepância entre os dados de Q_{ss} e C_{ss}. Diante disso, identifica-se que as estatísticas de NS e R² foram mais sensíveis à troca de valores iniciais (C_{ss} x Q_{ss}) do que o ERP. Contudo, pode-se verificar que, diferentemente das C_{ss}, as Q_{ss} não apresentaram melhora considerável no ajuste do modelo quando foram subdivididas em períodos de 10 anos.

Observa-se na Tabela 2 que os valores mínimos para o R² foram obtidos quando o modelo foi aplicado aos dados de C_{ss} e os máximos quando o modelo foi aplicado aos dados de Q_{ss}. O menor $\overline{R^2}$ foi obtido quando o modelo foi aplicado aos dados de C_{ss} subdivididos em intervalos de vazão e a maior $\overline{R^2}$ para os dados de Q_{ss} completos e subdivididos em períodos de 10 anos. Os valores mais altos de ERP foram observados quando o modelo foi aplicado para C_{ss} e Q_{ss} para o cenário de subdivisão em períodos de 10 anos, indicando piores ajustes. Sendo o menor valor de ERP quando o modelo foi aplicado aos dados subdivididos em intervalos de vazão. Ainda para esse índice estatístico, o maior valor de \overline{ERP} foi obtido para os dados completos de C_{ss} e o menor para C_{ss} e Q_{ss} subdivididas em intervalo de vazão. Para a estatística de NS o melhor resultado foi o ajuste aos dados completos de Q_{ss} com 96% de NS positivos e o pior para C_{ss} subdivididos em intervalo de vazão (32%).

Analisando os índices estatísticos, observou-se que o $\overline{R^2Q_{ss}}$, não apresentou diferença entre o conjunto completo e subdivididos em períodos de 10 anos (0,70), porém, quando subdivididos em intervalo de vazão o $\overline{R^2Q_{ss}}$ diminuiu consideravelmente (0,35). Da mesma forma, para aplicação da curva-chave nos dados completos de Q_{ss} e subdivisão em período de 10 anos, 96 e 84% apresentaram NS positivo, indicando que o modelo estima melhor os valores do que o valor médio para a série, entretanto quando as foram subdivididas em intervalos de vazão esse índice passou para apenas 61%. Desta forma, pelo conjunto dos resultados dos critérios estatísticos de eficiência, é verificado que, a estimativa, pelo ajuste do modelo da curva-chave de sedimentos, apresenta-se melhor quando aplicado aos dados de Q_{ss} completos do que para as outras formas testadas (C_{ss} completas, C_{ss} subdivididas em períodos de 10 anos, C_{ss} subdividida em intervalo de vazão, Q_{ss} subdivididas em períodos de 10 anos e Q_{ss} subdividida em intervalo de vazão).

É importante ressaltar, que cada um dos índices estatísticos se comporta de uma maneira diferente para cada conjunto de dados e, da mesma forma, para as diferentes subdivisões. Nesta perspectiva, é interessante notar a importância de utilizar-se um conjunto de índices estatísticos de eficiência para avaliar um modelo aplicado a um conjunto de dados. Para melhor avaliação dos índices estatísticos a Figura 3 apresenta os resultados relacionados para cada um dos cenários, descritos na forma de boxplots.

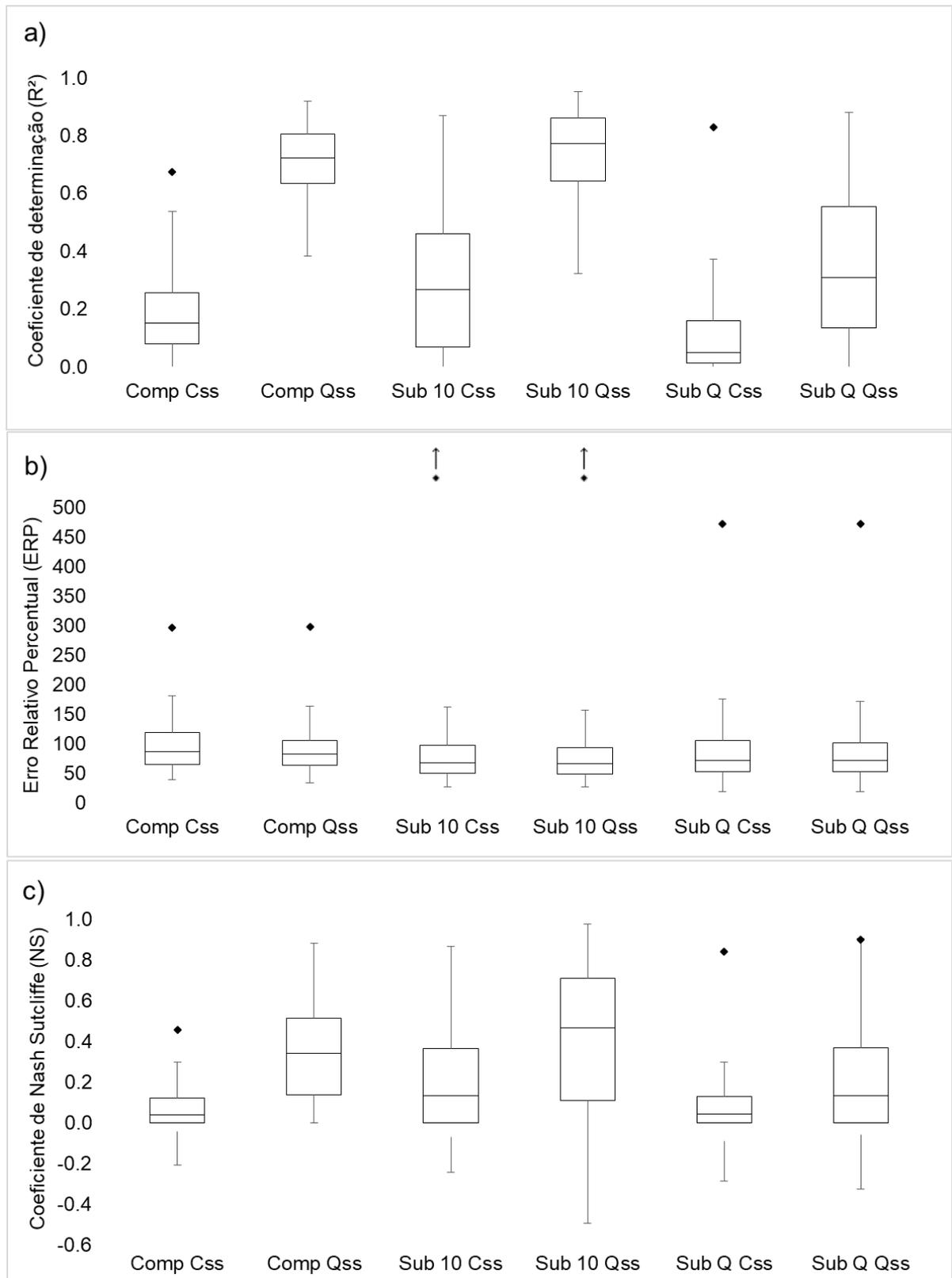


Figura 3 – Boxplot representando os resultados do (a) R^2 , (b) ERP e (c) NS, para o ajuste da curva-chave de sedimentos aos dados de Concentração de sedimentos em suspensão (C_{ss}) e Descarga de sedimentos em suspensão (Q_{ss}), completos (Comp), subdivididos em período de 10 anos (Sub 10) e subdivididos em intervalos de vazão (Sub Q)

A partir da interpretação da Figura 3 pode-se observar que, corroborando com os resultados das Tabelas 1 e 2, o ajuste do modelo da curva-chave de sedimentos se mostrou mais adequado quando aplicado aos dados de Qss, por apresentar valores de R^2 maiores, ERP menores e mais estações com valores positivos de NS, indicando melhores ajustes comparativamente aos de Css. Para os dados completos de Qss, nos três índices estatísticos (R^2 , ERP e NS), foi possível observar um comportamento simétrico dos resultados. Entretanto, quando a posição da linha da mediana é mais próxima ao terceiro quartil, os dados são assimétricos negativos, o que foi notável, nos três índices, para os dados completos de Css e na subdivisão de Css em intervalos de vazão. Contudo, um comportamento de assimetria positiva também foi percebido, porém, desta vez para os dados de Qss na subdivisão em períodos de 10 anos.

Para os resultados do R^2 , observa-se na Figura 3a que esse índice estatístico mostrou-se mais sensível à troca de cenários, uma vez que, apresentou maior variação dos resultados entre o ajuste de Css e Qss. Outra questão, foi a maior dispersão dos resultados para esse índice estatístico, ou seja, foi possível perceber um maior intervalo interquartil, que é a diferença entre o terceiro quartil e o primeiro quartil (tamanho das caixas), principalmente pelos resultados do ajuste na subdivisão em períodos de 10 anos para os dados de Css e subdivisão em intervalos de vazão para os dados de Qss.

Em contrapartida, quando se analisa os resultados para o ERP (Figura 3b), este mostrou maior estabilidade às mudanças de cenários e menor dispersão dos dados pelo intervalo interquartil, ou seja, menores caixas, em comparação com os demais índices estatísticos. Além disso, observa-se a posição dos dados frente à posição da mediana, demonstrando resultados próximos entre si. Porém, outra questão que pode ser discutida, nos resultados do ERP, é a presença de outliers mais significativos, que indicam possíveis valores discrepantes. Esses valores superiores foram observados em todos os cenários testados, similares entre si quando se alternava de dados de Css para Qss, porém, distintos entre os diferentes cenários. Destaca-se, neste sentido, os valores de outliers para os dados subdivididos em períodos de 10 anos, os quais não foram apresentados na Figura 3 (indicados por setas), uma vez que, os valores são de aproximadamente 1900%, (valores máximos apresentados na Tabela 2), o que prejudicaria a análise visual.

Para o índice estatístico de NS (Figura 3c), os resultados apresentaram-se com uma maior dispersão dos dados, ou seja, maior variabilidade entre os dados, destacando os resultados para os dados completos de Qss, subdivididos em períodos de 10 anos de Css e Qss e subdivididos em intervalos de vazão para Qss. Já para a subdivisão em períodos de 10 anos para Css e subdivididos em intervalos de vazão para Qss os resultados foram muito similares, com um comportamento de assimetria negativa.

Tratando-se da aplicação prática desses resultados, destaque-se a importância de se utilizar um conjunto de índices estatísticos quando objetiva-se avaliar o desempenho e o comportamento de um determinado modelo ajustado a um conjunto de dados. Essa questão, evidenciou-se pela variação obtida entre os índices estatísticos aplicados, que por mais que apresentassem concordância entre seus resultados, mostraram-se sensíveis de maneiras diferentes à variação de cenários de subdivisão e propostas de dados de entrada.

3.2.1 Ajuste da curva-chave de sedimento em suspensão aos dados de Css

Os coeficientes a e b das curvas ajustadas para os três cenários para os dados de Css e o resultado dos testes de eficiência são apresentados no Apêndice B.

3.2.1.1 Ajuste da curva-chave aos dados completos de Css

Observa-se no Apêndice B que para os dados completos de Css as estações que apresentaram menor ERPCss foram a estação Cascata Burica Nova (74610000) com 39% ($R^2_{Css}=0,67$), Porto Lucena (74800000) com 41% ($R^2_{Css}=0,66$), Passo do Ricardo (88680000) com 42% ($R^2_{Css}=0,15$), seguido de Linha Cascata (74750000) com 47% ($R^2_{Css}= 0,18$) e Sanga Funda Montante (88177000) com 49% ($R^2_{Css}=0,37$). Para todas essas, segundo o NSC_{Css}, a metodologia da curva-chave se mostrou uma estimativa melhor que o valor médio das Css (valores positivos), exceto para Linha Cascata (74750000) que apresentou o NSC_{Css} igual a -0,11.

Os resultados encontrados de ERPCss aos dados completos de Css, mostraram que 21 estações apresentaram um ERPCss acima de 100% com $\overline{R^2_{Css}}$ de 0,13, e 5 estações tiveram um ERPCss abaixo de 50% com $\overline{R^2_{Css}}$ de 0,41. Neste

sentido, Sadeghi *et al.* (2010), ao aplicarem diferentes modelos de curvas-chaves, testados para bacia de Khamesan no Irã, consideram que coeficientes de determinação (R^2) menores que 50% são um sinal de incapacidade das curvas-chave para estimar sedimentos. Desta forma, como considerações estatísticas do ERPCss, observou-se no Apêndice B que, para algumas das estações, o erro assumido pode ser considerado alto, indicando que o modelo ajustado não representa satisfatoriamente a variação de C_{ss} em função de Q. Assim, indica-se que se utilize, para cálculos adicionais, o menor ERPCss possível, associando ainda a valores das estatísticas, como o NSC_{ss} e R^2 C_{ss}, onde serão encontradas as relações mais coerentes.

Outra observação que é notável, diante desses resultados, que o R^2 C_{ss} tende ligeiramente a aumentar com a diminuição do ERPC_{ss}. Sadeghi *et al.* (2008), ao aplicarem dezessete modelos para obtenção da curva-chave de sedimentos, para séries de C_{ss} e Q, para uma bacia no Japão, obtiveram valores de ERP (19 – 431%) e R^2 (0,10 – 0,90). Os autores reconheceram, juntamente aos critérios estatísticos de eficiência, que a função de potência foi o melhor modelo para descrever essa relação para a bacia, com desempenho global de ERP de 153%, R^2 de 0,53, Erro Padrão da Estimativa de 0,70 e NS igual a 0,32.

Para os dados completos de C_{ss}, observa-se, no Apêndice B, que das 58 estações sedimentométricas, em 50% delas o NSC_{ss} indicou que o valor médio da C_{ss} observada é uma estimativa melhor do que as obtidas pelo modelo (valores de NSC_{ss} negativos). Para essas estações, o ERPC_{ss} variou de 47% para estação 74750000 Linha Cascata (R^2 C_{ss}=0,18), a 297% para estação 74470000 Três Passos (R^2 C_{ss}=0,05), com um $\overline{\text{ERPC}}_{\text{ss}}$ de 123%. O R^2 C_{ss} para o ajuste desses dados teve seu valor mínimo de 0,001 para estação 77150000 Uruguaiana (ERPC_{ss}=118%), e o máximo de 0,33 para estação 85730000 Passo Linha Do Rio (ERPC_{ss}=285%), com um valor $\overline{R^2C}_{\text{ss}}$ de 0,09.

Nos demais dados de C_{ss} completos (29), a estatística NSC_{ss} indicou que o modelo é uma estimativa melhor do que o valor médio das C_{ss} (Apêndice B). Para essas, o ERPC_{ss} variou de 39% (R^2 C_{ss}=0,67) para estação 74616000 Cascata Burica Nova em que essa estação foi a que apresentou menor ERPC_{ss} nos valores ajustados dentre todas as estações, a 132% (R^2 C_{ss}= 0,270) para estação 85623000 São Sepé - Montante, apresentando valor $\overline{\text{ERPC}}_{\text{ss}}$ de 80%. O R^2 C_{ss} para o ajuste desses dados

variou de 0,13 para estação 76560000 Manoel Viana (ERPCss=82%) a 0,67 para estação 74610000 Cascata Burica – Nova (ERPCss=39%), com um de $\overline{R^2C_{ss}}$ de 0,28.

De forma geral, para os dados completos de C_{ss}, observa-se no Apêndice B, que aquelas que a estatística de NSC_{ss} apresentou valores negativos (indicando que o valor médio de C_{ss} é uma estimativa melhor que os valores do modelo), o valor de $\overline{ERPC_{ss}}$ foi maior (123%) e $\overline{R^2C_{ss}}$ menor (0,09) quando comparados aos que a estatística NSC_{ss} apresentou valores positivos (indicando que o modelo é uma estimativa melhor que o valor médio dos dados), em que $\overline{ERPC_{ss}}$ foi de 80% e $\overline{R^2C_{ss}}$ de 0,28. Isto mostra uma concordância entre os critérios estatísticos de eficiência aplicados.

Ao analisar os dados das estações sedimentométricas verificou-se a baixa relação nos valores de diversas estações. Foi observado, que o mesmo valor, ou valores muito próximos, de Q observados, em diferentes datas, por exemplo, apresentaram valores muito discrepantes de C_{ss}, não apresentando boa relação. Esta peculiaridade, tem impacto na qualidade dos ajustes das curva-chaves e, portanto, nos resultados das estatísticas de eficiência, de ERP, NS e R², obtidos entre os valores observados e estimados pela curva-chave (ASSELMAN, 2000). Essa particularidade de distinção percebida nos dados de C_{ss} associadas a Q, está de acordo com o que foi diagnosticado por Schmidt e Morche (2006). Os autores constataram, a partir de dados de C_{ss}, em duas pequenas bacias montanhosas dos Alpes Bávaros na Alemanha, que a correlação entre C_{ss} e Q é geralmente pobre.

Neste aspecto, algumas justificativas podem ser empregadas a fim de fundamentar essa desigualdade nos valores medidos. As curvas-chave podem não apresentar bom ajuste em função da não utilização da mesma seção de monitoramento no curso d'água, da mudança de equipamentos e técnicos para as medições, de erros associados ao processamento dos dados, e das mudanças nas vazões em períodos distintos de monitoramento (CARVALHO, 2008). Para esta última, que pode ser aplicada ao caso das estações consideradas neste trabalho, Zhang *et al.* (2012) sugerem a separação das vazões desses períodos, ou dividi-las em trechos (períodos de anos, períodos secos e úmidos, trimestres, meses, estações do ano ou períodos de primavera-verão e outono-inverno) e a partir disso curvas-chave podem ser traçadas isoladamente.

3.2.1.2 Ajuste da curva-chave aos dados de Css subdivididas em períodos de 10 anos

Para algumas das estações analisadas, como indicado na literatura (HAPSARI, 2019), quando os dados de Css foram subdivididos em períodos em 10 anos, o $\overline{\text{ERPCss}}$ apresentou-se menor do que quando o modelo da curva-chave foi aplicado aos dados completos (de até 40 anos), onde o $\overline{\text{ERPCss}}$ expressou maior valor e o resultado de $\overline{\text{R}^2\text{Css}}$ menor (Tabela 2). Na estação 77150000, por exemplo, quando os valores de Css foram ajustados à curva-chave, os ERPCss, na subdivisão em períodos, foram de 76% e 51% para o período de 1998 a 2007 e 2008 a 2017, respectivamente, enquanto que quando se utilizou o conjunto completo, o ERPCss foi de 118% (Apêndice B). Do mesmo modo, observa-se no Apêndice B, para estação 74100000 anteriormente à divisão, o ERPCss e R^2Css apresentava um valor de 114% e 0,17 respectivamente, e após apresentaram-se para três períodos (1978 a 1985, 1998 a 2007 e 2008 a 2017) em 36% e 0,23, 68% e 0,47 e 53% e 0,55, respectivamente. Isso ocorre uma vez que, ao se dividir um grupo de dados extensos, minimiza-se diversas possíveis interferências e mudanças que podem ocorrer no ambiente, diminuindo o ERP, aumentando o R^2 e a qualidade do ajuste. Essas mudanças podem gerar modificações nos valores de Css observados, para a mesma Q, característica identificada em algumas estações.

Possíveis alterações de uso do solo na bacia hidrográfica, a qual o curso d'água está inserido, podem ser discutidas nesse sentido, em virtude de exercerem considerável influência no comportamento da erosão e transporte de sedimentos, afetando, desta forma, as relações entre Q e Css (HAPSARI, 2019). Práticas conservacionistas, associadas ao uso e manejo adequados do solo, por exemplo, quando implementadas em bacias hidrográficas podem reduzir os efeitos do escoamento superficial, a erosão do solo e cerca de 75% da produção de sedimentos (YAEKOB *et al.*, 2020). Quando se utiliza os dados completos, essas alterações podem não ser detectadas, uma vez que, utiliza-se dados de monitoramento ao longo de anos, por exemplo 40 anos de campanhas hidrológicas. Porém, quando se utiliza as séries subdivididas, em períodos de 10 anos ou mesmo para intervalos de vazão, esse efeito pode ser reduzido e por isso o ajuste poderá apresentar melhora. Neste caso, vale ressaltar, que por mais que o teste de Mann-Kendall, para detecção de

tendências, tenha sido usado, ele foi aplicado para as séries de vazões médias anuais, uma vez que, os dados de C_{ss} não podem ser considerados séries históricas, pois não é realizado monitoramento contínuo e sim poucas amostragens ao ano.

De forma semelhante, outra aplicabilidade da subdivisão dos dados é a facilidade na identificação de períodos onde estariam possíveis erros nas medições, como é possível perceber na estação 74100000 em que a subdivisão apresentou, de forma geral, melhora na eficiência do ajuste do modelo, mas foi no primeiro período subdividido, 1978 – 1985, que a melhora foi menor comparativamente aos outros. Esses períodos de menor eficiência podem ser eliminados para o ajuste do modelo, aumentando a confiabilidade do valor de C_{ss} e Q_{ss} para uma dada Q . Porém, um ponto a ser considerado na subdivisão dos dados é que, após a subdivisão, o número os dados apresentam-se mais reduzido do que quando se utiliza os dados completos. Isto resulta na menor amplitude das vazões consideradas e conseqüentemente tende a maiores incertezas para a extrapolação dos valores, podendo gerar maiores discordâncias na estimativa de C_{ss} e Q_{ss} utilizando a curva-chave (IADANZA; NAPOLITANO, 2006).

A melhora no ajuste do modelo da curva-chave em dados subdivididos em períodos de 10 anos foi verificada por Zhang *et al.* (2012). Os autores aplicaram o modelo da curva-chave em três estações sedimentométricas para a bacia do rio das Pérolas na China, dividindo 50 anos de dados em diferentes décadas (1950, 1960, 1970, 1980, 1990 e 2000). Os autores identificaram que a menor confiabilidade dos valores de C_{ss} estimados das curvas-chave e a menor eficiência do modelo ocorreu quando o modelo foi aplicado aos dados completos.

Observou-se então que a eficiência do modelo da curva-chave pode aumentar quando os dados de C_{ss} são subdivididos, observado principalmente pelos resultados de NSC $_{ss}$. Desse modo, quando são subdivididos em períodos menores do que o completo, possibilita-se a melhor eficiência na utilização do modelo da curva-chave em um ou mais períodos da série, não descartando a utilização desse modelo para aquela dada estação, como quando apresentava baixa eficiência por se usar o conjunto completo. Outra característica que foi possível observar é que, para grande maioria das estações, a característica de baixa eficiência do ajuste do modelo está nos anos iniciais de medição, no começo, principalmente aquelas que iniciaram suas medições a partir da década de 70.

De outro modo, para as estações 72300000, 75500000, 85740000, o modelo mostrou-se uma ferramenta inviável, tanto aplicado aos dados completos, subdivididos em períodos de 10 anos, quanto para subdivididos em intervalos de vazão, mostrando baixa relação entre os dados. Para essas estações o R^2_{Css} está dentre os menores observados. Isto foi também discutido e apresentado por Zeng *et al.* (2018) que, ao aplicarem o modelo da curva-chave aos dados completos e em métodos de subdivisão tradicionais (agrupamentos sazonais e hidrológicos, por exemplo), o modelo se apresentou inapropriado e precisou ser melhorado para ser utilizado para estimativa da C_{ss} enquanto aplicado a bacia do rio Yarlung Zangbo na Ásia. Os autores atribuíram a inadequabilidade a possíveis interferências devido às características do clima, topografia e relevo da região.

Neste aspecto, dois pontos podem ser discutidos: um seria o ganho de informação que se obtém quando os conjuntos de C_{ss} são subdivididos em menores períodos, uma vez que assim, pode-se identificar em qual período específico está a possível desconformidade dos dados de C_{ss} , não afetando totalmente a aplicação do modelo à estação, como quando se utiliza as C_{ss} por completo; e o outro é que foi perceptível que, as medições que iniciaram na década de 70, os dados de C_{ss} não mostraram boa coerência para a maioria das estações analisadas, podendo esse período ser desconsiderado, utilizando-se o restante dos períodos para futuras análises.

3.2.1.3 Ajuste da curva-chave aos dados de C_{ss} subdivididos em intervalos de vazão

Analisando os resultados médios dos índices estatísticos é possível afirmar que, entre todos os cenários testados, tanto para os dados de C_{ss} quanto Q_{ss} , a aplicação da curva-chave aos dados subdivididos em intervalos de vazão apresentaram as piores precisões na estimativa. Esses resultados vão na contramão do que traz algumas pesquisas na literatura, como Asselman (2000) que aplicou o modelo da curva-chave de sedimentos, na forma de função de potência, para vários locais ao longo do rio Reno, noroeste da Europa, e seus principais afluentes, e utilizando diferentes procedimentos de adaptações e distintas forma de subdivisão, o autor verificou que a eficiência do modelo da curva-chave aumenta quando os dados

de Css são subdivididos, principalmente quando divididos por fases de descarga (vazões altas e baixas). Por outro lado, Tóth e Bódis (2015), ao aplicarem curvas-chaves para estimar a Css no rio Danúbio, Hungria, diagnosticaram que as subdivisões em intervalos de vazão, não melhoraram significativamente a precisão da estimativa.

Girolamo *et al.* (2015) avaliaram a aplicabilidade de curvas-chave de sedimentos, desenvolvidas em função das condições hidrológicas: vazões altas, normais e baixas, para estimar as Css no rio Celone, Itália. Os autores verificaram que o método proposto provou ser efetivo para gerar os dados de Css para as vazões altas e normais, porém, foi possível observar que o método tende a subestimar para as vazões altas. Para a pesquisa de Girolamo *et al.* (2015), é interessante ressaltar, para obtenção dos dados observados foram realizados monitoramentos contínuos, além de amostragens frequentes de Css durante eventos de cheias, para o fluxo normal, bem como em baixas vazões, diferentemente dos dados disponibilizados e utilizados neste trabalho provindos de esparsas amostragens.

Nesta perspectiva, é importante considerar a particularidade dos dados de Css utilizados neste trabalho, os quais são oriundos de campanhas hidrológicas para amostragem de sedimento em suspensão, que em muitas das estações ocorre somente duas vezes ao ano. Este fato, foi discutido na seção da metodologia, correspondendo inclusive ao critério de seleção do período de anos para subdivisão (10 anos), visto que, por mais que a maioria das estações apresente um conjunto de dados entre 30 e 40 anos, os dados disponibilizados pela ANA, apresentam pouca quantidade de amostragens realizadas anualmente. Para se entender essa dimensão, a quantidade de dados total para as 63 estações sedimentométricas analisadas variam de 7 ao máximo de 92 amostragens, com uma média de 60 amostragens.

Esta característica é mais significativa quando os dados são subdivididos. Desta forma, vale ressaltar, que a quantidade de amostragens de sedimentos para as estações analisadas neste trabalho, quando os dados foram subdivididos em intervalos de vazão foi muito inferior (média de 21 dados) comparadas ao número de amostragens das demais pesquisas utilizadas nesta discussão. Asselman (2000) subdividiu de diferentes formas as séries de dados de Css, considerando também intervalos de vazão, para aplicação da curva-chave, porém o autor, dispunha de séries completas de no mínimo 5.000 dados. Girolamo *et al.* (2015), possuía para aplicação

da curva-chave em intervalos de vazão, uma série completa de 210 dados, os quais, após o ajuste do modelo, foi possível observar que os intervalos que apresentavam menor quantidade de dados (vazão média N=63 e vazões baixas N=10) obteve-se os menores coeficientes de determinação. Hassan (2014) defende que a quantidade de dados para aplicação do modelo da curva-chave de sedimentos é uma limitação, e que esta pode ser superada com a obtenção de mais dados observados. Da mesma forma, Hapsari (2019) e Horowitz (2008) observaram que a eficiência do ajuste depende fortemente da frequência de amostragem, que inclui a quantidade de dados disponíveis para desenvolver a curva-chave de sedimentos em suspensão, uma vez que ao reunir mais dados observados, a grande variação nos dados de campo pode ser minimizada.

Para os dados subdivididos em intervalos de vazão, a qualidade do ajuste do modelo da curva-chave de sedimentos parece ser mais sensível em relação ao número de campanhas hidrológicas e quantidade de dados, podendo apresentar piora nos resultados quando subdivididos desta forma. Entretanto, algumas estações, individualmente, apresentaram melhora na estimativa quando os dados foram subdivididos em intervalos de vazão, como é o caso da estação 70700000 (Passo do Socorro). Neste caso, vale ressaltar que todas essas circunstâncias devem ser consideradas para cada uma das estações separadamente, pois cada uma apresenta diferentes comportamentos em relação aos cenários, bem como para os índices estatísticos utilizados. Além disso, outras formas de subdivisão de dados têm sido apresentadas na literatura. Zeng *et al.* (2018) propuseram novos métodos de subdivisão para a curva-chave de sedimentos, baseados em intervalos de C_{ss}, para um rio do Planalto Tibetano na Ásia. Os autores identificaram que em comparação com a curva-chave baseada na série completa e dos métodos de subdivisão sazonal e intervalos de vazão, os métodos propostos puderam melhorar a estimativa da carga sedimentar suspensa, com R² e NS mais altos, menores viés e erros da raiz quadrada médio.

3.2.2 Ajuste da curva-chave de sedimento em suspensão aos dados de Q_{ss}

As curvas-chave de sedimentos foram, da mesma forma, ajustadas para os dados de Q_{ss} completos, subdivididos nos períodos de 10 anos e em intervalo de

vazões, para cada estação sedimentométrica do estado do RS. Os coeficientes a e b das curvas ajustadas para os três cenários para os dados de Q_{ss} e o resultado dos testes de eficiência são apresentados no Apêndice C.

3.2.2.1 Ajuste da curva-chave para os dados completos de Q_{ss}

Para o ajuste das curvas-chave quando os valores de C_{ss} foram transformados em Q_{ss} e o modelo aplicado aos dados completos, para todas as estações sedimentométricas, os resultados das estatísticas mudaram expressivamente (Apêndice C), principalmente o de NS e R^2 , comparativamente quando aplicado aos de C_{ss} . Com os dados completos de Q_{ss} somente em duas estações, das 58, a estatística de NSQ_{ss} indicou que o valor médio de Q_{ss} observado é uma estimativa melhor do que os obtidos pelo modelo (76440000 Jaguari com $ERPQ_{ss}=158\%$ e $R^2Q_{ss}=0,63$; e 88181000 Arroio Candiota Jusante com $ERPQ_{ss}=92\%$ e $R^2Q_{ss}=0,85$), contrariando os resultados quando o modelo foi aplicado aos dados completos de C_{ss} (50% apresentaram esse comportamento). Para as demais (56), a estatística NSQ_{ss} apontou que o modelo é uma estimativa melhor do que o valor médio das Q_{ss} . Para essas últimas o $ERPQ_{ss}$ variou de 34 a 298% com um $\overline{ERPQ_{ss}}$ de 91% e R^2Q_{ss} de 0,37 a 0,92 com um $\overline{R^2Q_{ss}}$ de 0,70.

Observa-se no Apêndice C que para os dados completos de Q_{ss} as estações que apresentaram maiores R^2Q_{ss} foram a estação 77500000 Quaraí com R^2Q_{ss} de 0,92 ($ERPQ_{ss}=51\%$), 88177000 Sanga Funda Montante com R^2Q_{ss} de 0,91 ($ERPQ_{ss}=49\%$), 74610000 Cascata Burica – Nova com R^2Q_{ss} de 0,89 ($ERPQ_{ss}=38\%$), 85600000 Passo das Tunas ($ERPQ_{ss}=55\%$) e 74800000 Porto Lucena ($ERPQ_{ss}=34\%$) com R^2Q_{ss} de 0,88, seguida da estação 85730000 Passo Linha do Rio com R^2Q_{ss} de 0,87 ($ERPQ_{ss}=43\%$) e 88181000 Arroio Candiota Jusante R^2Q_{ss} de 0,85 ($ERPQ_{ss}=92\%$).

É evidente que os valores de R^2Q_{ss} maiores não necessariamente estão associados a valores menores de $ERPQ_{ss}$, porém verifica-se que as estações que obtiveram valores maiores de R^2Q_{ss} , apresentaram valores baixos de $ERPQ_{ss}$. Essas estações, com exceção da 88181000 Arroio Candiota Jusante, apresentaram valores de NSQ_{ss} que apontaram que o modelo da curva-chave é uma estimativa melhor que o valor médio das Q_{ss} (valores positivos). Nesta perspectiva, é interessante notar a

importância de utilizar-se um conjunto de testes estatísticos de eficiência para avaliar um modelo aplicado aos dados.

A melhora na estimativa das curvas-chave quando se utiliza os valores de Qss comparativamente aos de Css ocorre devido à consideração da vazão (Q) na transformação de Css em Qss (Equação 8), que de qualquer forma, o valor de Q seria usado para transformar Css em Qss. A vazão é utilizada posteriormente na aplicação do modelo da curva-chave (eixo de abcissa), o que aumenta a correlação dos valores de Qss e Q, por em Qss já estar integrado o valor de Q, diferentemente de quando utiliza-se a Css diretamente. Neste aspecto, esta transformação de Css para utilização de Qss no ajuste, serve como alternativa para aplicação da modelo da curva-chave quando ao aplicar aos dados de Css a estimativa seja ineficiente.

Quando analisados os dados de entrada de Qss para aplicação do método da curva-chave, verificou-se que as baixas relações encontradas nas Css, como valores muito próximos de Q observados apresentavam valores muito distintos de Css, o que impactava na qualidade dos ajustes, foram, possivelmente, suavizadas quando o ajuste do modelo da curva-chave foi aplicado aos dados de Qss. Esse comportamento foi obtido pela transformação dos valores de Css para Qss e consideração da Q para essa transformação, influenciando positivamente na eficiência no ajuste, a qual apresentou-se melhor segundo as estatísticas (NS e R²). De forma geral o ajuste do modelo da curva-chave apresentou um comportamento mais adequado quando aplicado aos dados de Qss, comparativamente aos de Css, evidenciando ainda que os melhores resultados para aplicação do conjunto de índices estatísticos foram obtidos quando o modelo da curva-chave foi aplicado aos dados completos de Qss.

3.2.2.2 Ajuste da curva-chave aos dados de Qss subdivididos em períodos de 10 anos

Na aplicação do modelo da curva-chave para as Qss anteriormente à subdivisão, observa-se no Apêndice C, que apenas em duas estações (76440000 e 88181000) a estatística de NSQss mostrou que os valores médios de Qss eram mais adequados para estimar as Qss do que propriamente o modelo da curva-chave (valores negativos de NSQss). Porém, quando esses dados foram subdivididos em períodos de 10 anos, esse comportamento do NSQss foi verificado em 24 dos 168

novos conjuntos. Nestes 24 os valores de $\overline{R^2Qss}$ e \overline{ERPQss} foram de 0,49 e 119%, respectivamente.

Os maiores valores de R^2Qss ficaram para o primeiro período da estação 74610000 ($ERPQss=37\%$) e da 85600000 ($ERPQss=52\%$), o último período da estação 75700000 ($ERPQss=37\%$) e o segundo período da estação 76310000 ($ERPQss=56\%$) e 77500000 ($ERPQss=49\%$), todos esses períodos com R^2Qss de 0,95, indicando melhores ajustes. Para os resultados de $ERPQss$ os menores valores foram encontrados no último período da estação 75185000 com 27%, último período da estação 76800000 com 31% ($R^2Qss=0,92$), seguido de 34% no terceiro período da estação 75155000 ($R^2Qss=0,85$). Os resultados entre os índices estatísticos de R^2 e ERP foram coerentes, uma vez que para R^2Qss elevados obteve-se valores considerados baixos de $ERPQss$, mostrando uma concordância entre os critérios estatísticos de eficiência aplicados.

Para os dados completos de Qss , 86% apresentaram R^2Qss acima de 0,50, contudo, quando subdivididos em períodos de 10 anos, esse percentual de ajuste diminuiu para 81%. Em contrapartida, para os resultados de $ERPQss$, 70% dos dados completos de Qss apresentaram $ERPQss$ inferiores a 100%, e quando subdivididos em períodos de 10 anos, 77% apresentaram $ERPQss$ inferiores a 100%. Diante disso, verificou-se que pela estatística R^2Qss a subdivisão em períodos de 10 anos prejudicou ligeiramente o ajuste do modelo da curva-chave. Esses resultados são inversos do que foi verificado na estatística do $ERPQss$. Mesmo assim, indica-se verificar os resultados dos índices estatísticos para cada estação de interesse separadamente, uma vez que nesta pesquisa, em decorrência do grande número de estações analisados foram apresentados os valores médios para ERP e R^2 , bem como as porcentagens de adequações para todas as estações em conjunto.

Sadeghi *et al.* (2008) afirmam que onde curvas-chave de sedimentos não se caracterizam adequadamente, a interação de fatores espaciais e temporais é um dos principais problemas enfrentados. Ainda segundo os autores, propriedades hidráulicas do curso, oscilações no uso do solo ou seu efeito nos processos de erosão, distribuição temporal da intensidade da chuva e fatores pedológicos, são importantes, mas mascaram a simplicidade da aplicação da curva-chave de sedimentos. A intensa utilização do solo e dos recursos hídricos também podem ser discutidas neste sentido, pois geram impactos sobre a bacia hidrográfica, decorrendo uma complexa interação

líquido-sólido. Considerando que a erosão hídrica e o transporte de sedimentos estão estreitamente associados com o uso e manejo do solo, como já discutido na subdivisão em períodos de 10 anos dos dados de C_{ss} , torna-se importante o conhecimento da dinâmica dos sedimentos numa bacia hidrográfica (GHAFARI *et al.*, 2017) a fim de relacionar com possíveis mudanças nas C_{ss} ao decorrer do tempo. Nesta perspectiva de alterações na bacia hidrográfica, no caso do ajuste da curva-chave aos dados de Q_{ss} subdivididos em períodos de 10 anos, a subdivisão não interferiu positivamente ao ajuste, diferentemente do que foi visto e discutido para os dados de C_{ss} subdivididos.

Nos cenários de subdivisão, em períodos menores, é importante considerar que o número de medições fica menor do que quando se trabalha com os dados completos. Isso pode tornar mais frequente a necessidade de extrapolar os valores provindos da curva-chave, ou seja, buscar a estimativa de valores elevados da relação $Q \times Q_{ss}$, que não estão contemplados no ajuste da curva-chave. Neste sentido, pode-se citar, por exemplo, a estação 74370000 (Palmitinho), a qual apresenta 81 dados completos, com uma média de $74 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e 247 t dia^{-1} . Após a subdivisão em períodos de 10 anos, obteve-se 4 novos períodos, 1978 a 1987, 1988 a 1997, 1998 a 2007, 2008 a 2017, de 17 dados com média de $33 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e 275 t dia^{-1} , 9 dados com média de $61 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e 101 t dia^{-1} , 29 dados com média de $115 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e 360 t dia^{-1} , e 26 dados com média de $60 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e 152 t dia^{-1} , respectivamente. Observa-se, nesta perspectiva, que o primeiro período da subdivisão apresenta uma média de vazão consideravelmente menor do que os outros períodos ($33 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), com um valor máximo de $72 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Isto significa que para esse período se fosse necessário utilizar a curva-chave ajustada e obter o valor de Q_{ss} para uma Q próxima a $200 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (valor que já ocorreu no conjunto de dados, que está presente no 3º período da subdivisão), seria necessário a extrapolação da curva-chave para o alcance desse valor. A extrapolação dos valores, para determinação de Q_{ss} em altas Q , é uma das justificativas para discordâncias na estimativa de C_{ss} e Q_{ss} mediante curvas-chave de sedimentos, e está diretamente relacionada com a quantidade dos dados observados.

Sadeghi *et al.* (2008) discutem que a vantagem do modelo da curva-chave de sedimentos é que, uma vez desenvolvido, pode ser aplicado à dados passados de vazão, para reconstruir registros de transporte de sedimentos a longo prazo, ou para preencher lacunas nos registros existentes. No entanto, os autores afirmam que uma

das principais deficiências na aplicação das curvas na extrapolação dos dados de sedimento é que a suposição necessária de estacionariedade dos valores é muitas vezes questionável. Desta forma, a extrapolação para estimar os valores de C_{ss} e Q_{ss} , em altas vazões, não contempladas no ajuste da curva-chave, pode estar associada a erros e geralmente levam à subestimação. Ao aplicarem o ajuste da curva-chave de sedimentos em seis pontos ao longo da bacia hidrográfica de Hinotani-ike, localizada na província de Mie, no centro-sul do Japão, Sadeghi *et al.* (2008) não dispunham também de séries completas extensas, as quais variavam de 162 a 48 amostragens. Os autores também discutiram o fato de, desta forma, aumentar as chances de extrapolar valores para estimativa (SADEGHI *et al.*, 2008). Segundo Hassanzadeh *et al.* (2018), esse viés na estimativa está diretamente relacionado com a distribuição das amostragens (altas e baixas vazões) e que já vem sendo buscado a utilização de coeficientes de correção, aplicados às equações das curvas, a fim de diminuir a diferença entre os dados estimados e os observados, especialmente em altas vazões.

3.2.2.3 Ajuste da curva-chave aos dados de Q_{ss} subdivididos em intervalos de vazão

Quando as Q_{ss} foram subdivididas em intervalos de vazões os resultados médios dos índices estatísticos apresentaram piora quando comparado aos dados completos de Q_{ss} e subdivididos em períodos de 10 anos (Tabela 2). Novamente, como para os dados de C_{ss} , esses resultados vão em desacordo do que é mostrado na literatura. Girolamo *et al.* (2018) avaliaram a descarga de sedimentos em suspensão, utilizando várias técnicas de estimativa, realizadas no rio Celone, Itália. Os autores concluíram que, se forem adotadas estratificações de dados com base no regime de fluxo por exemplo, ao invés da utilização dos dados completos, a precisão melhora consideravelmente. Essa característica no ajuste do modelo da curva-chave de sedimentos também foi identificado por Sadeghi *et al.* (2008), que observaram que, ao subdividir as séries de C_{ss} , para uma bacia no Japão, em dois subconjuntos, que representaram altas vazões e baixas vazões, e aplicarem diferentes metodologias de curvas-chave isoladamente, a relação entre C_{ss} e Q melhorou consideravelmente e

levou a modelos mais confiáveis, no qual o erro de estimativa foi substancialmente reduzido.

A condição da quantidade dos dados que, da mesma forma, foi discutida para o ajuste da curva-chave aos dados de C_{ss} subdivididos em intervalos de vazão, similarmente, pode ser tratada aqui aos dados de Q_{ss}. Neste sentido, pode-se destacar ainda a pesquisa de Sadeghi *et al.* (2008) que não dispunha também de séries completas extensas (extensão máxima de 162 amostragens), que após aplicarem a subdivisão em intervalos de vazão, variaram de 87 a 16 amostragens. Os autores optaram por não discutir, porém, demonstraram nos resultados que, em um dos 6 pontos onde os dados foram coletados e o ajuste da curva-chave de sedimentos foi realizado, a subdivisão que apresentou menor quantidade de dados ajustados (vazão média N=31) foi onde obteve-se o maior erro na estimativa (ERP=244%), sendo esse ERP superior ainda sobre o ajuste aos dados completos.

Vale ressaltar também, que pesquisas como Asselman (2000) e Girolamo *et al.* (2015) dispunham de maior quantidade de valores, uma vez que realizavam monitoramento contínuo, além de amostragens frequentes de C_{ss} para obtenção dos dados observados, para o ajuste da curva-chave. Assim, já é visto na literatura que a eficiência do ajuste da curva-chave de sedimentos está relacionada à frequência de amostragem e quantidade de dados disponíveis, reunindo assim mais dados observados e considerando suas possíveis variações (HAPSARI, 2019; HOROWITZ, 2008).

3.3 Análise dos coeficientes e interpretação das curvas-chave

Os coeficientes *a* e *b* da curva-chave de sedimentos, foram estimados para 58 estações sedimentométricas distribuídas no Rio Grande do Sul. Esses coeficientes, estimados por análise de regressão, não têm um significado físico propriamente dito, no entanto, algumas interpretações são muitas vezes atribuídas, como quando associados com a morfologia leito do rio ou com a erodibilidade do solo. De acordo com Zhang *et al.* (2012), altos valores do coeficiente *a* indicam que os solos podem ser facilmente erodidos. Em outras palavras, sedimentos disponíveis e transportados pelo escoamento numa bacia podem ser analisados pelo coeficiente *a*, que quando apresenta altos valores caracteriza regiões que apresentam materiais intensamente

disponíveis (MORGAN, 1995; ASSELMAN, 2000). Esta representação pode ser observada na estação 88680000 Passo do Ricardo que apresentou o maior valor para o coeficiente a (Apêndice B e Apêndice C), dentre as estações analisadas na aplicação do modelo, apresentando o valor de 141,9 e 12,26, para os dados completos de C_{ss} e Q_{ss} , respectivamente. Por conseguinte, a estação 85580000 Passo do Verde, da mesma forma, apresentou um valor alto do coeficiente a .

Pesquisas discutem e relacionam características específicas da bacia hidrográfica, na qual a estação de monitoramento está inserida, como topografia e relevo, uso e ocupação, classes de solos presente, com a quantificação do transporte de sedimento (YAEKOB *et al.*, 2020; ZHANG *et al.*, 2012). O coeficiente b , por outro lado, é utilizado para indicar a unidade erosiva do rio. Quando apresenta valores elevados indica um forte aumento de transporte de sedimento com um aumento na vazão do rio (ASSELMAN, 2000).

Para as estações analisadas neste estudo, o coeficiente b manteve-se com um comportamento semelhante para todos os ajustes. Para o ajuste do modelo da curva-chave nos dados completos de C_{ss} e Q_{ss} o valor máximo de b foi observado para estação 87590000 Passo do Caçõ de 1,540 e 2,54, respectivamente, e o mínimo para 88680000 Passo do Ricardo de -0,219 e 0,781, respectivamente. Para subdivididos em período de 10 anos de C_{ss} e Q_{ss} , os valores variaram de 2,55 e 3,55 a -1,71 e -0,706 para a estação 87590000 Passo do Caçõ e 75700000 Passo do Novo, respectivamente.

O comportamento das variáveis $Q \times C_{ss}$ e Q_{ss} pode também ser interpretado pelos valores de a e b estimados. Neste sentido, pode-se discutir que, valores de a e b positivos indicam que a correlação entre os dados da Q e C_{ss} e Q e Q_{ss} são positivos, ou seja, ao aumentar a vazão do curso, obtém também um aumento da C_{ss} e Q_{ss} . Por outro lado, quando a modelagem apresenta um valor negativo de b , por ele estar presente na potência da equação da curva-chave, significa que com o aumento da vazão, tem-se a diminuição dos valores da C_{ss} e Q_{ss} . Para os dados completos de C_{ss} , isto foi detectado somente na estação 88680000 Passo do Ricardo que apresentou um valor de b de -0,219 (Apêndice B). No enquanto, quando subdividido, pode-se observar no Apêndice B, que houve um aumento da aparição de valores negativos de b , em que, de 168 novos conjuntos, 22 demonstraram esse comportamento. Neste último caso, é interessante ressaltar que, para a grande

maioria dessas subdivisões (21), o R^2 Css apresentou valor menor que 0,50, e em 13 o ERPCss foi acima de 100%, demonstrando baixa eficiência do ajuste do modelo. Quando se considera os dados completos de Qss valores negativos do coeficiente b não foram observados, enquanto que nos subdivididos isto foi verificado somente no segundo período da estação 75700000.

Este comportamento negativo do coeficiente b , que acarreta na diminuição da Css e Qss ao aumento da Q, não é esperado, tampouco comum de acontecer, podendo ser atribuído à dispersão dos dados e à falta de uma boa representação da curva-chave. Contudo, valores negativos do coeficiente b , também foram identificados em duas séries de Css subdivididas, para o período de verão, por Asselman (2000). Além disso, o autor reconheceu que, semelhantemente aos resultados desta pesquisa, ao aplicar a curva-chave na série completa, este comportamento parece ser suavizado, apresentando valores negativos de b somente nas séries quando subdivididas. Neste sentido, esse comportamento de aumento da vazão o qual acarretaria diminuição de descarga sólida, pode acontecer em um curso d'água com muito material rochoso por exemplo, o que diminuiria a produção de sedimento pelo aumento da vazão, pelo efeito de diluição.

De outro modo, a curva-chave de sedimento se dá pela combinação dos coeficientes a e b . Desta forma, é apropriado que, além de se analisar os coeficientes separadamente, também levar em consideração a inclinação e a forma da própria curva-chave, que podem ser empregadas para inferir sobre fatores e processos hidrológicos específicos. Para as estações analisadas neste estudo, os gráficos que representam a metodologia da curva-chave, para os conjuntos completos tanto de Css como Qss, têm uma inclinação que se move para cima, na maior parte das estações, exibindo um padrão semelhante, o que significa que a Css e Qss mostram uma tendência crescente com a Q. A tendência de crescimento das curvas-chaves é um fenômeno já esperado no comportamento das séries sedimentométricas (ZHANG *et al.*, 2012), significando que há um aumento da Css e Qss com a elevação da Q, representando também uma boa correlação entre os dados da série. Vários estudos também diagnosticaram essa representação, tais como Asselman (2000), Zhang *et al.* (2012), Heng e Suetsugi (2014) e Girolamo *et al.* (2015).

As estações que apresentaram as curvas-chave de característica mais íngreme, quando usando os dados completos de Css, foram as estações 74800000

(menor coeficiente a encontrado) e 74900000 que, de forma equivalente, obtiveram os maiores valores de NSCss de 0,46 e 0,37, respectivamente, bem como ERPCss baixos, de 41 e 66%, e R²Css maiores que 0,50, de 0,66 e 0,51 respectivamente. Para os dados completos de Qss as estações que apresentaram essa característica foram a 70200000 (R²Qss=0,65; ERPQss=97%; NSQss=0,22) e 74800000 (R²Qss=0,88; ERPQss=34%; NSQss=0,58) que apresentou menor coeficiente a de 0,0002. Discutindo-se neste aspecto, curvas-chave íngremes devem, portanto, ser características de cursos d'água com pouco transporte de sedimentos ocorrendo em baixas vazões, o que indica que o aumento da Q resulta em um impulso na C_{ss}, conseqüentemente na Q_{ss}, sugerindo que fontes importantes de sedimentos ficam disponíveis quando o nível d'água aumenta, e que os materiais são transportados coincidentemente com as vazões superiores (ASSELMAN, 2000; ZHANG *et al.*, 2012).

Porém, observou-se que em algumas estações esse comportamento crescente é quase imperceptível. Para os conjuntos completos de C_{ss} esta característica foi observada nas estações 70700000, 74370000, 74470000, 76440000, 77150000, 79400000, 85400000, 86470000 e 86510000. Já para os completos de Q_{ss} 74470000 e 76440000. Estas estações apresentam um comportamento mais plano, indicando que com o aumento da Q não há um aumento considerável da C_{ss} e Q_{ss}. Esta característica está em conformidade aos resultados encontrados por Sadeghi *et al.* (2008), que relataram que em geral, a inclinação das curvas-chaves ajustadas, para a bacia de Hinotani-ike, localizada na província de Mie, no centro-sul do Japão, é relativamente baixa, sendo relacionada à disponibilidade de sedimentos suspensos na área de estudo, em combinação com o poder erosivo do escoamento para transportar este material.

Heng e Suetsugi (2014) explicam que uma curva plana revela que sedimentos ou depósitos sedimentares soltos estão disponíveis para transporte em quase todas as faixas de Q, indicando também a características de seções de cursos d'água com materiais intensamente intemperizados. Contudo, isto também pode ser encontrado em cursos d'água límpidos, pouco turvos e com predominância de materiais mais grosseiros sendo transportados, o que compreende o transporte em arraste.

No entanto, para algumas estações onde o ajuste da curva-chave foi aplicado ao conjunto completo de C_{ss} (76120000, 85580000, 85730000 e 88680000), as curvas-chave se mostraram com tendências decrescentes, ou seja, com a inclinação

para baixo, representando que, com o aumento da Q, há uma diminuição da C_{ss}. Já para o ajuste do modelo no conjunto completo de Q_{ss} esta característica não foi verificada. Este comportamento da diminuição da C_{ss} com o aumento da Q, não é tão comum de acontecer, mas podendo ser encontrado em alguns cursos d'água (ASSELMAN, 2000).

É interessante discutir nesse sentido que quando o modelo foi ajustado para as C_{ss} e as curva-chaves apontaram tendências decrescentes, as estações apresentam algumas semelhanças entre si. Em primeiro aspecto, essas estações disponibilizam um pequeno número de medições de C_{ss} realizadas, de 12, 9, 8 e 11, para 76120000 Ponte Toropi, 85580000 Passo do Verde, 85730000 Passo Linha do Rio e 88680000 Passo do Ricardo, respectivamente, em que de fato, desconsiderando a estação 76380000 Cacequi que apresenta 7 medições e um comportamento crescente, as estações supracitadas são as estações com menor número de medições fornecido. Este comportamento decrescente então, pode estar associado a não representatividade adequada desses dados, por ainda apresentarem poucas medições (GIROLAMO *et al.*, 2018).

Outra característica similar entre essas estações é que os conjuntos de C_{ss} apresentam uma curta extensão de anos de dados, com poucos anos de monitoramento (entre 3 e 7 anos). Além disso, quando analisados os resultados das estatísticas de ajuste da curva-chave, essas estações, com exceção da 88680000, a estatística de NSC_{ss} mostrou que o valor médio de C_{ss} é uma estimativa melhor do que os resultados do modelo ajustado, bem como apresentam altos valores do ERPC_{ss} para a relação entre C_{ss} e Q.

É possível ressaltar as estações sedimentométricas que apresentaram os maiores picos de C_{ss} entre as analisadas. Destacou-se primeiramente a estação 76440000 que conteve uma C_{ss} de 1965,5 mg L⁻¹, depois a 79400000 com 1311,1 mg L⁻¹, seguido de 74370000 com 1275,0 mg L⁻¹, 75155000 com 1125,5 mg L⁻¹ e 74470000 com 1015,0 mg L⁻¹. É interessante discutir neste sentido que, apesar desses valores de C_{ss} serem os mais elevados para todas as estações, eles não estão associados necessariamente com os maiores valores de Q. Inclusive, a estação 79400000 apresentou este valor alto de C_{ss} em uma Q considerada baixa para a estação. As demais estações supracitadas, da mesma forma, o valor alto de C_{ss} não

está relacionada com a maior Q, porém, ao contrário da 79400000, as Q associadas são relativamente altas para a série.

Essa diferença entre o pico de Q e de C_{ss} pode estar relacionada ao efeito da histerese, pois dependendo do momento em que as amostragens foram realizadas, principalmente ao longo de amostragens em eventos de chuvas intensas, não necessariamente tenha sido ao mesmo momento do pico de C_{ss}, neste caso. Esta é uma das contrariedades do uso da curva-chave de sedimentos, já discutido anteriormente, que o efeito de histerese (atraso na evolução de um fenômeno físico em relação a outro) pode não ser identificado, uma vez que existe uma defasagem entre as curvas de Q e C_{ss} no tempo (YANG; LEE, 2018). Girolamo *et al.* (2018) argumentam que o desenvolvimento da curva-chave de sedimentos requer medições de C_{ss} em todas as condições de Q, que o curso d'água possa apresentar, especialmente em eventos de inundação, durante os quais são observadas C_{ss} muito altas. Os autores ainda afirmam que, se a série não contemplar adequadamente essa caracterização, estimativas errôneas podem ocorrer.

A utilização do modelo da curva-chave, da mesma forma, por vezes é criticado pelos profissionais da área de recursos hídricos, uma vez que curvas-chave ajustadas a um conjunto de valores não contínuos, ou seja, dados de amostragens esporádicas realizadas somente em alguns dias do ano (4 a 5 amostras por ano), como os disponibilizados pela ANA e empregados neste trabalho, podem ser utilizadas para gerar séries históricas de Q_{ss} em intervalos subdiários, como em eventos específicos de chuva, que apresentam diferentes variações de Q e C_{ss} em um pequeno intervalo de tempo. A oposição em se realizar esse tipo de uso em intervalos subdiários é a grande variação no transporte de sedimentos que ocorre nesta escala. Além disso, curvas-chave deste tipo não consideram o efeito da histerese entre os valores de Q e C_{ss}, em que maiores valores de Q não necessariamente ocorra no mesmo instante que o da C_{ss}. A alternativa para estes casos é a utilização de turbidímetros nas seções de monitoramento onde é possível gerar registros contínuos de C_{ss} relacionando a medida de turbidez do curso (MINELLA *et al.*, 2008).

4 Conclusões

Os valores de C_{ss} estimados, a partir do modelo da curva-chave testado, para a maioria dos conjuntos completos e subdivididos em intervalos de vazão, apresentaram um ERP abaixo do valor de 100%, porém, resultados muito baixos de coeficiente de determinação (R^2), indicando os piores ajustes. Contudo, apontou melhora quando os conjuntos são subdivididos em períodos de 10 anos. A estimativa apresenta considerável progresso quando o modelo é aplicado aos dados de Q_{ss} , em todos cenários, comparativamente aos de C_{ss} , comportamento observado principalmente pelo NS e R^2 . Os melhores resultados são observados quando o modelo da curva-chave testado foi aplicado aos dados completos de Q_{ss} , entre todos os cenários utilizados.

Como alternativa para quantificação do transporte de sedimentos em suspensão, o modelo da curva-chave mostra-se uma ferramenta viável para algumas das estações sedimentométricas, com base na análise de dados disponibilizados para o estado do Rio Grande do Sul, sendo que os diferentes cenários de subdivisão, bem como os dados de entrada (C_{ss} e Q_{ss}) influenciaram na eficiência do ajuste do modelo. Entretanto, para algumas das estações, limitações foram reconhecidas, tais como a reduzida frequência das campanhas hidrológicas, que resulta e impacta na quantidade de dados disponíveis, na confiabilidade e qualidade dos dados, na relação entre Q e C_{ss} e na necessidade de extrapolação principalmente nos conjuntos subdivididos. Além disso, alterações nas características da bacia hidrográfica, bem como o efeito da histerese e a defasagem entre os picos das variáveis podem não ser reconhecidos e identificados no ajuste.

Em função da grande quantidade de estações, bem como cenários testados, indica-se verificar os resultados dos índices estatísticos para cada estação de interesse separadamente, uma vez que nesta pesquisa, foram discutidos principalmente os valores médios para ERP e R^2 , bem como as porcentagens de adequações para todas as estações em conjunto. Nesta perspectiva, para cálculos adicionais, indica-se que se utilize o menor ERP possível, associando ainda a valores das estatísticas, como o NS e R^2 , onde serão encontradas as relações mais coerentes.

Para o Rio Grande do Sul, pesquisas nesta proporção ainda não haviam sido desenvolvidas. Em vista disso, todas as estações sedimentométricas com dados

disponibilizados pela Rede Hidrometeorológica Nacional, administrada pela Agência Nacional de Águas, foram testadas frente à aplicação do modelo da curva-chave de sedimentos em forma de potência, em diferentes cenários de subdivisões, para o estado. Vale a ressaltar, que estes resultados podem não representar a realidade do restante do país, necessitando, desta forma, análises complementares para outros estados.

Capítulo 2 – Estimativa da produção de sedimentos a partir da Modified Universal Soil Loss Equation (MUSLE) usando dados observados derivados de curva-chave

1 Introdução

A presença de focos de erosão, bem como a magnitude do transporte de sedimentos em cursos d'água, numa bacia hidrográfica, estão estreitamente associados ao manejo e uso do solo e dos recursos hídricos para os mais variados fins, tanto agrícola como industrial. A utilização intensiva desses recursos pode vir a gerar impactos sobre o meio, tornando importante a quantificação da erosão e o conhecimento da dinâmica e transporte dos sedimentos na bacia (GHAFARI *et al.*, 2017). O transporte de sedimentos nos cursos d'água pode ser monitorado, permitindo a quantificação da descarga sólida. Porém, a quantidade de solo erodido, em um dado intervalo de tempo, não é necessariamente igual à descarga sólida que passa em uma seção do curso d'água. Isso ocorre porque parte das partículas erodidas ficam depositadas em alguns pontos durante o percurso, antes de chegar ao exutório. Referindo-se, especificamente, ao transporte de sedimentos dentro do curso d'água, sabe-se que esse é dividido em diferentes tipos, podendo ser separado em: sedimentos em suspensão, que inclui partículas provenientes do próprio leito e/ou descarga de finos provenientes da bacia à montante, e sedimentos de arraste, que são os que se movimentam junto e/ou próximo ao fundo do curso, que apresentam maior granulometria.

Com o auxílio de equipamentos de amostragem e análises laboratoriais, a dinâmica do transporte de sedimentos em suspensão e o conhecimento da concentração desses (cota-vazão-concentração) tornam-se possíveis. Por outro lado, quando não se tem disponibilidade de realizar as amostragens e medições necessárias, dados associados ao transporte de sedimentos nos cursos d'água podem ser obtidos por redes de monitoramento para algumas localidades. No Brasil, a Agência Nacional de Águas (ANA) administra uma rede fluviométrica que disponibiliza dados oriundos de estações, dos quais alguns possuem informações que permitem calcular a descarga sólida em suspensão. Porém, a quantidade de estações é ainda pequena e abaixo do desejável para o adequado conhecimento dos processos hidrossedimentológicos. Esta insuficiência é devida às grandes dificuldades de se implementar e manter uma rede, dificuldades tanto operacionais como financeiras de levantamento de informações para a determinação de descarga sólida.

Levando em consideração as dificuldades supracitadas e a necessidade de quantificar a erosão hídrica e o transporte de sedimentos, que, devido à complexidade dos fatores envolvidos, podem não ser estimados facilmente em diferentes bacias hidrográficas, modelos são utilizados para representar adequadamente tais processos. A Equação Universal de Perda de Solo (USLE), desenvolvida por Wischmeier e Smith (1965), e suas versões, são úteis para a estimativa da erosão do solo em diferentes escalas e usos (SADEGHI *et al.*, 2008). Estes modelos são amplamente utilizados para diversas finalidades, como por exemplo, estimar a erosão do solo em áreas de intensa degradação (MEDEIROS *et al.*, 2016), em condições específicas, como plantações de eucalipto (SILVA *et al.*, 2016a) e para determinar a eficácia de medidas implementadas na redução da erosão em uma escala de paisagem (WICKAMA *et al.*, 2015).

O modelo USLE é interessante sob o ponto de vista prático, uma vez que os dados de entrada são geralmente fáceis de obter. Porém, esse modelo não permite a modelagem de eventos de chuva isolados. Diante disso, foi desenvolvida a Modified Universal Soil Loss Equation (MUSLE) ou Equação Universal de Perda de Solo Modificada, proposta por Williams (1975) e considerada como mais adequada para prever a produção de sedimentos decorrente de um único evento de precipitação (BAGARELLO *et al.*, 2017), em diferentes usos do solo e escalas. No entanto, a sua aplicação requer algumas precauções necessárias e dados de entrada confiáveis. Em algumas pesquisas, em que as áreas de estudo são diferentes dos locais onde os dois coeficientes de ajuste da equação foram originalmente desenvolvidos, o modelo MUSLE é calibrado para a estimativa da produção de sedimentos.

Sadeghi *et al.* (2007), para entenderem o comportamento hidrológico numa região ambiental importante no Japão, avaliaram a aplicabilidade da MUSLE numa pequena bacia hidrográfica reflorestada. O modelo foi testado e calibrado utilizando dados de sedimentos coletados em 2004. Os autores consideraram o modelo eficiente para estimar a produção de sedimentos ocorrida em oito eventos extremos de precipitação na área de estudo, com um nível de concordância de mais de 88%, um erro de estimativa de 14% e uma diferença não significativa na média dos valores. Odongo *et al.* (2013) também indicam que o modelo MUSLE pode ser aplicado satisfatoriamente para simulações da produção de sedimentos para o caso da bacia hidrográfica de Malewa, no Quênia.

Bagarello *et al.* (2018) testaram a aplicabilidade da MUSLE em três locais experimentais na Itália. Com um elevado número de dados de precipitação, usados para parametrizar o modelo localmente, os autores concluíram que o modelo MUSLE pode ser empregado para a predição da produção de sedimentos. Os autores afirmam ainda que o modelo MUSLE prevê a produção de sedimentos com maior precisão em eventos de alta perda de solo, do que para aqueles de menor intensidade. Esse resultado reforçou o interesse do modelo, uma vez que, maiores erros estão associados a pequenos eventos e, portanto, não têm consequências relevantes na natureza.

Deve ser salientado que todo modelo, por mais sofisticado e complexo que seja, é uma representação da realidade, devendo, portanto, ser utilizado dentro das condições e limites estabelecidos para seu uso. Desta forma, uma avaliação do modelo se faz necessária, para que se possa desenvolver, escolher e utilizar, conforme cada caso e as necessidades do usuário, o modelo da melhor forma. Silva *et al.* (2011) calibraram o coeficiente a da MUSLE para as condições da bacia hidrográfica do ribeirão Pipiripau, localizada no nordeste do Distrito Federal, usando dados hidrossedimentológicos locais, bem como validaram a equação calibrada, com uma série de dados diferentes daqueles usados na calibração.

Os autores concluíram que a MUSLE, na sua forma original, superestimou a produção de sedimentos na bacia e que no processo de validação os valores anuais apresentaram melhores ajustes que os valores mensais na bacia. Santos *et al.* (2014) tiveram como objetivo calibrar e validar o fator C e os coeficientes a e b da MUSLE em diferentes coberturas no semiárido brasileiro. Os resultados da pesquisa indicaram que os valores dos fatores C e os coeficientes de ajuste a e b da MUSLE, para as coberturas estudadas, se apresentaram apropriados e recomendados de acordo com os índices estatísticos empregados, podendo ser utilizados como base para microbacias semelhantes não monitoradas.

Tornam-se de extrema importância que pesquisas em produção de sedimentos sejam realizadas em diferentes bacias hidrográficas, uma vez que apresentem usos do solo e da água diversos, que podem vir a acarretar interferências nos fatores hidrossedimentológicos, pelos processos de urbanização e expansão de cultivos e pecuária, por exemplo. Na região sul do Rio Grande do Sul encontra-se a bacia hidrográfica do arroio Pelotas (BHAP), recurso hídrico que além de ser utilizado para

manutenção de atividades agropecuárias é o recurso que mais fornece água bruta para abastecimento de municípios na região. A BHAP, diante de seus múltiplos usos, sofre interferências dos processos supracitados acima, os quais podem vir a acarretar em alterações e degradação.

Em vista disso, o objetivo desta pesquisa foi avaliar a capacidade preditiva da MUSLE para quantificação da produção de sedimentos, considerando coeficientes *a* e *b* disponíveis na literatura e ajustados para a bacia, correlacionando com resultados oriundos da descarga sólida em eventos de precipitação em uma sub-bacia do arroio Pelotas dotada de monitoramento hidrossedimentológico.

2 Metodologia

2.1 Área de estudo

A pesquisa foi realizada na sub-bacia hidrográfica do arroio Cadeia (BHAC), localizada no sul do estado do Rio Grande do Sul, com uma área total de 122,5 km² e um perímetro de 71,38 km. A BHAC é monitorada pelo Grupo de Pesquisa em Hidrologia e Modelagem Hidrológica em Bacias Hidrográficas/CNPq e pertence à bacia hidrográfica do arroio Pelotas (BHAP), que apresenta aproximadamente 940 km², contemplando os municípios de Pelotas, Morro Redondo e Canguçu e deságua diretamente no arroio Pelotas. A Figura 4 ilustra a localização da BHAC e sua seção de controle, inserida na BHAP, no estado do Rio Grande do Sul.

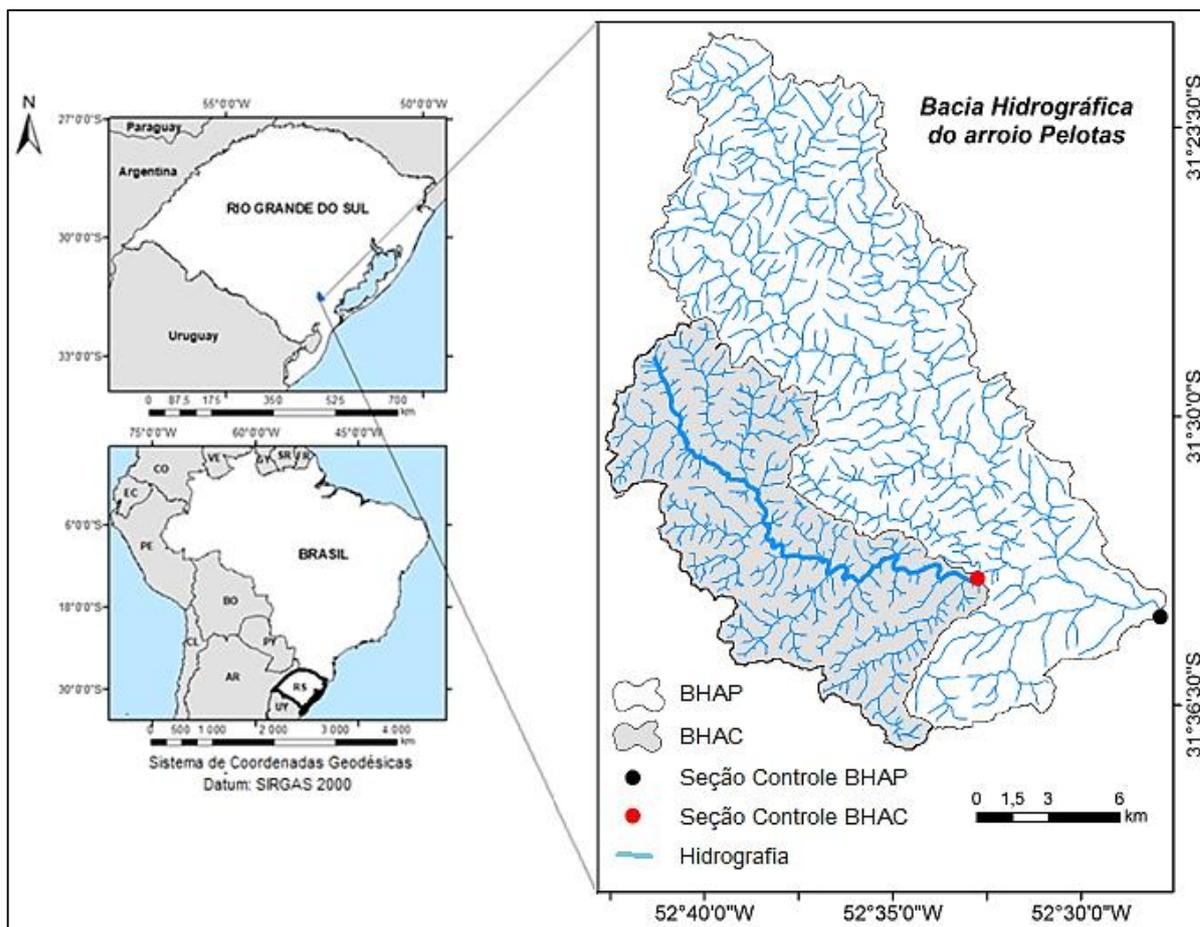


Figura 4 – Localização da bacia hidrográfica do arroio Pelotas (BHAP) à montante da Ponte Cordeiro de Farias (seção de controle monitorada pela ANA) e da sub-bacia hidrográfica do arroio Cadeia (BHAC), inserida na BHAP, e localização das seções de monitoramento hidrológico para ambas bacias

2.2 Dados de precipitação

Para a realização do estudo foram obtidos dados de precipitação provenientes das estações da rede de monitoramento hidrológico do Grupo de Pesquisa em Hidrologia e Modelagem Hidrológica em Bacias Hidrográficas. A rede é constituída por uma estação meteorológica, dez estações pluviométricas e três seções de controle para campanhas hidrológicas junto a BHAP, permitindo além do monitoramento da precipitação, o de nível, vazão e sedimentos (Figura 5).

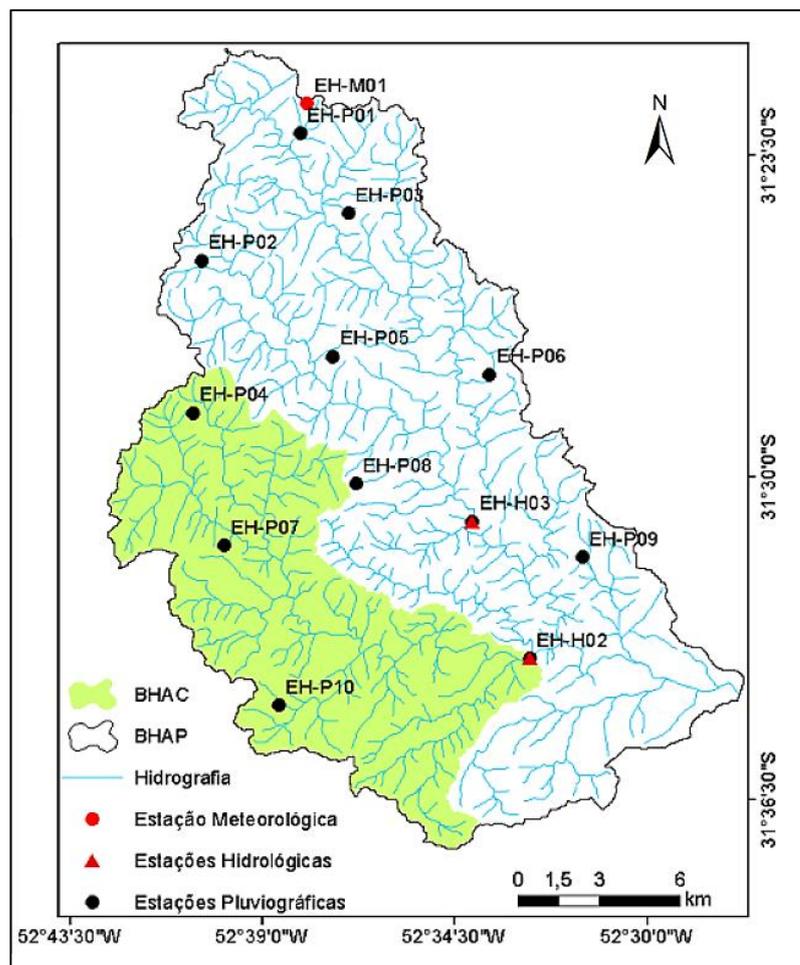


Figura 5 – Rede de monitoramento hidrológico utilizada para registros de chuva na BHAC

Os dados de precipitação foram adquiridos pela: i) estação meteorológica (EH-M) localizada em Canguçu, que também disponibiliza dados de velocidade do vento, temperatura do ar, umidade relativa do ar e radiação solar; ii) estação de monitoramento fluviométrico e pluviométrico (EH-H02), localizada junto à seção de controle da BHAC, disponibilizando também informações de nível d'água e onde foram realizadas as campanhas sedimentométricas; iii) estação de monitoramento fluviométrico (EH-H03); e; iii) dez pluviômetros automáticos (EH-P01, EH-P02, EH-P03, EH-P04, EH-P05, EH-P06, EH-P07, EH-P08, EH-P09, EH-P10), distribuídos ao longo da BHAP.

Os dados de precipitação são registrados por monitoramento contínuo, constituído por pluviômetros automáticos, associados a um sistema de aquisição de dados (datalogger) que adquire/armazena as leituras. A disponibilidade desses dados possibilita a determinação da lâmina precipitada e da intensidade ao longo do tempo.

Para a série de precipitação, pelo fato da BHAC apresentar uma rede com vários pontos de monitoramento de precipitação (Figura 5), foi realizada a interpolação dos registros de precipitação, utilizando o método dos polígonos de Thiessen (THIESSEN; ALTER, 1911), que pondera a precipitação com base na influência de cada pluviômetro automático sobre a área da bacia.

2.3 Monitoramento de descarga líquida

O monitoramento da descarga líquida foi realizado entre os anos de 2013 a 2020 na seção de controle na BHAC, indicada na Figura 4. A constituição da série de vazão foi realizada a partir da combinação de dois procedimentos realizados na seção de controle: 1) utilização sensor de nível com medição automática (linígrafo automático), para medição contínua do nível d'água; e 2) campanhas hidrológicas para medida de velocidade de água, utilizando molinete hidrométrico, para posterior determinação de vazão e utilizando-se régua linimétrica para identificação do nível da água, a fim de garantir a consistência das informações do linígrafo automático, para constituição da curva-chave de nível x vazão. Em associação a esses dois procedimentos (medições contínuas de nível d'água pelo sensor automático e a curva-chave de nível x vazão (Figura 6) adquirida pelas campanhas hidrológicas) a série de vazão, para a seção de controle, foi adquirida.

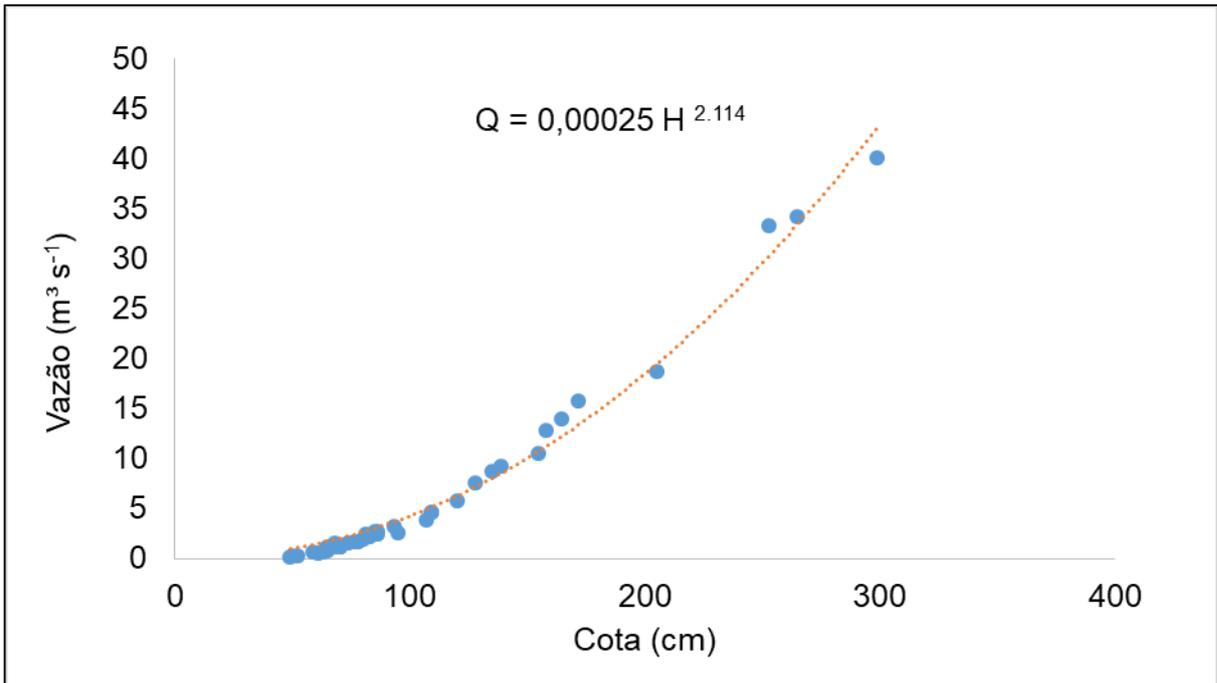


Figura 6 – Curva-chave nível x vazão obtida pelas medições das campanhas hidrológicas na seção de controle da BHAC

A determinação da vazão, diante das campanhas hidrológicas, foi obtida através do método de integração vertical, que subdivide a seção do curso d'água em verticais para análise, conforme a metodologia descrita por Mello e Silva (2013). As medições de velocidade, em cada uma das verticais, foram realizadas a 20, 40, 60, 80% de profundidade, dependendo do nível para o instante da amostragem, e a velocidade média foi obtida de acordo com a metodologia proposta por Santos *et al.* (2001). Foram realizadas medições de velocidade em cada vertical. Várias destas medições foram feitas a vau, no caso de situações de cota baixa, com o uso do micromolinete (Figura 7). Já em cotas mais altas, o procedimento foi realizado com o molinete e com o auxílio de guincho hidrométrico, sobre uma ponte encontrada na seção de controle (Figura 8). As vazões da seção de controle foram calculadas a partir das velocidades médias determinadas, as profundidades de cada vertical e a distância entre as verticais pelos métodos da meia seção, seguindo as recomendações de Mello e Silva (2013).



Figura 7 – Utilização de Micromolinetete para medição de velocidade de água realizada a vau na seção de controle da BHAC

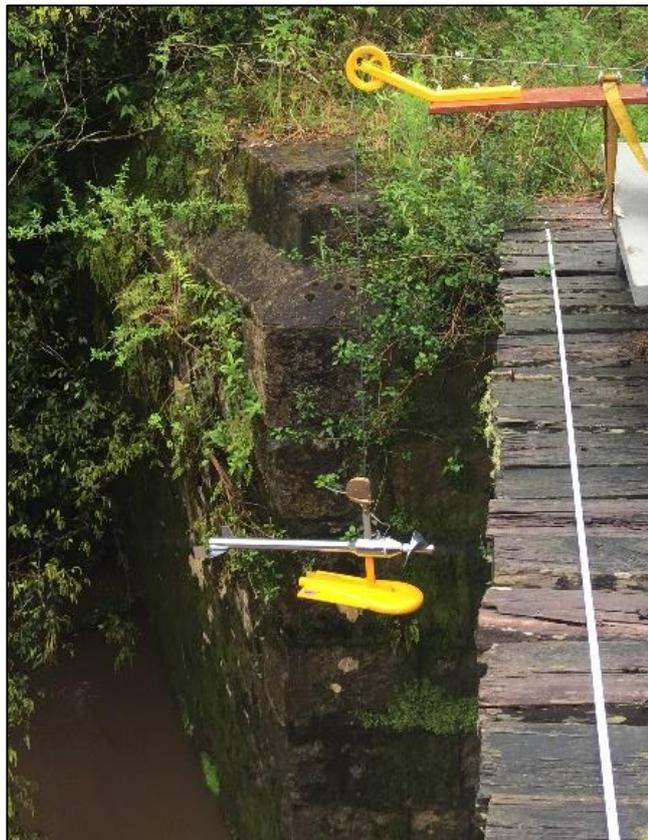


Figura 8 – Medição de velocidade realizada com o auxílio do guincho sobre a ponte na seção de controle da BHAC

2.4 Monitoramento de descarga sólida em suspensão

As amostragens para posterior quantificação de descarga sólida foram realizadas entre os anos de 2017 e 2018, na mesma seção de controle daquela de monitoramento de cota e vazão, na BHAC, indicada na Figura 4, utilizando equipamentos e procedimentos adequados para amostragem e cálculo de transporte de sedimentos em suspensão. As amostragens de sedimentos em suspensão têm como finalidade a determinação da concentração média de sedimentos em suspensão (C_{ss}) para posterior cálculo da descarga sólida em suspensão (Q_{ss}). Para a determinação da C_{ss} foram coletadas amostras, seguindo a metodologia de integração em profundidade, em verticais representativas da seção, com uma velocidade de trânsito, do aparelho, igual na subida e na descida, conforme descrito por Carvalho (2008).

Para a amostragem de sedimentos em suspensão foi utilizado o amostrador USDH-48 (AMS-1), quando as amostragens foram realizadas a vau, em baixas

profundidades, ou seja, até 1,5m (Figura 9). Este equipamento é do tipo leve, para operação de haste ou cabo manual. Por outro lado, quando a profundidade do curso esteve acima do recomendado para coleta a vau, foi feita coleta sobre a ponte e utilizado o amostrador USDH-59 (AMS-2), para uso com cabo em suspensão por guincho hidrométrico sobre a ponte (Figura 10).



Figura 9 – Amostragem de sedimento em suspensão realizada a vau com o amostrador USDH-48 (AMS-1) na seção de controle da BHAC



Figura 10 – Amostragem de sedimento em suspensão realizada com o amostrador USDH-59 (AMS-2) e com o auxílio do guincho sobre a ponte na seção de controle da BHAC

A descarga sólida em suspensão foi obtida pela multiplicação da C_{ss} e do valor de vazão, mediante Equação 15 (ASSELMAN, 2000; HOROWITZ, 2003; HASSANZADEH *et al.*, 2018):

$$Q_{ss} = 0,0864 C_{ss} Q \quad (15)$$

em que:

Q_{ss} : descarga sólida de sedimentos em suspensão ($t \text{ dia}^{-1}$);

C_{ss} : concentração de sedimentos em suspensão ($mg \text{ L}^{-1}$);

Q : vazão ($m^3 \text{ s}^{-1}$).

Vale ressaltar que a curva-chave de sedimentos, bem como a curva-chave de vazões estão em constante atualização, diante das realizações das campanhas hidrológicas. Nesse sentido, é importante lembrar que a atualização das curvas-chave pode alterar os valores de vazão e os resultados do valor observado de produção de sedimentos. Para a finalização deste estudo foram utilizadas as curvas-chaves mais

atualizadas no momento, ou seja, contemplando as amostragens obtidas até o mês de janeiro de 2020.

2.5 Análises de laboratório

No Laboratório de Águas e Efluentes da Agência de Desenvolvimento da Bacia da Lagoa Mirim da Universidade Federal de Pelotas foram realizadas as análises que consistiram na determinação da C_{ss} realizadas pelo método da filtração. Os sedimentos em suspensão são considerados como sólidos suspensos totais que são sólidos que ficam retidos em filtro de porosidade de 2 µm ou menor. O princípio básico do método da filtração consiste em passar primeiramente uma amostra homogeneizada através de um filtro de fibra de vidro e após evaporar o resíduo sólido a 105°C até o peso constante.

Desta forma, uma alíquota de 100 mL da amostra com água e sedimento, previamente homogeneizada, foi filtrada utilizando papel filtro (AP-40), de peso seco conhecido (seco em estufa a 105°C e tarado) e de porosidade de 2 µm, com auxílio da bomba a vácuo. Após a filtração, o filtro com o material retido é sobreposto em vidro relógio e levado à estufa para o processo de evaporação por 1h. Depois, o filtro com o material seco é levado ao dessecador sob vácuo até chegar na temperatura ambiente, evitando assim possível absorção da umidade do ar. Por fim, foi feita a pesagem do filtro com o material seco em balança analítica até atingir um peso constante. O cálculo da C_{ss} se dá pela subtração do peso do filtro com a amostra seca e o peso da tara do filtro, em gramas, multiplicado por 1.000.000, dividido pelo volume da amostra em mililitros. As análises foram sempre realizadas em triplicada, de acordo com APHA (2005).

2.6 Curva-chave de sedimentos

Buscou-se desenvolver uma relação entre os dados de vazão e os oriundos das amostragens de sedimentos em suspensão, obtidos nas campanhas hidrológicas. Desta forma, a partir das determinações das condições de cota/vazão e os valores correspondentes de Q_{ss}, foi estabelecida uma curva-chave de transporte sedimentos em suspensão, obtida pela função de potência, conforme recomendado por Asselman

(2000), Zhang *et al.* (2012) e Hassanzadeh *et al.* (2018), representada pela Equação 16.

$$Q_{ss} = a Q^b \quad (16)$$

em que:

Q_{ss} : descarga de sedimentos em suspensão ($t \text{ dia}^{-1}$);

Q : vazão ($m^3 \text{ s}^{-1}$);

a e b : coeficientes de ajuste.

Como indicado em pesquisas, a transformação e manipulação dos dados de entrada de curvas-chave de sedimentos, bem como, a verificação dos resultados dos índices estatísticos utilizados, devem ser realizados para cada estação de interesse separadamente, que dessa forma, devem ser manipulados para melhores condições de eficiência na estimativa. Com isso, optou-se também por dividir os dados em dois intervalos de excedência de frequência de vazão em 50%, consideradas altas vazões e baixas vazões, e assim aplicar a metodologia novamente obtendo duas curvas-chaves ajustadas. O intervalo foi escolhido pela quantidade de dados observados disponíveis. Desta forma, foram testados duas propostas de manipulação do conjunto de dados de entrada para o ajuste da curva-chave de sedimento: a) curva-chave ajustada aplicando o conjunto de dados completos; b) curva-chave ajustada aplicando dois conjuntos de dados, divididos por intervalos de vazão.

Crerios estatísticos foram aplicados para avaliar a adequação das curvas-chaves ao conjunto de dados provenientes das amostragens no arroio Cadeia na seção de controle supracitada. A estatística Erro Relativo Percentual Médio (ERP) foi aplicada com o objetivo de avaliar a eficiência da curva-chave para a estimativa dos valores de Q_{ss} , como recomendado por Horowitz (2003) e Sadeghi *et al.* (2008) e apresentado na Equação 17.

$$ERP = \frac{\sum \left[\left| \frac{Q_{ssCalc} - Q_{ssObs}}{Q_{ssObs}} \right| \right]}{N} 100 \quad (17)$$

em que:

QssCalc: é a descarga de sedimentos em suspensão calculada pelo modelo da curva-chave (t dia⁻¹);

QssObs: é a descarga de sedimentos em suspensão observada (t dia⁻¹).

Da mesma forma, para avaliar a qualidade do ajuste da curva-chave foi utilizado o coeficiente de determinação, $0 \leq R^2 \leq 1$, que indica quanto o modelo é capaz de representar os dados observados (ZHENG *et al.*, 2012; GIROLAMO *et al.*, 2015; ZENG *et al.*, 2018), conforme a Equação 18.

$$R^2_{Qss} = \left(\frac{\sum (Q_{ssCalc} - \overline{Q_{ssCalc}}) (Q_{ssObs} - \overline{Q_{ssObs}})}{\sqrt{\sum (Q_{ssCalc} - \overline{Q_{ssCalc}})^2 \cdot \sum (Q_{ssObs} - \overline{Q_{ssObs}})^2}} \right)^2 \quad (18)$$

em que:

$\overline{Q_{ssObs}}$: média das descargas de sedimentos em suspensão observadas (t dia⁻¹);

$\overline{Q_{ssCalc}}$: média das descargas de sedimentos em suspensão calculadas (t dia⁻¹).

Outro critério de eficiência utilizado foi o de Nash e Sutcliffe (NS), conforme definido por Nash e Sutcliffe (1970), descrito na Equação 19, que determina a eficiência de um modelo em comparação com o valor médio observado no conjunto de dados.

$$NS = \frac{\sum (Q_{ssObs} - \overline{Q_{ssObs}})^2 - \sum (Q_{ssCalc} - Q_{ssObs})^2}{\sum (Q_{ssObs} - \overline{Q_{ssObs}})^2} \quad (19)$$

A eficiência da estatística NS mostra se o modelo aplicado fornece melhores estimativas do que a aplicação do valor médio observado. Valores de NS variam entre menos infinito a mais 1, onde 1 indica perfeita concordância entre as descargas sólidas de sedimentos em suspensão observadas e calculadas. Valores negativos indicam que o valor médio observado de Qss é uma estimativa melhor do que as obtidas pelo modelo (ASSELMAN, 2000).

Buscou-se para a pesquisa que as medições de vazões associadas às amostragens de sedimentos em suspensão fossem adequadas e satisfatórias, que

abrangessem a maior amplitude de vazões (altas e baixas), para alcançar o objetivo do trabalho e que possuísem uma correlação apropriada entre vazão e Q_{ss} no curso d'água analisado, e assim proporcionar qualidade à curva-chave de sedimentos para a seção de controle do curso d'água de interesse, para adequada representação da relação entre vazão e descarga sólida em suspensão.

Com base nas curvas-chave de sedimentos estabelecidas para as duas propostas, foi realizada a transformação do hidrograma correspondente ao evento em sedimentograma. Uma vez que o sedimentograma do evento foi obtido, pôde-se determinar o valor da produção de sedimentos total observada no evento, mediante a conversão de toneladas por dia para toneladas no período do evento. Deve ser ressaltado que, como foram empregados duas propostas para a curva-chave, foram obtidos dois valores observados de produção de sedimentos total de cada evento, os quais foram comparados com o resultado da produção de sedimentos estimado pela MUSLE.

2.7 Modelo utilizado

O modelo utilizado na sub-bacia estudada, para a predição da produção de sedimentos, oriundos de um evento de precipitação, foi a MUSLE (WILLIAMS, 1975), conforme a Equação 20:

$$PS = a (Q_s \cdot qp)^b K LS C P \quad (20)$$

em que:

PS: produção de sedimentos na bacia devido a uma chuva individual (Mg);

Q_s : volume de escoamento superficial direto do evento (L ou L^3 dependendo da unidade usada para ajustar os coeficientes a e b);

qp : vazão de pico do escoamento superficial direto do evento ($m^3 s^{-1}$);

K, LS, C, P: fatores da USLE, descritos separadamente a seguir;

a e b : coeficientes de ajuste.

Os fatores K, LS, C, P, os mesmos utilizados para a USLE, são descritos como:

- Fator K de erodibilidade, que representa a susceptibilidade do solo em ser erodido, sendo dado pelas características intrínsecas do solo. É importante considerar que por existir mais de um tipo de solo na bacia estudada, o valor de K foi obtido através da média ponderada dos valores de K de cada solo, tendo como ponderador a área.
- Fator L de comprimento de declive, que representa a relação de perdas de solo entre um comprimento de declive qualquer e um comprimento de rampa de 22,13m para o mesmo solo e grau de declive;
- Fator S de grau de declive, que representa a relação de perda de solo entre um declive qualquer e um declive de 9% para um mesmo solo e comprimento de rampa;
- Fator C de uso e manejo do solo, que representa a relação entre perdas de solo de um terreno cultivado em dadas condições e as perdas correspondentes de um terreno mantido continuamente descoberto. O valor desse fator é dependente do tipo e estágio de desenvolvimento da cultura, condição de cobertura do solo, época do ano e sistema de manejo adotado. No caso, por existir mais que uma cultura sobre a bacia, o valor de C foi obtido pela média ponderada dos valores de C de cada cultura, tendo como ponderador a área ocupada.
- Fator P de práticas conservacionistas, representa a relação entre as perdas de solo de um terreno cultivado com determinada prática conservacionista e as perdas de solo obtidas quando realizado o preparo e plantio morro abaixo.

Para o cálculo dos fatores considerados para a MUSLE, várias informações são necessárias e consistem desde características do solo, até dados dos eventos de precipitação selecionados. A Figura 11 esboça metodologicamente de que forma os fatores foram obtidos e quais dados foram necessários para atingir a estimativa da produção de sedimentos da BHAC pela MUSLE.

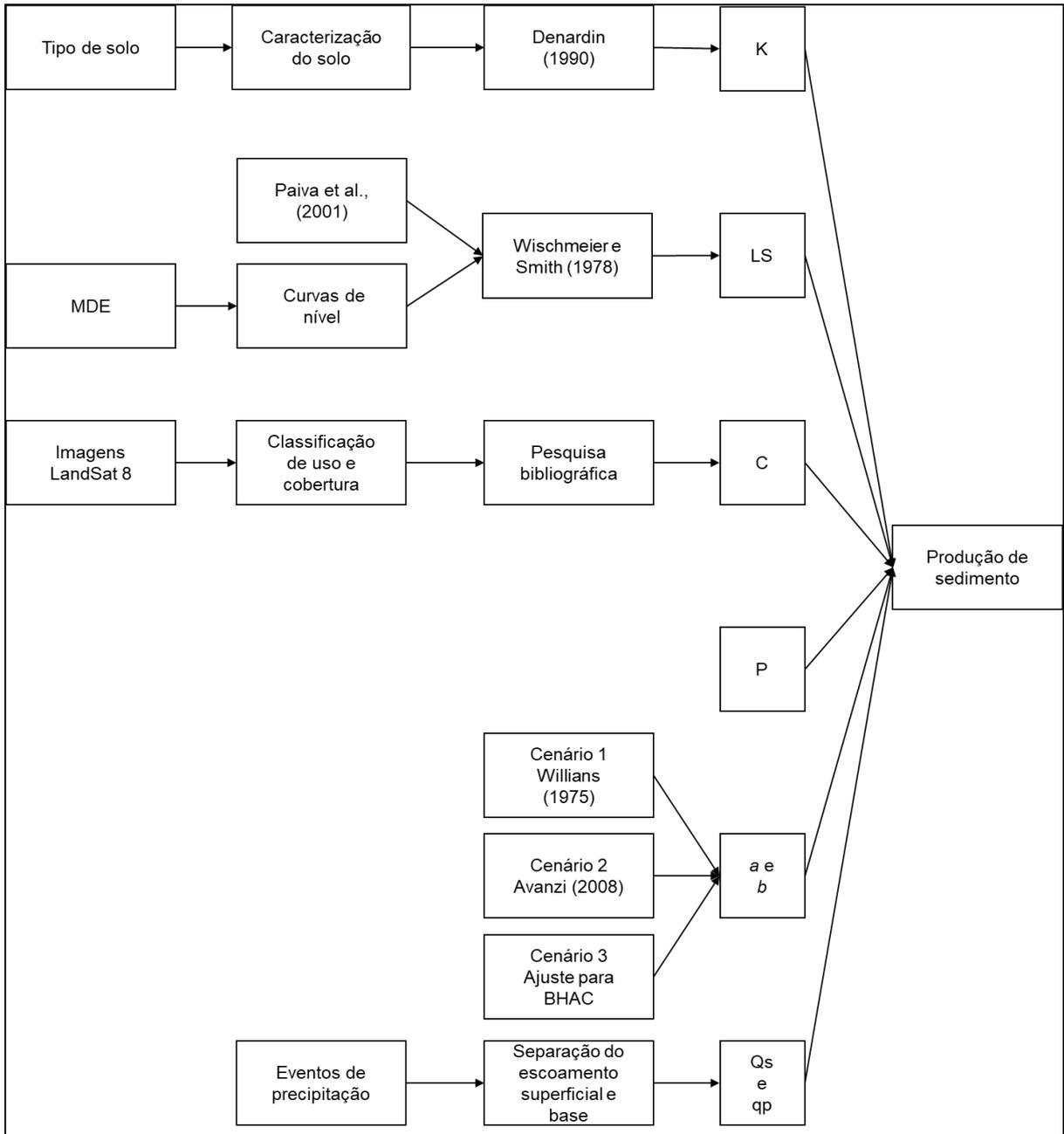


Figura 11 – Fluxograma do cálculo da produção de sedimentos a partir da Modified Universal Soil Loss Equation (MUSLE). Fonte: Elaborado pela autora

Os fatores K e LS da MUSLE foram estimados para a sub-bacia, com o auxílio de mapas de resolução de 30m no software ArcGIS 10.5 (ESRI, 2014) e o fator C pela associação de valores da literatura com a classificação de cobertura de imagens de satélite de resolução de 30m no mesmo software. Após a aquisição dos mapas de K e C com valores em cada pixel, o valor utilizado para a aplicação da MUSLE foi o valor médio para cada um dos fatores sobre a BHAC, para a obtenção da produção de sedimentos na bacia devido à chuva individual. Os fatores a, b, Qs e qp não foram

estimados com auxílio do software e para o fator LS, o software foi utilizado somente para aquisição do MDE, plotagem de curvas de nível e determinação de alguns atributos do relevo necessários para o cálculo do fator LS.

2.7.1 Fator K

Para determinação do fator K, de erodibilidade, foi utilizada a equação desenvolvida por Denardin (1990), indicada para solos de clima temperado e tropical, segundo Equação 21. Esse equacionamento é amplamente utilizado, representando de forma eficiente, por autores como Arraes *et al.* (2010), Demarch; Zimback (2014), Silva *et al.* (2016b), inclusive para o estado do Rio Grande do Sul.

$$K=(7,48 \times 10^{-6} M)+(4,48059 \times 10^{-3} \text{ Per})-(6,31175 \times 10^{-2} \text{ DMP})+(1,039567 \times 10^{-2} (\text{MO}(\frac{A}{100})))$$

(21)

em que:

K: erodibilidade do solo ($\text{Mg h MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$);

M: produto do somatório dos teores de silte e areia muito fina e o somatório de areia total e silte (%);

Per: parâmetro referente à permeabilidade codificada conforme Wischmeier *et al.* (1971);

MO: teor de matéria orgânica (%);

A: teor de areia total menos a areia muito fina (%).

O parâmetro de permeabilidade (Per) foi classificado conforme descrito por Wischmeier *et al.* (1971), Tabela 3, sendo o Per considerado de acordo com a textura dos solos analisados, segundo Renard *et al.* (1997).

Tabela 3 – Valores do parâmetro permeabilidade (Per), considerando a classe textural do solo conforme Wischmeier *et al.* (1971)

Permeabilidade	Textura	Per
Rápida	Arenosa	1
Moderada a rápida	Franco arenosa	2
Moderada	Franca, Franco siltosa	3
Lenta a moderada	Franco argilo arenosa, Franco argilosa	4
Lenta	Franco argilo siltosa, Argilo arenosa	5
Muito lenta	Argilo Siltosa, Argilosa	6

O DMP é o parâmetro referente ao diâmetro médio ponderado das partículas inferiores a 2mm (Equação 22) e foi calculado conforme descreve Arraes *et al.* (2010) e Demarch; Zimback (2014).

$$\text{DMP} = \frac{(0,65 \text{ Areia Grossa}) + (0,15 \text{ Areia Fina}) + (0,0117 \text{ Silte}) + (0,00024 \text{ Argila})}{100}$$

(22)

Para as características de estrutura, textura, teores de matéria orgânica e frações granulométricas (areia, silte e argila), considerando o horizonte A, foram utilizados como base os levantamentos de Cunha e Silveira (1996), Cunha *et al.* (1996), Cunha *et al.* (1997) e Cunha *et al.* (2006), desenvolvidos para os municípios de Pelotas, Morro Redondo, Canguçu e para Solos e Terras do Planalto Sul-Rio-Grandense e Planícies Costeiras, respectivamente, apresentado na Tabela 4. As classes do tipo de solos, apresentadas com as cores padronizadas pelo Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos, para a BHAC (Figura 12), foram obtidas conforme o mapa constituído pelo levantamento de Cunha *et al.* (2006), elaborado pelo Laboratório de Planejamento Ambiental da EMBRAPA Clima Temperado.

Tabela 4 – Classes de solo, matéria orgânica, teores de areia, silte e argila, textura e estrutura para solos presentes na bacia hidrográfica do arroio Cadeia (BHAC), conforme Cunha e Silveira (1996), Cunha *et al.* (1996), Cunha *et al.* (1997) e Cunha *et al.* (2006)

Classe do Solo	MO	ArMtGros	ArGros	ArMéd	ArFina	ArMtFina	ArTotal	Silte	Argila	Textura	Per
	g kg ⁻¹										
Argissolo Vermelho Distrófico	1,2	2,8	1,1	1,2	48,0	22,5	75,5	12,0	12,5	Areia-franca a franco-arenosa	2
Argissolo Bruno-Acinzentado Distrófico	2,6	24,7	9,4	10,5	6,1	2,9	53,5	9,0	37,5	Franco-arenoso	2
Argissolo Amarelo Eutrófico	2,8	6,9	7,6	8,1	14,2	14,7	51,5	22,0	26,5	Média - Argilosa / franco-arenoso	2
Argissolo Amarelo Alítico	2,0	8,3	13,8	10,6	5,5	9,4	47,5	14,5	38,0	Franca	3
Argissolo Amarelo Distrófico	2,1	18,3	10,0	9,5	10,9	4,4	53,0	18,9	28,1	Média/argilosa, franco-argilo-arenoso	4

MO: Matéria Orgânica; ArMtGros: Areia Muito Grossa; ArGros: Areia Grossa; ArMéd: Areia Média; ArFina: Areia Fina; ArMtFina: Areia Muito Fina; ArTotal: Areia Total

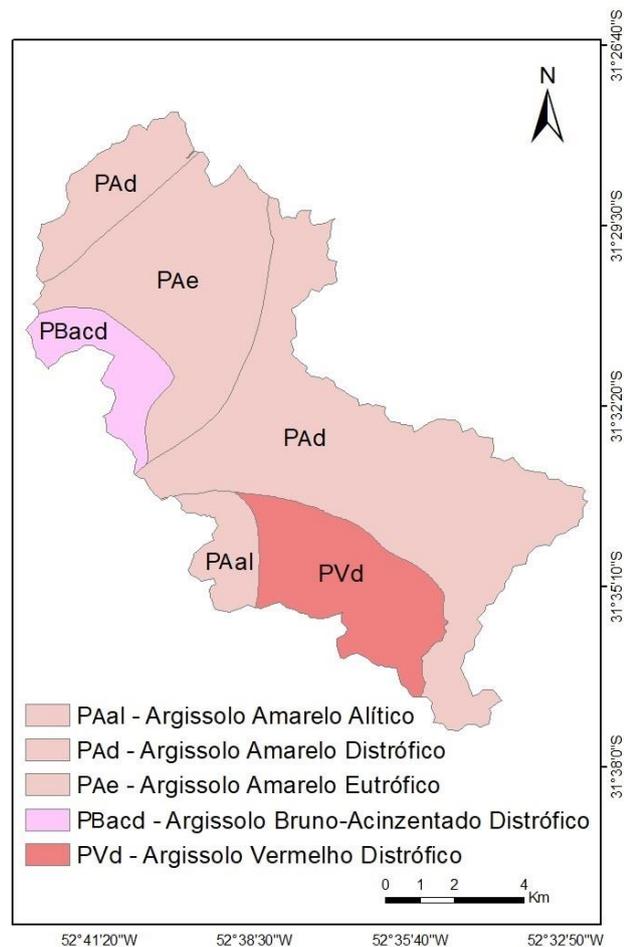


Figura 12 – Classes de solo para a bacia hidrográfica do arroio Cadeia (BHAC) conforme Cunha *et al.* (2006) e Laboratório de Planejamento Ambiental da EMBRAPA Clima Temperado

Observa-se na Figura 12 que toda a BHAC é constituída pela classe Argissolo, que compreende solos constituídos por material mineral, de evolução avançada, que tem como característica a presença de horizonte B textural. A BHAC apresenta predominância de Argissolo Amarelo (Figura 12), mais especificamente o Argissolo Amarelo Distrófico (PAd), que apresenta característica de baixa fertilidade com saturação por base menor que 50% e Argissolo Amarelo Eutrófico (PAe) com alta fertilidade e saturação por base maior ou igual a 50% (SANTOS *et al.*, 2018).

Em decorrência da BHAC apresentar diferentes tipos de solo, e conseqüentemente, associado a cada tipo de solo, diferentes valores para o fator K, para ser utilizado na aplicação da MUSLE, o valor de K foi obtido através da média ponderada dos valores de K de cada tipo de solo, tendo como ponderador a área de abrangência de cada solo.

2.7.2 Fator LS

Os fatores L e S são, respectivamente, comprimento de declive e grau de declive, e podem ser tratados por fator topográfico (LS), visto que podem ser analisados conjuntamente. O fator LS foi obtido conforme proposto por Wischmeier e Smith (1978) (Equação 23), obtendo-se a declividade da encosta (Sd) (Equação 24) de acordo com Williams e Berndt (1977) que considera o desnível da bacia (Z) e comprimentos de curvas de nível (LC). O parâmetro de coeficiente da encosta (Le), para a obtenção do LS, foi determinado como sugerido por Paiva *et al.* (2001) a partir da Equação 25, considerando o cálculo do comprimento da encosta (Le), largura do retângulo equivalente (le) (Equação 26) e o coeficiente de compacidade (Kc) (Equação 27).

$$LS = \left[\left(\frac{Le}{22,1} \right) \right]^m \cdot [0,065 + 0,0454 \cdot Sd + 0,0065 \cdot Sd^2] \quad (23)$$

em que:

LS: fator topográfico da MUSLE (adimensional);

Le: comprimento da encosta (m);

Sd: declividade da encosta (%);

m: parâmetro de ajuste que depende da declividade: se $Sd < 1\%$ $m=0,2$; se $1\% \leq Sd \leq 3\%$ $m=0,3$; se $3\% < Sd < 5\%$ $m=0,4$; se $Sd \geq 5\%$ $m=0,5$.

$$Sd = \left[\frac{0,25 \cdot Z \cdot (LC_{25} + LC_{50} + LC_{75})}{A} \right] 100 \quad (24)$$

em que:

Z: desnível entre o exutório e o ponto mais alto da bacia (m);

LC: comprimento das curvas de nível a 25, 50 e 75% de Z (m);

A: Área (m²).

$$Le = \frac{le}{4} \quad (25)$$

$$le = \frac{K_c \cdot \sqrt{A}}{1,12} \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1,128}{K_c} \right)^2} \right) \quad (26)$$

$$K_c = 0,282 \frac{P_{bh}}{\sqrt{A}} \quad (27)$$

em que:

P_{bh} : perímetro da bacia (m).

O K_c é a relação entre o perímetro da bacia (P_{bh}) e a circunferência de um círculo de mesma área da bacia. Quanto menor o K_c , mais circular é a bacia, que resulta a um menor o tempo de concentração e maior a tendência de haver picos de enchente, chegando ao $K = 1$ que caracteriza uma bacia perfeitamente circular. Os valores de K_c podem ser separados em classes de propensão a enchentes sendo que: K_c : 1,00 – 1,25 bacia com alta propensão a grandes enchentes; K_c : 1,25 – 1,50 bacia com tendência mediana a grandes enchentes; $K_c > 1,50$ bacia não sujeita a grandes enchentes.

As informações das equações para LS foram derivadas de um Modelo Digital de Elevação (MDE), resultante de imagens da missão *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), com resolução espacial de 30m (ZEBKER; GOLDSTEIN, 1986; FARR *et al.*, 2007), para o Z e os parâmetros de LC determinados, para a sub-bacia estudada, via ambiente de Sistema de Informações Geográficas (SIG), no software ArcGIS (ESRI, 2014).

2.7.3 Fator C

As classificações de uso e cobertura do solo foram realizadas a partir de imagens do satélite LandSat 8, com resolução espacial de 30 m, disponibilizadas pelo banco de dados do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2020), cedidas pelo INPE/OBT/DGI www.dgi.inpe.br, classificadas de forma supervisionada através do método da Máxima Verossimilhança e recortadas para a delimitação da sub-bacia, no software ArcGIS (ESRI, 2014), para utilização na modelagem para a BHAC.

As imagens foram escolhidas em função da qualidade e proximidade com os dias de ocorrência dos eventos de chuva selecionados para determinar os fatores Qs e qp, e classificadas em Água, Mata, Solo Exposto, Agricultura e Campo. Para obtenção do fator C foram utilizados valores resultantes de dados de pesquisas, que apresentassem dados coletados a campo e similaridade com a sub-bacia estudada (Tabela 5). Assim, os valores do fator C obtidos foram atribuídos às classes de uso e cobertura do solo classificadas e encontradas no mapeamento.

Tabela 5 – Valores do fator C para a sub-bacia BHAC, para as respectivas classes de uso e ocupação do solo

Uso	Atribuição do fator C	Fator C	Referência
Água		0,0000	Silva (2004)
Mata		0,0010	Didoné (2013)
Solo exposto		1,0000	Wischmeier e Smith (1978)
		1,0000	Braida e Cassol (1999)
Área Cultivada	Milho em PD	0,0122	Bertol <i>et al.</i> (2002)
	Aveia em A+G	0,0134	Bertol <i>et al.</i> (2002)
	Milho em PC	0,1100	De Maria e Lombardi Neto (1997)
	Soja em PD	0,0455	Bertol <i>et al.</i> (2001)
	Soja em A+G	0,1437	Bertol <i>et al.</i> (2001)
	Fumo	0,4900	Ponagos <i>et al.</i> (2015)
Campo	Sem manejo	0,0100	Silva <i>et al.</i> (2010)
	Nativo	0,0050	Silva <i>et al.</i> (2010)
	Não degradado	0,0070	Galdino (2012)
	Pouco degradado	0,0143	Galdino (2012)
	Com manejo	0,0010	Silva <i>et al.</i> (2010)
	Degradado	0,0500	Silva <i>et al.</i> (2010)

PC: plantio convencional; PD: plantio direto; A+G: aração + duas gradagens.

Vale destacar que, para a classe de Áreas Cultivadas – Agricultura, foi levada em consideração a data da imagem para associação das culturas encontradas em cada época. Desta forma, para determinar o fator C, para a classe de Área Cultivada, foi necessário considerar o período da imagem para associar as culturas verão/inverno com os valores da literatura, conforme apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 – Valores do fator C médio para a sub-bacia BHAC, para a classe de Área Cultivada, considerando o período das imagens classificadas

Período	Meses	Referência	Atribuição do fator C	Fator C	Fator C Médio
Verão	Dezembro, Janeiro e Fevereiro	Bertol <i>et al.</i> (2002)	Milho em PD	0,0122	0,1603
		De Maria e Lombardi Neto (1997)	Milho em PC	0,1100	
		Bertol <i>et al.</i> (2001)	Soja em PD	0,0455	
		Bertol <i>et al.</i> (2001)	Soja em A+G	0,1437	
		Ponagos <i>et al.</i> (2015)	Fumo	0,4900	
Outono	Março, Abril e Maio	Bertol <i>et al.</i> (2002)	Aveia	0,0134	0,0649
		Bertol <i>et al.</i> (2002)	Milho em PD	0,0122	
		De Maria e Lombardi Neto (1997)	Milho em PC	0,1100	
		Bertol <i>et al.</i> (2001)	Soja em PD	0,0455	
		Bertol <i>et al.</i> (2001)	Soja em A+G	0,1437	
Inverno	Junho, Julho e Agosto	Bertol <i>et al.</i> (2002)	Aveia	0,0134	0,2517
		Ponagos <i>et al.</i> (2015)	Fumo	0,4900	
Primavera	Setembro, Outubro e Novembro	Bertol <i>et al.</i> (2002)	Milho em PD	0,0122	0,1358
		De Maria e Lombardi Neto (1997)	Milho em PC	0,1100	
		Bertol <i>et al.</i> (2001)	Soja em PD	0,0455	
		Bertol <i>et al.</i> (2001)	Soja em A+G	0,1437	
		Bertol <i>et al.</i> (2002)	Aveia	0,0134	
		Ponagos <i>et al.</i> (2015)	Fumo	0,4900	

PC: plantio convencional; PD: plantio direto; A+G: aração + duas gradagens.

Similarmente, para determinar o valor do fator C para a classe de Campo foi utilizado o valor médio adquirido pelos valores de todas as referências da literatura para essa classe (Tabela 5), que consistiu no valor de 0,0146. Para aplicação do valor do fator C na MUSLE, por existir mais de um uso e ocupação sobre a bacia, o valor de C foi obtido pela média ponderada dos valores de C, tendo como ponderador a área ocupada em cada classe. Para o cálculo da produção de sedimentos na bacia devido a uma chuva individual da MUSLE, cada um dos eventos foi associado a um Fator C que correspondesse à imagem de satélite mais próxima à data do evento.

2.7.4 Fator P

Para o fator P foi adotado o valor igual a 1, o qual indica que não são adotadas práticas conservacionistas, conforme a realidade predominante na área de estudo, como recomendado por Lee (2004) e Santos *et al.* (2014).

2.7.5 Fatores *a* e *b*

Além dos fatores descritos acima, a equação da MUSLE requer os coeficientes *a* e *b*, que representam as condições do local de estudo. Para esses coeficientes, três cenários foram avaliados. Junto ao desenvolvimento inicial da MUSLE os coeficientes *a* e *b* foram estimados para região onde a equação foi desenvolvida, considerados como 11,80 e 0,56, respectivamente (WILLIAMS, 1975), para o fator K em unidade utilizada nos EUA. Porém, para que esses coeficientes fossem utilizados considerando o fator K no Sistema Internacional de Unidades, Foster *et al.* (1981) desenvolveram um coeficiente de relação alterando os coeficientes *a* e *b* de WILLIAMS (1975) para os valores de 89,6 e 0,56, respectivamente. Esses valores de *a* e *b*, estimados por Williams (1975), alterados por Foster *et al.* (1981), foram aplicados e assim avaliados na modelagem para a sub-bacia aqui estudada, referindo-se ao Cenário 1. Para aplicação do Cenário 1 a unidade de Qs é considerada em m³.

Do mesmo modo, foi avaliada a aplicabilidade dos valores dos coeficientes *a* e *b* obtidos por Avanzi *et al.* (2008), adquiridos pela aplicação da MUSLE em uma microbacia da região dos Tabuleiros Costeiros, numa área experimental com cobertura predominante de eucalipto e floresta nativa, localizada no município de Aracruz, ES. Esta aplicação foi designada como Cenário 2 e tem como valores de coeficientes de $a=14,96$ e $b=0,59$. Entretanto, os coeficientes desenvolvidos por Avanzi *et al.* (2008) foram obtidos considerando Qs em mm, sendo assim quando os coeficientes *a* e *b* foram aplicados para a BHAC, o Qs também foi considerado em mm.

Porém, Williams (1975) salienta que esses coeficientes podem variar em função das condições fisiográficas e hidrológicas das bacias. Desta forma, foram ajustados os valores de *a* e *b* para a sub-bacia estudada com base em dados observados neste estudo, correspondendo ao Cenário 3. A calibração dos coeficientes *a* e *b* foi efetuada levando como base os dados observados de PS considerando os dois cenários da curva-chave de sedimentos (ajustada com dados completos e dividida em dois intervalos). O ajuste foi realizado no Software R do R-Project (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2011; 2012) utilizando o algoritmo SCE-UA (DUAN *et al.*, 1992), visando maximizar o coeficiente de Nash-Sutcliffe (Nash e Sutcliffe, 1970).

Para a calibração dos coeficientes foram empregados 2/3 dos dados registrados na bacia, enquanto 1/3 foi separado para validação. Essa separação dos eventos foi realizada de forma aleatória. Para o Cenário 3 o ajuste foi realizado com o Q_s em unidades de mm. Para analisar estatisticamente a eficiência da calibração e validação dos coeficientes para a BHAC foram utilizados os índices estatísticos de NS, sendo que o desempenho do modelo pode ser considerado adequado e bom se o valor de NS superar 0,75, e considerado aceitável se o valor de NS está no intervalo aberto 0,36-0,75 (SANTOS *et al.*, 2014), bem como as estatísticas de RMSE e R^2 .

2.7.6 Fatores Q_s e q_p

Para se obter os fatores Q_s e q_p foi necessária a seleção de eventos chuvavazão para a predição da produção de sedimentos em decorrência desses eventos, mediante o modelo MUSLE. Para isso, foram selecionados, no período de janeiro de 2015 a dezembro de 2019, 44 eventos para BHAC. A seleção dos eventos de precipitação se deu a partir das séries de nível d'água, vazão e precipitação para a sub-bacia. Pela avaliação da série vazão foi feita a seleção dos eventos, dando preferência aos de maiores magnitudes e que apresentassem hidrogramas unimodais, ou seja, com uma única vazão de pico, conforme indicado por RAGHUNATH (2006). Na análise dos hidrogramas foi necessária a separação dos escoamentos superficial direto e de base, utilizando o método de separação de escoamentos inflexões A e C (CHOW *et al.*, 1988). A partir da separação do escoamento superficial direto foi possível obter o volume de escoamento superficial direto do evento (Q_s) e o valor de vazão de pico (q_p) para o evento.

3 Resultados e Discussão

3.1 Monitoramento de sedimentos em suspensão

Campanhas hidrológicas para amostragem de sedimentos em suspensão (Tabela 7) foram realizadas em diferentes níveis d'água e vazões para a BHAC (Figuras 10 e 11), no mesmo ponto de monitoramento, que é o exutório da sub-bacia, no período de junho de 2017 a agosto de 2018.

Tabela 7 – Resumo de informações obtidas a partir de campanhas hidrológicas realizadas na seção de controle da sub-bacia do arroio Cadeia (BHAC)

Nº de coletas	Data coleta	Cota média (cm)	Vazão ($m^3 s^{-1}$)	Concentração Sedimentos Suspensos ($mg L^{-1}$)	Descarga Sólida em Suspensão ($t.dia^{-1}$)
1	21/06/2017	68,0	1,483	5,50	0,70
2	26/06/2017	65,0	1,135	4,00	0,39
3	30/08/2017	68,5	1,393	3,60	0,43
4	06/09/2017	73,5	1,572	10,75	1,46
5	13/09/2017	171,5	15,777	187,75	255,93
6	15/09/2017	127,5	7,606	28,50	18,73
7	21/09/2017	81,0	2,502	5,75	1,24
8	31/01/2018	50,0	0,198	2,00	0,03
9	09/03/2018	48,0	0,174	3,00	0,05
10	22/03/2018	52,0	0,215	5,00	0,09
11	28/03/2018	61,0	0,571	6,33	0,31
12	02/04/2018	109,0	4,574	17,00	6,72
13	03/05/2018	83,0	2,187	15,00	2,83
14	11/06/2018	93,5	3,238	60,50	16,93
15	11/06/2018	93,5	3,238	65,33	18,28
16	20/08/2018	84,5	2,748	18,33	4,35

Observa-se na Tabela 7 que os resultados de concentração de sedimentos em suspensão (C_{ss}) seguem uma relação com a vazão (Q), em que os maiores valores encontrados para Q estão associados a valores maiores do C_{ss}. Observa-se também, que os dados apresentaram na coleta 5 valores mais elevados de vazão e em consequência de descarga sólida. Essa coleta foi obtida no momento em que o evento de precipitação estava acontecendo sobre a BHAC, desta forma, presenciando o pico de cota e vazão do evento de precipitação, bem como o valor mais elevado de descarga sólida obtido.

A partir das amostragens realizadas na seção de monitoramento da BHAC, duas formas de curva-chave de sedimentos em suspensão, em forma de uma função de potência, foram aplicadas. Na Figura 13 são apresentadas as curva-chaves ajustadas com os dados completos e divididos em dois intervalos, altas e baixas vazões, para a BHAC, bem como as equações de representação e os valores de coeficiente de determinação (R²).

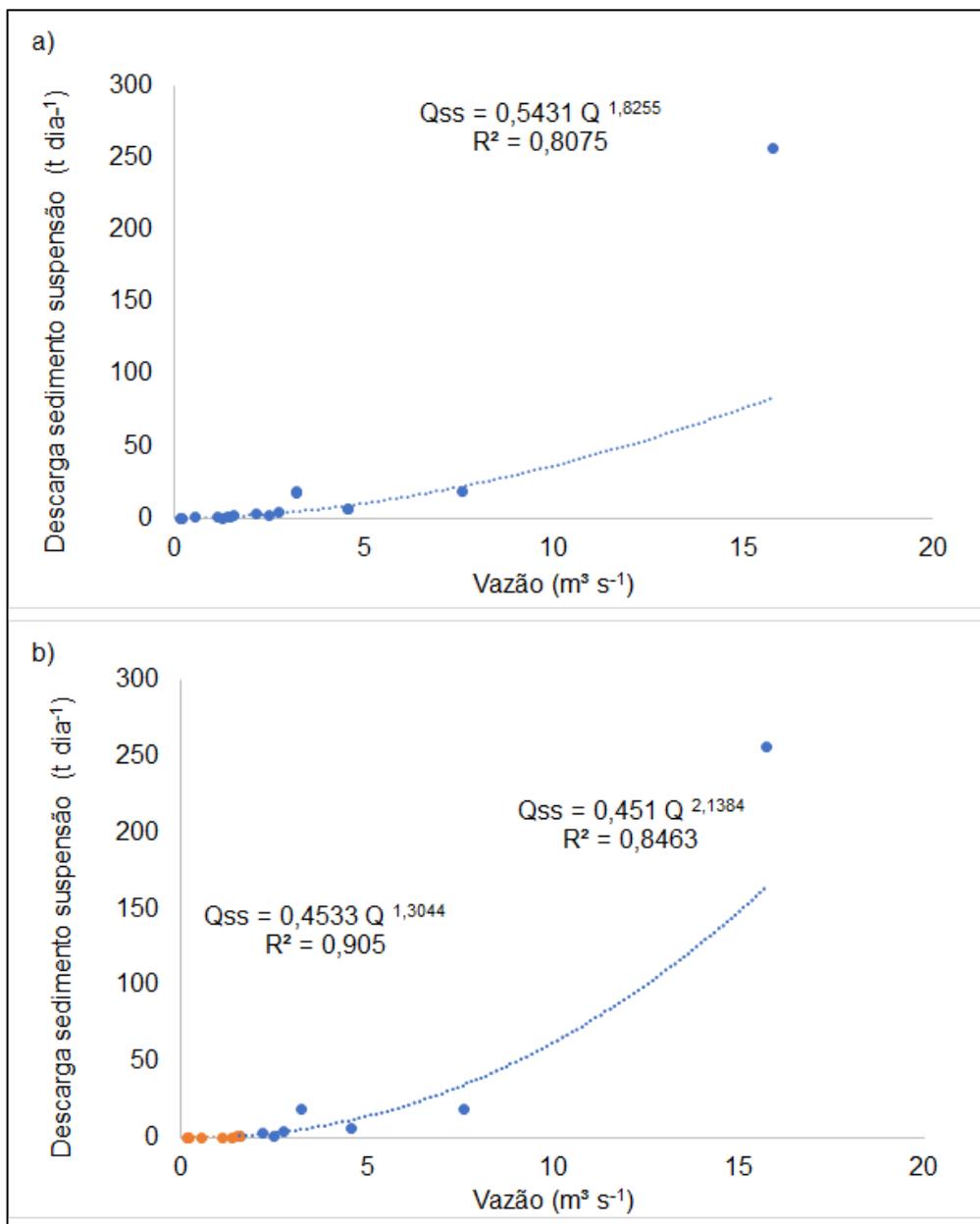


Figura 13 – Curvas-chave de sedimentos em suspensão (Q_{ss}) para sub-bacia BHAC, (a) ajustada aplicando os dados completos e (b) ajustada aplicando os dados divididos em dois intervalos de excedência de frequência de vazões (50%) baixas e vazões altas

O ajuste da curva-chave de sedimentos em suspensão com os dados completos apresentou um resultado de ERP de 218,1% e R^2 de aproximadamente 0,81. O NS demonstrou que o ajuste do modelo da curva-chave na forma de uma função de potência estima melhor os valores de Q_{ss} calculados do que o valor médio da série, apresentando um valor positivo de 0,51. Para o ajuste da curva-chave com os dados divididos em dois intervalos de vazões, baixas e altas vazões, os resultados apresentaram-se melhores, em que menores valores de ERP foram estimados de 58,1

e 31,4%, para o ajuste de baixas e altas vazões, respectivamente. O R^2 e NS da mesma forma, mostraram que a eficiência do ajuste melhorou, obtendo-se R^2 de 0,85 e 0,91 e NS 0,84 e 0,90, para o ajuste de baixas e altas vazões, respectivamente, indicando similarmente que o ajuste do modelo da curva-chave estima melhor os valores de Q_{ss} calculados do que o valor médio observado da série.

Observa-se na Figura 13 que o ajuste da curva-chave de sedimentos para os dados completos, tendem subestimar os valores de Q_{ss} , uma vez que, a linha de tendência está projetada muito abaixo do valor mais alto observado da relação entre vazão e Q_{ss} . Este comportamento do ajuste, estimulou a decisão de separar os dados em dois intervalos de vazão, dado que, a subestimativa dos valores gerou erros maiores, o que corrobora com o resultado do ERP maior e R^2 menor. Por outro lado, quando a série foi dividida em dois intervalos de vazão, esse viés de subestimação diminui, e mesmo que ainda presente, resulta assim em erros menores, como observado pelos resultados da estatística do ERP e valores de R^2 maiores, decorrendo em estimativas mais próximas dos valores observados. Esse cuidado na manipulação dos dados para o ajuste da curva-chave foi incentivado pela experiência diante das percepções obtidas neste trabalho, bem como, levando em consideração a aplicação da curva-chave em eventos de grande magnitude, percebe-se a necessidade de melhores ajustes principalmente nos dados extremos do conjunto.

A partir dos valores de a e b da curva-chave (Figura 13) foi realizada a transformação dos hidrogramas dos eventos selecionados para sedimentogramas, com a finalidade de determinar a produção de sedimento total correspondente ao evento, para comparação com os resultados da MUSLE, pelos dois métodos de estimativa (ajuste com os dados completos e ajuste com os dados divididos em dois intervalos de vazão), com objetivo de comparar os valores estimados pelas duas formas.

3.2 Determinação dos fatores do modelo MUSLE

3.2.1 Fator K

A partir do equacionamento de Denardin (1990), foi possível produzir a Figura 14 com os valores do fator K, com a finalidade ilustrativa de espacialização, para cada

tipo de solo da BHAC em análise, e a Tabela 8 onde são demonstrados os valores do fator K para os tipos de solos encontrados na BHAC, bem como, o valor do fator K que foi obtido através da média ponderada dos valores de K de cada tipo de solo, tendo como ponderador a área descrita na Tabela 8.

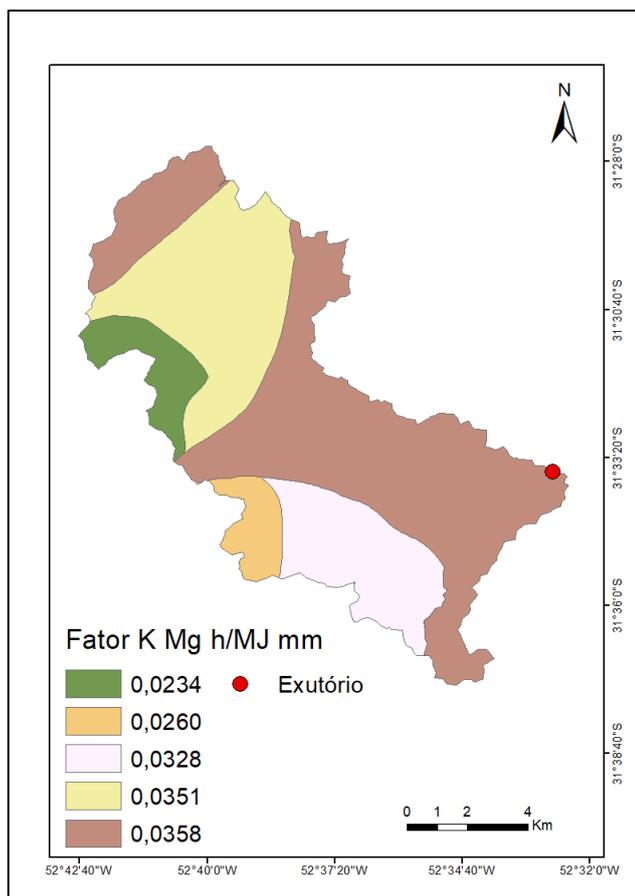


Figura 14 – Fator K, em $\text{Mg h MJ}^{-1} \text{mm}^{-1}$, para cada tipo de solo da bacia hidrográfica do arroio Cadeia (BHAC) conforme equacionamento de Denardin (1990)

Tabela 8 – Valores do fator K de erodibilidade calculados a partir da equação de Denardin (1990) para os solos da BHAC

Classe do Solo	Fator K ($\text{Mg h MJ}^{-1} \text{mm}^{-1}$)	Área (km^2)	Área (%)
Argissolo Vermelho Distrófico	0,0328	17,5	14,4
Argissolo Bruno-Acinzentado Distrófico	0,0234	7,6	6,3
Argissolo Amarelo Eutrófico	0,0351	29,2	24,1
Argissolo Amarelo Alítico	0,0260	5,4	4,4
Argissolo Amarelo Distrófico	0,0358	61,6	50,8
Média Ponderada	0,0340	Total 121,3	Total 100

Observa-se na Figura 14 a predominância do valor do fator K de $0,0358 \text{ Mg h MJ}^{-1} \text{mm}^{-1}$ para a BHAC, o qual está associado a área onde está presente o Argissolo

Amarelo Distrófico (51% da BHAC), seguido do valor do fator K de $0,0351 \text{ Mg h MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$, referente ao Argissolo Amarelo Eutrófico. Esses dois solos além de contemplarem a maior área da BHAC (75%) apresentaram os maiores valores para o fator K, indicando maiores suscetibilidade à perda de solo. Os Argissolos Amarelos são originados principalmente de materiais argilosos ou areno-argilosos sedimentares, porém, nos quais podem apresentar risco de erosão causada pela diferença de textura superficial e subsuperficial (SANTOS *et al.*, 2018). Além disso, é interessante notar que o solo de maior erodibilidade (Argissolo Amarelo Distrófico $K=0,0358 \text{ Mg h MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$) é onde o exutório da BHAC está localizado, ou seja, a posição do exutório encontra-se no solo com maior vulnerabilidade à erosão.

O valor do fator K de $0,0328 \text{ Mg h MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$, também considerado elevado, contempla aproximadamente 14% da área da BHAC e é relativo ao Argissolo Vermelho Distrófico. Este tipo de solo apresentou menores teores de matéria orgânica e argila, 1,2 e 12,5% respectivamente, e maiores teores de areia total (75,5%) entre os solos analisados, tendendo a um valor de K maior, ou seja, essas características podem vir a indicar uma erodibilidade maior. Desta perspectiva, também é interessante notar que, contrariamente as características do Argissolo Vermelho Distrófico, o Argissolo Bruno-Acinzentado Distrófico tem um maior teor de argila e matéria orgânica e pouco teor de silte, e apresentou menor susceptibilidade à perda, em relação aos outros solos, com um fator K de $0,0234 \text{ Mg h MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$. Isto ocorre devido ao fato do alto teor de argila, proporcionar maior ligação entre os agregados, tornando-o mais resistente, além de ser um solo profundo (STRECK *et al.*, 2008). O mesmo pode-se observar para o Argissolo Amarelo Alítico. Este tipo de solo apresentou o maior teor de argila e o menor teor de areia, tendo um menor valor para o fator K ($0,0260 \text{ Mg h MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$).

Desta forma, observa-se para o fator K, os valores de erodibilidade obtidos pela equação de Denardin (1990) variaram de $0,0234 \text{ Mg h MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$, para o Argissolo Bruno-Acinzentado Distrófico, a $0,0358 \text{ Mg h MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ para Argissolo Amarelo Distrófico. Essa última classe de solo apresenta o maior valor de permeabilidade ($\text{Per} = 4$), considerando a classe textural entre os solos analisados, o que influencia diretamente na equação de Denardin (1990). Observa-se também na Tabela 8 que o valor para o Fator K médio, calculado pela média ponderada pelas áreas foi de $0,0340 \text{ Mg h MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$.

Arraes *et al.* (2010), com objetivo de estimar a erodibilidade dos solos, na bacia Córrego do Tijuco, SP, encontraram valores próximos aos desta pesquisa, utilizando, da mesma forma, o equacionamento de Denardin (1990). Os autores verificaram que, para Latossolo Vermelho Distrófico e Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico, os valores para o fator K variaram de 0,0232 a 0,0626 Mg h MJ⁻¹ mm⁻¹, em que, nas áreas com valores altos de erodibilidade ocorre o predomínio de Argissolos, que apresentam alta susceptibilidade ao processo de erosão hídrica, devido ao seu comportamento em relação ao gradiente textural.

3.2.2 Fator LS

O fator LS foi estimado a partir da metodologia proposta por Wischmeier e Smith (1978). Para tanto foi obtido um MDE com resolução espacial de 30m que apresentou altitudes de 61 a 361 m, ou seja, com um desnível de Z=300m (Figura 15). A partir do MDE foram traçadas curvas de nível (Figura 16) para estimativa do comprimento das curvas de nível (LC) a 25, 50 e 75% do desnível Z. Para o cálculo do LS, obteve-se também o coeficiente de compacidade (Kc) com um valor de 1,8, que indica que a bacia não estaria sujeita a grandes enchentes (Kc>1,5), considerando a área de 122,5km² e um perímetro de 71,38 km. Os demais resultados foram: LC25%=53.371,9m; LC50%=85.243,6m; LC75%=82.189,3m; Sd=13,5%; le=3873,6; Le=968,4; resultando em um valor de LS calculado para BHAC de 12,36.

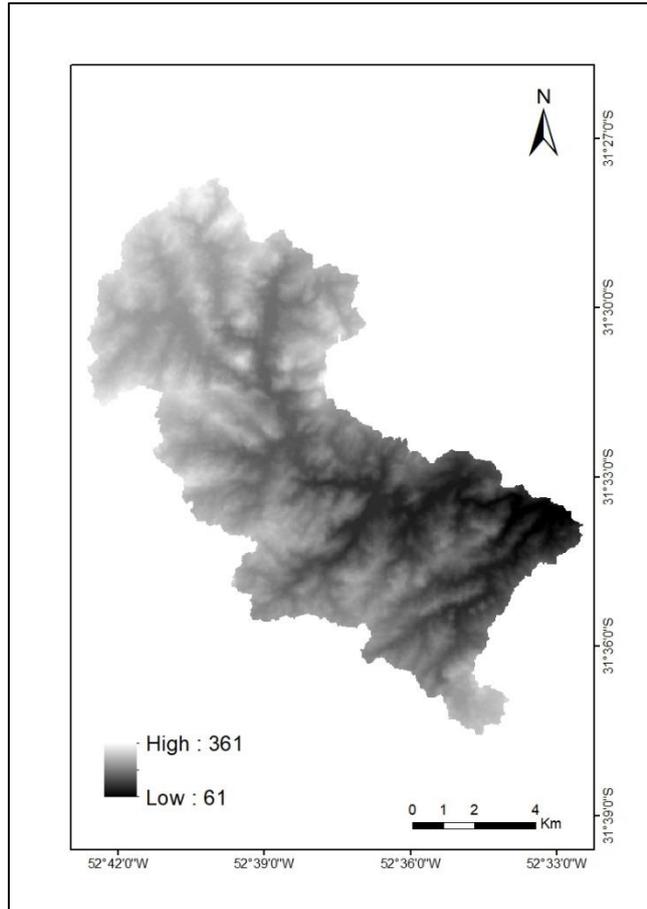


Figura 15 – Modelo Digital de Elevação (MDE) constituído a partir de imagens da missão Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), com resolução espacial de 30m para bacia hidrográfica do arroio Cadeia (BHAC)

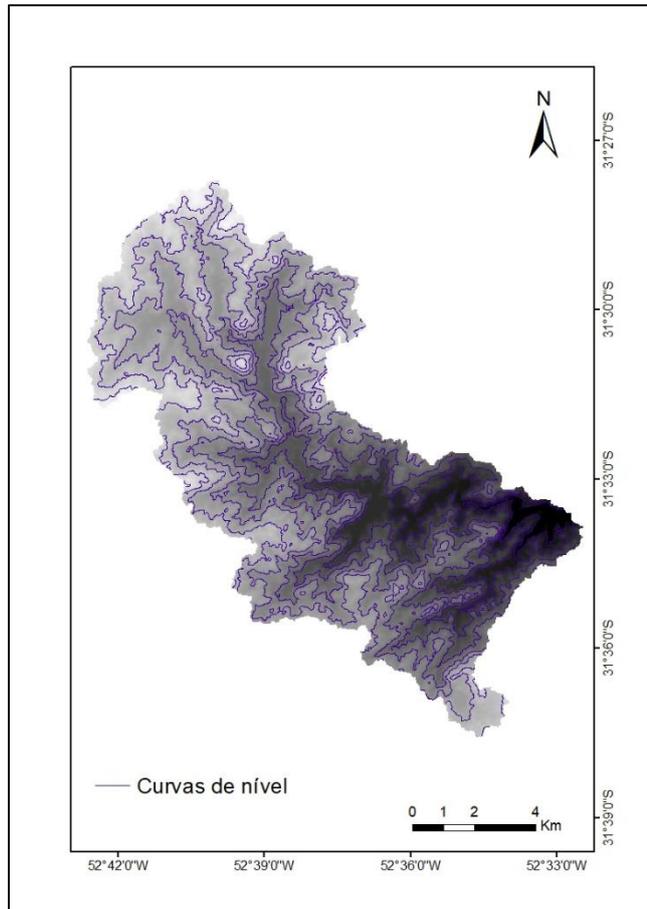


Figura 16 – Curvas de nível traçadas a partir do MDE, com resolução espacial de 30m, para bacia hidrográfica do arroio Cadeia (BHAC)

3.2.3 Fator C

Foram selecionadas 11 imagens de satélites nas datas de 07/05/2015, 27/08/2015, 28/09/2015, 18/01/2016, 28/02/2016, 13/08/2016, 09/10/2016, 02/03/2017, 21/05/2017, 08/07/2017 e 15/10/2018), para o período de 2015 a 2019, levando como base, para seleção, a proximidade com as datas dos eventos selecionados. Para associação dos valores do fator C da literatura, as imagens foram classificadas para as classes de Água, Mata, Solo Exposto, Agricultura e Campo. As Figuras 17 e 18 apresentam os mapas para os resultados das classificações para as imagens e o valor do fator C para cada uma das classes, respectivamente.

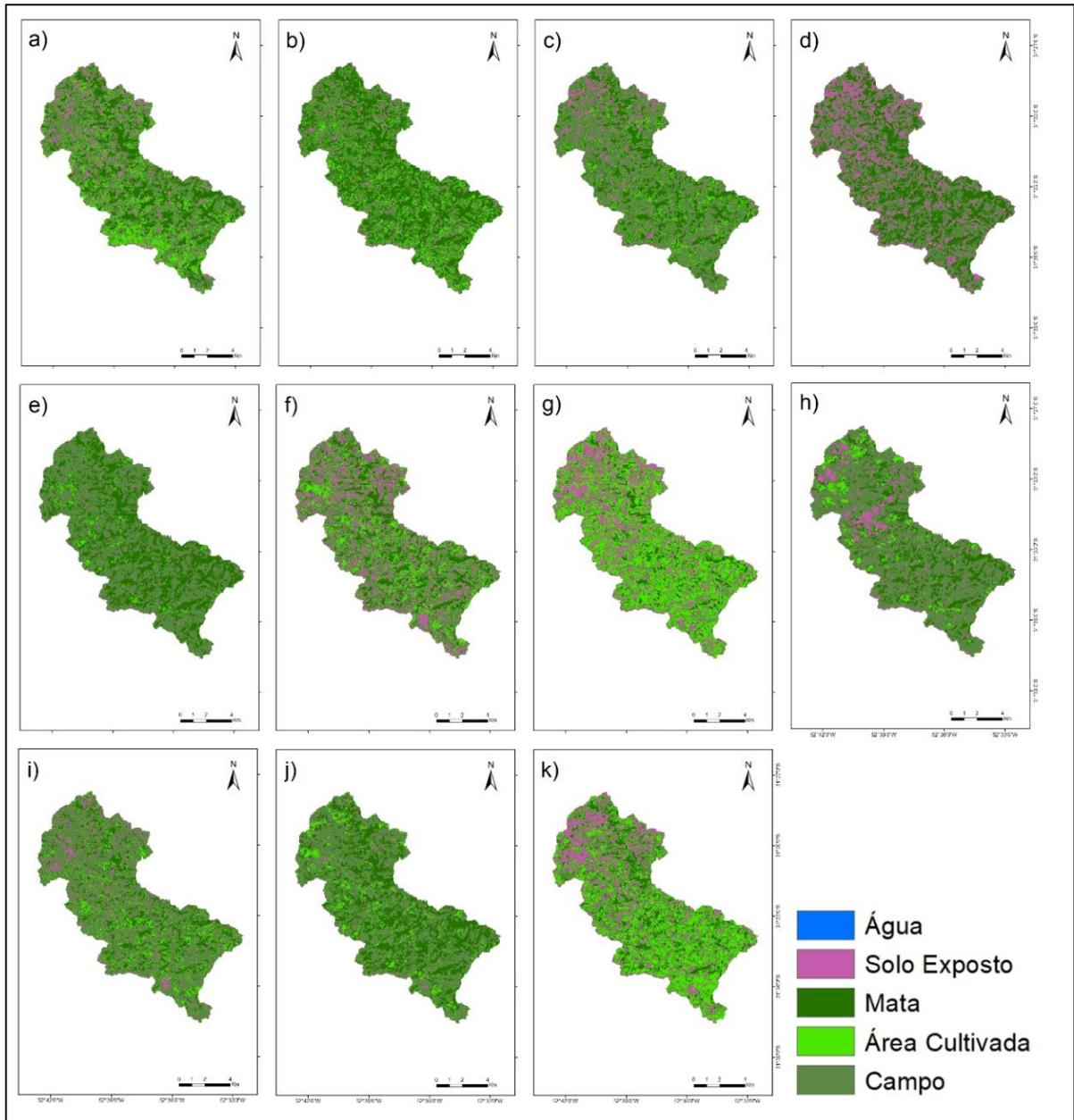


Figura 17 – Classificação das imagens de satélite para Água, Mata, Solo exposto, Agricultura e Campo para as datas de a) 07/05/2015, b) 27/08/2015, c) 28/09/2015, d) 18/01/2016, e) 28/02/2016, f) 13/08/2016, g) 09/10/2016, h) 02/03/2017, i) 21/05/2017, j) 08/07/2017, k) 15/10/2018

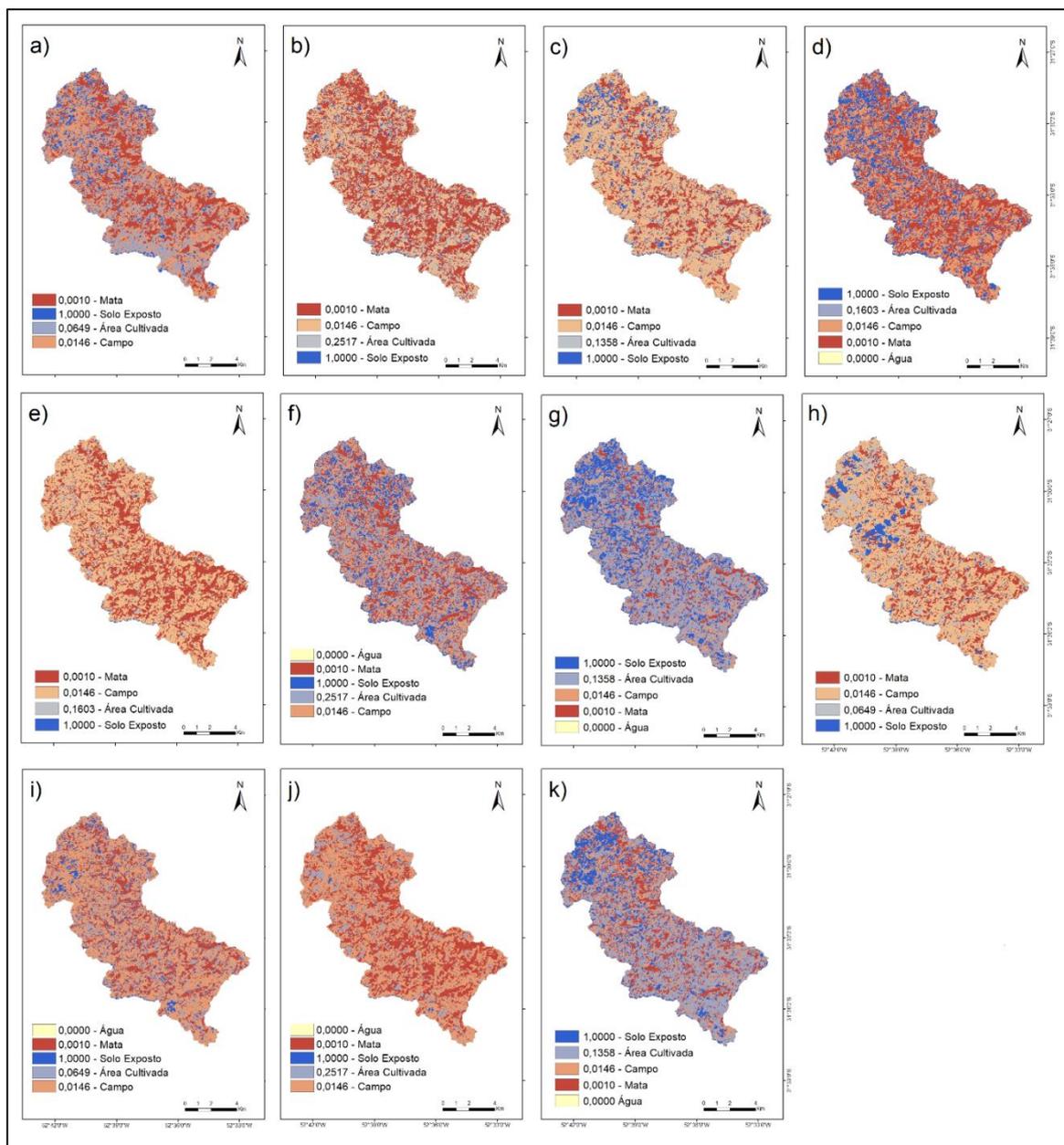


Figura 18 – Fator C para as classes de Água, Mata, Solo exposto, Agricultura e Campo para as datas de a) 07/05/2015, b) 27/08/2015, c) 28/09/2015, d) 18/01/2016, e) 28/02/2016, f) 13/08/2016, g) 09/10/2016, h) 02/03/2017, i) 21/05/2017, j) 08/07/2017, k) 15/10/2018

Quando se utiliza esse tipo de processo de classificação de imagens, vale salientar que existem algumas dificuldades na aquisição das imagens de satélite que não possibilitem que se obtenha a imagem no exato momento que se deseja. Dentre algumas limitações, destacam-se a cobertura de nuvens e tempo de revisita do satélite, em que a cobertura de nuvens é atualmente a mais crítica, já que são registradas pelo satélite, da mesma forma que a superfície, impedindo, muitas vezes, de visualizar a área de interesse. Semelhantemente, o nível de detalhamento das

imagens, relacionado com a resolução, pode vir a interferir, uma vez que pontos de menor tamanho, podem não ser identificados na classificação, como por exemplo o que foi identificado para a Água, em algumas das imagens para a BHAC.

Porém, esta metodologia é amplamente utilizada em pesquisas na área de erosão do solo e outros diversos objetivos de classificação, sendo uma metodologia confiável, prática e relativamente rápida. Arraes *et al.* (2010) com o objetivo de estimar a taxa de desmatamento anual e diária para o município de Bannach, Pará, Brasil, utilizaram a metodologia de classificação supervisionada de imagens do satélite LandSat5 pelo método da máxima verossimilhança. Os autores identificaram que a metodologia foi eficiente para a classificação, podendo inferir que houve um aumento do desmatamento de forma contínua, entre 1997 a 2009, acarretado principalmente pelo crescimento da pecuária na região. Campos *et al.* (2004) tiveram como objetivo avaliar a evolução do uso da terra no município de Botucatu, São Paulo, no período de três anos, tendo como base imagens de satélite LandSat5 em classificação supervisionada. Os resultados mostraram que a metodologia foi adequada para identificar e mapear as áreas de uso da terra, facilitando o processamento e fornecendo um excelente banco de dados.

A partir da classificação das imagens de satélite e valores do fator C da literatura, foi possível determinar o fator C médio para cada uma das datas para aplicação da MUSLE. Por existir mais de um tipo de uso e cobertura sobre a sub-bacia, foi necessário para o cálculo que o fator C fosse obtido pela média ponderada dos valores de C, de cada uso e cobertura, tendo como ponderador a área ocupada. A Tabela 9 apresenta os valores do fator C para cada classe e as respectivas áreas, bem como os valores do fator C médio, para as diferentes datas analisadas.

Tabela 9 – Valores do Fator C médio para as datas analisadas, calculado a partir respectiva área para cada uma das classes encontradas para bacia hidrográfica do arroio Cadeia (BHAC)

Datas	Classes	Área (km ²)	Fator C	Fator C médio
07/05/2015	Mata	33,6	0,0010	0,1124
	Solo Exposto	11,4	1,0000	
	Área Cultivada	23,2	0,0649	
	Campo	54,3	0,0146	
27/08/2015	Mata	54,6	0,0010	0,0851
	Solo Exposto	4,7	1,0000	
	Área Cultivada	20,1	0,2517	
	Campo	43,1	0,0146	
28/09/2015	Mata	28,4	0,0010	0,1071
	Solo Exposto	10,2	1,0000	
	Área Cultivada	13,5	0,1358	
	Campo	70,4	0,0146	
18/01/2016	Água	0,004	0,0000	0,2175
	Mata	38,6	0,0010	
	Solo Exposto	25,7	1,0000	
	Área Cultivada	0,2	0,1603	
	Campo	57,9	0,0146	
28/02/2016	Mata	44,4	0,0010	0,0349
	Solo Exposto	2,3	1,0000	
	Área Cultivada	5,5	0,1603	
	Campo	70,3	0,0146	
13/08/2016	Água	0,001	0,0000	0,2508
	Mata	23,2	0,0010	
	Solo Exposto	24,7	1,0000	
	Área Cultivada	20,8	0,2517	
	Campo	53,8	0,0146	
09/10/2016	Água	0,003	0,0000	0,3050
	Mata	14,4	0,0010	
	Solo Exposto	29,5	1,0000	
	Área Cultivada	55,2	0,1358	
	Campo	23,4	0,0146	
02/03/2017	Mata	24,2	0,0010	0,1080
	Solo Exposto	11,5	1,0000	
	Área Cultivada	8,8	0,0649	
	Campo	78,0	0,0146	
21/05/2017	Água	0,003	0,0000	0,1018
	Mata	25,6	0,0010	
	Solo Exposto	10,5	1,0000	
	Área Cultivada	14,2	0,0649	
	Campo	72,3	0,0146	
08/07/2017	Água	0,003	0,0000	0,0519
	Mata	41,2	0,0010	
	Solo Exposto	2,5	1,0000	
	Área Cultivada	11,4	0,2617	
	Campo	67,5	0,0146	
15/10/2018	Água	0,001	0,0000	0,2347
	Mata	20,9	0,0010	
	Solo Exposto	22,2	1,0000	
	Área Cultivada	44,5	0,1358	
	Campo	34,9	0,0146	

3.2.4 Fatores Qs e qp

Para se obter os fatores Qs e qp foram selecionados 44 eventos de maiores magnitudes com uma única vazão de pico para BHAC. Para o cálculo da produção de sedimentos pela MUSLE, os eventos foram associados aos fatores C correspondentes à imagem de satélite mais próxima da data do evento. A Tabela 10 mostra as datas dos eventos, considerando as imagens de satélite disponíveis para a classificação, as quais foram utilizadas e classificadas por uso e ocupação.

Tabela 10 – Datas dos eventos chuva-vazão selecionados para análise de produção de sedimentos aplicando a MUSLE e as respectivas datas das imagens de satélite classificadas

Data da Imagem	Evento	Data do Evento
07/05/2015	1	10/05/2015
	2	13/07/2015
	3	17/07/2015
27/08/2015	4	18/07/2015
	5	04/08/2015
	6	16/08/2015
	7	16/09/2015
	8	20/09/2015
	9	22/09/2015
28/09/2015	10	14/10/2015
	11	20/10/2015
	12	10/11/2015
	13	12/11/2015
	14	27/11/2015
	15	03/12/2015
	16	18/12/2015
18/01/2016	17	05/01/2016
	18	06/01/2016
	19	29/01/2016
	20	26/03/2016
	21	06/04/2016
28/02/2016	22	11/04/2016
	23	21/04/2016
	24	24/04/2016
	25	15/05/2016
13/08/2016	26	29/08/2016

Data da Imagem	Evento	Data do Evento
	27	05/09/2016
	28	12/09/2016
09/10/2016	29	17/10/2016
	30	19/10/2016
	31	01/11/2016
02/03/2017	32	22/02/2017
	33	09/03/2017
	34	11/03/2017
21/05/2017	35	12/05/2017
	36	20/05/2017
	37	24/05/2017
08/07/2017	38	07/06/2017
	39	28/06/2017
	40	01/08/2017
	41	23/09/2018
15/10/2018	42	29/09/2018
	43	09/10/2018
	44	11/10/2018

Os valores de Q_s e q_p e as respectivas datas e tempo de ocorrência dos eventos são apresentadas na Tabela 11, bem como o valor de precipitação e produção de sedimento total (PSt) correspondente ao evento calculadas pelas duas metodologias propostas de curva-chave, aplicando os dados completos e divididos em intervalo de vazão. Os eventos foram ordenados pelas datas de ocorrência.

Tabela 11 – Eventos selecionados para a sub-bacia analisada, suas respectivas datas, tempo de ocorrência do evento, valores observados de precipitação total (P total), volume de escoamento (Qs), vazão de pico (qp) e produção de sedimentos suspensos total (PSt) para cada evento, estimados pelo sedimentograma para BHAC

Evento	Data do Evento	Duração evento chuva	Duração evento Q _{ESD}	P _{total}	qp	Qs	Qs	PSt1	PSt2
		h	h	mm	m ³ s ⁻¹	m ³	mm	Mg	
1	10/05/2015	34,0	31,5	76,75	4,81	235832,6	1,94	8,7	10,83
2	13/07/2015	32,0	22,0	14,03	4,82	132922,3	1,10	13,1	11,81
3	17/07/2015	26,0	22,5	43,61	6,97	216391,4	1,78	15,1	19,84
4	18/07/2015	44,0	48,0	113,26	72,15	4189266,1	34,54	801,0	2261,06
5	04/08/2015	41,0	35,5	31,98	8,76	321199,2	2,65	20,3	26,81
6	16/08/2015	30,0	24,5	33,00	4,49	172794,6	1,42	9,9	11,41
7	16/09/2015	13,0	28,5	50,67	17,28	712381,4	5,87	59,8	113,28
8	20/09/2015	38,0	27,5	47,49	25,71	914894,2	7,54	118,8	243,72
9	22/09/2015	15,0	17,5	41,63	74,79	1603777,0	13,22	391,6	1107,79
10	14/10/2015	32,0	35,0	66,55	106,70	3112091,3	25,66	741,1	2233,58
11	20/10/2015	4,5	19,0	37,32	48,10	1198837,3	9,88	216,1	538,55
12	10/11/2015	10,0	27,5	36,53	11,56	494945,2	4,08	40,7	67,86
13	12/11/2015	14,0	19,5	18,41	17,53	449552,6	3,71	51,1	86,40
14	27/11/2015	15,0	14,5	13,54	8,69	147612,4	1,22	10,2	13,49
15	03/12/2015	23,5	41,5	33,31	15,08	479113,8	3,95	29,9	46,07
16	18/12/2015	22,5	23,0	31,57	23,29	553452,0	4,56	54,8	100,43
17	05/01/2016	16,0	22,0	53,53	14,86	435524,3	3,59	35,2	61,44
18	06/01/2016	16,0	13,5	36,90	57,54	1001709,1	8,26	189,5	496,66
19	29/01/2016	12,5	12,0	27,20	8,75	127221,7	1,05	7,2	10,17
20	26/03/2016	30,5	25,5	132,71	114,31	4449722,0	36,68	1321,8	4448,70
21	06/04/2016	16,0	19,5	18,53	6,00	195738,6	1,61	13,9	18,29
22	11/04/2016	47,5	43,5	41,67	13,28	751986,6	6,20	81,7	126,81

Evento	Data do Evento	Duração evento chuva	Duração evento QESD	Ptotal	qp	Qs	Qs	PSt1	PSt2
		h	h	mm	m ³ s ⁻¹	m ³	mm	Mg	
23	21/04/2016	25,0	33,0	24,82	10,59	379196,3	3,13	28,2	40,06
24	24/04/2016	48,0	45,5	102,87	52,03	4093101,8	33,74	717,8	1863,52
25	15/05/2016	20,5	17,5	44,67	21,26	521180,5	4,30	56,9	112,43
26	29/08/2016	54,5	50,0	101,59	28,14	2063981,4	17,02	284,1	605,18
27	05/09/2016	31,5	29,5	30,06	20,51	785479,0	6,48	121,4	198,46
28	12/09/2016	23,5	20,5	24,03	12,63	344317,2	2,84	28,5	46,06
29	17/10/2016	5,5	15,5	29,16	4,79	111393,0	0,92	7,2	8,60
30	19/10/2016	21,0	26,0	21,05	9,08	323393,8	2,67	25,0	35,36
31	01/11/2016	19,5	29,0	51,54	31,10	1142728,8	9,42	120,0	257,36
32	22/02/2017	26,0	13,0	27,00	56,20	675869,7	5,57	98,0	249,67
33	09/03/2017	20,0	23,5	36,41	9,22	266007,6	2,19	15,2	22,02
34	11/03/2017	32,0	30,0	32,68	15,43	553294,2	4,56	38,9	65,74
35	12/05/2017	37,5	26,5	104,97	48,77	1818216,0	14,99	251,2	630,17
36	20/05/2017	30,5	30,0	26,08	7,99	337728,1	2,78	20,0	27,63
37	24/05/2017	55,5	32,0	74,70	55,69	1932553,1	15,93	358,7	899,32
38	07/06/2017	63,0	56,0	59,02	22,77	1709305,9	14,09	158,8	305,32
39	28/06/2017	54,5	48,0	42,53	7,10	367529,0	3,03	18,3	23,39
40	01/08/2017	55,5	45,0	53,07	6,63	436973,9	3,60	22,4	30,44
41	23/09/2018	34,0	48,0	65,65	26,48	1425979,3	11,76	169,9	341,34
42	29/09/2018	12,5	28,5	37,84	41,27	1465515,4	12,08	216,7	513,71
43	09/10/2018	3,5	18,5	61,44	49,18	1070369,5	8,82	152,0	374,31
44	11/10/2018	33,0	37,0	40,52	32,11	1485968,4	12,25	198,2	424,58

Ptotal: Precipitação total; qp: vazão de pico do escoamento superficial direto do evento; Qs: volume de escoamento superficial direto do evento; PSt1: produção de sedimento total do evento (Mg) considerando a Proposta 1 de curva-chave; PSt2: produção de sedimento total do evento (Mg) considerando a Proposta 2 de curva-chave.

Observa-se na Tabela 11 que, para a BHAC, os eventos selecionados apresentaram uma variação de 13mm até 133mm de precipitação total, bem como registraram entre $4,5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ a uma máxima de $114,3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e $111.393,0\text{m}^3$ a $4.449.722,0\text{m}^3$ de vazão de pico (qp) e volume de escoamento superficial direto (Qs), respectivamente, abrangendo considerável intervalo para as análises. O evento que apresentou maiores valores, tanto para qp e Qs como para a produção de sedimento total (PSt) totalizando 4.448,7 Mg, foi o Evento 20 do dia 26/03/2016, que também apresentou a maior precipitação total registrada entre os eventos. Esse evento por outro lado, não apresenta maior duração (~30h) entre os eventos selecionados, o que pode ter influenciado a elevada qp, considerando o elevado volume de precipitação. O Evento 29 de 17/10/2016 apresentou os menores valores de qp, Qs e PSt, com apenas 8,6 Mg de produção de sedimento (Tabela 11).

Para a PSt, como comentado anteriormente, aplicou-se duas propostas para a metodologia de ajuste da curva-chave, uma que utilizou dos dados completos (PSt1) e a outra que dividiu dos dados em dois intervalos de vazão (PSt2). Nesse sentido, pode-se observar na Tabela 11 que a curva-chave ajustada com os dados completos tende a subestimar os valores de PSt para todos os eventos. Esse resultado corrobora com o que foi observado no ajuste da curva-chave (Figura 13), em que verificou-se que a linha de tendência estaria projetada muito abaixo do valor mais alto observado da relação entre vazão e Qss, o que tenderia a essa subestimativa. Por outro lado, o ajuste da curva-chave com os dados divididos em dois intervalos de vazão, PSt2, apresentaram-se mais próximos dos valores observados, uma vez que obteve-se por esse ajuste os menores valores de ERP e maiores R^2 (Figura 13).

Neste sentido, é interessante notar, que quando se analisa as diferenças entre as PSt adquiridas pelas diferentes propostas de ajuste da curva-chave (dados completos, PSt1, e dados divididos PSt2), a maior diferença entre esses valores foi observada no evento de maior magnitude, 20/03/2016, que atingiu as maiores vazões registradas entre os eventos. Este fato demonstra, mais uma vez, a capacidade de subestimação da curva-chave ajustada com os dados completos, PSt1, que percebe-se principalmente no ajuste de altos valores de vazão, como observa-se na linha de tendência na Figura 13. Neste mesmo sentido, fazendo-se uma análise contrária, o evento que apresentou menor diferença entre as estimativas das propostas das

curvas-chave foi exatamente o que possui menores valores de vazão, 17/10/2016, que da mesma forma, reforça um menor viés para dados menores vazões (Figura 13).

O valor da PSt, para cada um dos eventos, calculado a partir do sedimentograma derivado do hidrograma combinado com as curvas-chave (Tabela 11), foi considerado neste trabalho como valor observado, haja vista que foi proveniente da relação entre vazão e Qss adquiridas pelas campanhas hidrológicas. O valor observado de PSt foi comparado com o valor estimado pela MUSLE com o objetivo de avaliar a capacidade preditiva da MUSLE para quantificação da produção de sedimentos (PS), correlacionando os resultados oriundos da descarga sólida, em cada evento de precipitação selecionado.

3.3 Estimativa pela MUSLE e comparação com os dados observados

A MUSLE, proposta originalmente por Williams (1975), apresenta coeficientes empíricos *a* e *b*. No entanto, esses coeficientes podem variar em função das condições fisiográficas e hidrológicas das bacias (Silva *et al.*, 2011). Três Cenários para esses coeficientes da MUSLE, foram testados para a BHAC: 1) coeficientes de Williams (1975): $a=89,6$ e $b=0,56$; 2) coeficientes de Avanzi *et al.* (2008): $a=14,96$ e $b=0,59$; e 3) coeficientes calibrados para BHAC, que consideraram duas propostas de curva-chave.

A Tabela 12 apresenta os valores dos fatores de K, LS, C, Qs e qp para todos eventos selecionados, bem como, os valores de produção de sedimento total (PSt) estimados pela MUSLE para a BHAC, pela aplicação dos coeficientes *a* e *b* de Williams (1975) e Avanzi *et al.* (2008). O fator P de práticas conservacionistas não foi considerado na Tabela 12, uma vez que, foi tido como valor 1, dado que na BHAC foi julgado que não são adotadas práticas conservacionistas, conforme a realidade da área.

Tabela 12 – Produção de sedimento (PS) estimada pela MUSLE, aplicando os coeficientes *a* e *b* de Williams (1975) e Avanzi *et al.* (2008) para BHAC e produção de sedimentos total (PSt) considerando diferentes propostas de curva-chave (PSt1 e PSt2)

Evento	K	LS	C	Qs	Qs	qp	a	b	PS	PSt1	PSt2
	Mg h MJ ⁻¹ mm ⁻¹			m ³	mm	m ³ s ⁻¹				Mg	
1	0,034	12,36	0,1124	235832,6	1,94	4,81	89,60	0,56	10410,4	8,7	10,8
	0,034	12,36	0,1124	235832,6	1,94	4,81	14,96	0,59	2,6		
2	0,034	12,36	0,0851	132922,3	1,10	4,82	89,60	0,56	5721,1	13,1	11,8
	0,034	12,36	0,0851	132922,3	1,10	4,82	14,96	0,59	1,4		
3	0,034	12,36	0,0851	216391,4	1,78	6,97	89,60	0,56	9238,9	15,1	19,8
	0,034	12,36	0,0851	216391,4	1,78	6,97	14,96	0,59	2,4		
4	0,034	12,36	0,0851	4189266,1	34,54	72,15	89,60	0,56	179786,4	801,0	2261,1
	0,034	12,36	0,0851	4189266,1	34,54	72,15	14,96	0,59	54,0		
5	0,034	12,36	0,0851	321199,2	2,65	8,76	89,60	0,56	13102,3	20,3	26,8
	0,034	12,36	0,0851	321199,2	2,65	8,76	14,96	0,59	3,4		
6	0,034	12,36	0,0851	172794,6	1,42	4,49	89,60	0,56	6370,6	9,9	11,4
	0,034	12,36	0,0851	172794,6	1,42	4,49	14,96	0,59	1,6		
7	0,034	12,36	0,1071	712381,4	5,87	17,28	89,60	0,56	37691,6	59,8	113,3
	0,034	12,36	0,1071	712381,4	5,87	17,28	14,96	0,59	10,3		
8	0,034	12,36	0,1071	914894,2	7,54	25,71	89,60	0,56	54161,6	118,8	243,7
	0,034	12,36	0,1071	914894,2	7,54	25,71	14,96	0,59	15,1		
9	0,034	12,36	0,1071	1603777,0	13,22	74,79	89,60	0,56	134865,2	391,6	1107,8
	0,034	12,36	0,1071	1603777,0	13,22	74,79	14,96	0,59	39,4		
10	0,034	12,36	0,1071	3112091,3	25,66	106,70	89,60	0,56	238531,5	741,1	2233,6
	0,034	12,36	0,1071	3112091,3	25,66	106,70	14,96	0,59	71,8		

Evento	K	LS	C	Qs	Qs	qp	a	b	PS	PSt1	PSt2
	Mg h MJ-1 mm-1			m ³	mm	m ³ s-1				Mg	
11	0,034	12,36	0,1071	1198837,3	9,88	48,10	89,60	0,56	89486,6	216,1	538,6
	0,034	12,36	0,1071	1198837,3	9,88	48,10	14,96	0,59	25,6		
12	0,034	12,36	0,1071	494945,2	4,08	11,56	89,60	0,56	24543,3	40,7	67,9
	0,034	12,36	0,1071	494945,2	4,08	11,56	14,96	0,59	6,5		
13	0,034	12,36	0,1071	449552,6	3,71	17,53	89,60	0,56	29359,0	51,1	86,4
	0,034	12,36	0,1071	449552,6	3,71	17,53	14,96	0,59	7,9		
14	0,034	12,36	0,1071	147612,4	1,22	8,69	89,60	0,56	10624,0	10,2	13,5
	0,034	12,36	0,1071	147612,4	1,22	8,69	14,96	0,59	2,7		
15	0,034	12,36	0,2175	479113,8	3,95	15,08	89,60	0,56	56786,8	29,9	46,1
	0,034	12,36	0,2175	479113,8	3,95	15,08	14,96	0,59	15,2		
16	0,034	12,36	0,2175	553452,0	4,56	23,29	89,60	0,56	78532,4	54,8	100,4
	0,034	12,36	0,2175	553452,0	4,56	23,29	14,96	0,59	21,5		
17	0,034	12,36	0,2175	435524,3	3,59	14,86	89,60	0,56	53387,8	35,2	61,4
	0,034	12,36	0,2175	435524,3	3,59	14,86	14,96	0,59	14,3		
18	0,034	12,36	0,2175	1001709,1	8,26	57,54	89,60	0,56	181675,4	189,5	496,7
	0,034	12,36	0,2175	1001709,1	8,26	57,54	14,96	0,59	51,9		
19	0,034	12,36	0,2175	127221,7	1,05	8,75	89,60	0,56	19922,7	7,2	10,2
	0,034	12,36	0,2175	127221,7	1,05	8,75	14,96	0,59	5,1		
20	0,034	12,36	0,0349	4449722,0	36,68	114,31	89,60	0,56	98800,4	1321,8	4448,7
	0,034	12,36	0,0349	4449722,0	36,68	114,31	14,96	0,59	30,1		

Evento	K	LS	C	Qs	Qs	qp	a	b	PS	PSt1	PSt2
	Mg h MJ ⁻¹ mm ⁻¹			m ³	mm	m ³ s ⁻¹				Mg	
21	0,034	12,36	0,0349	195738,6	1,61	6,00	89,60	0,56	3297,0	13,9	18,3
	0,034	12,36	0,0349	195738,6	1,61	6,00	14,96	0,59	0,8		
22	0,034	12,36	0,0349	751986,6	6,20	13,28	89,60	0,56	10936,1	81,7	126,8
	0,034	12,36	0,0349	751986,6	6,20	13,28	14,96	0,59	3,0		
23	0,034	12,36	0,0349	379196,3	3,13	10,59	89,60	0,56	6564,6	28,2	40,1
	0,034	12,36	0,0349	379196,3	3,13	10,59	14,96	0,59	1,7		
24	0,034	12,36	0,0349	4093101,8	33,74	52,03	89,60	0,56	60676,5	717,8	1863,5
	0,034	12,36	0,0349	4093101,8	33,74	52,03	14,96	0,59	18,0		
25	0,034	12,36	0,0349	521180,5	4,30	21,26	89,60	0,56	11591,4	56,9	112,4
	0,034	12,36	0,0349	521180,5	4,30	21,26	14,96	0,59	3,2		
26	0,034	12,36	0,2508	2063981,4	17,02	28,14	89,60	0,56	210343,0	284,1	605,2
	0,034	12,36	0,2508	2063981,4	17,02	28,14	14,96	0,59	60,1		
27	0,034	12,36	0,3050	785479,0	6,48	20,51	89,60	0,56	124773,8	121,4	198,5
	0,034	12,36	0,3050	785479,0	6,48	20,51	14,96	0,59	34,3		
28	0,034	12,36	0,3050	344317,2	2,84	12,63	89,60	0,56	59929,4	28,5	46,1
	0,034	12,36	0,3050	344317,2	2,84	12,63	14,96	0,59	15,8		
29	0,034	12,36	0,3050	111393,0	0,92	4,79	89,60	0,56	18502,8	7,2	8,6
	0,034	12,36	0,3050	111393,0	0,92	4,79	14,96	0,59	4,6		
30	0,034	12,36	0,3050	323393,8	2,67	9,08	89,60	0,56	48102,0	25,0	35,4
	0,034	12,36	0,3050	323393,8	2,67	9,08	14,96	0,59	12,6		

Evento	K	LS	C	Qs	Qs	qp	a	b	PS	PSt1	PSt2
	Mg h MJ ⁻¹ mm ⁻¹			m ³	mm	m ³ s ⁻¹				Mg	
31	0,034	12,36	0,3050	1142728,8	9,42	31,10	89,60	0,56	194332,3	120,0	257,4
	0,034	12,36	0,3050	1142728,8	9,42	31,10	14,96	0,59	54,7		
32	0,034	12,36	0,1080	675869,7	5,57	56,20	89,60	0,56	71395,1	98,0	249,7
	0,034	12,36	0,1080	675869,7	5,57	56,20	14,96	0,59	20,1		
33	0,034	12,36	0,1018	266007,6	2,19	9,22	89,60	0,56	14514,1	15,2	22,0
	0,034	12,36	0,1018	266007,6	2,19	9,22	14,96	0,59	3,8		
34	0,034	12,36	0,1018	553294,2	4,56	15,43	89,60	0,56	29180,3	38,9	65,7
	0,034	12,36	0,1018	553294,2	4,56	15,43	14,96	0,59	7,9		
35	0,034	12,36	0,1018	1818216,0	14,99	48,77	89,60	0,56	108201,7	251,2	630,2
	0,034	12,36	0,1018	1818216,0	14,99	48,77	14,96	0,59	31,3		
36	0,034	12,36	0,1018	337728,1	2,78	7,99	89,60	0,56	15305,9	20,0	27,6
	0,034	12,36	0,1018	337728,1	2,78	7,99	14,96	0,59	4,0		
37	0,034	12,36	0,1018	1932553,1	15,93	55,69	89,60	0,56	120602,8	358,7	899,3
	0,034	12,36	0,1018	1932553,1	15,93	55,69	14,96	0,59	35,1		
38	0,034	12,36	0,0519	1709305,9	14,09	22,77	89,60	0,56	34804,0	158,8	305,3
	0,034	12,36	0,0519	1709305,9	14,09	22,77	14,96	0,59	9,8		
39	0,034	12,36	0,0519	367529,0	3,03	7,10	89,60	0,56	7661,7	18,3	23,4
	0,034	12,36	0,0519	367529,0	3,03	7,10	14,96	0,59	2,0		
40	0,034	12,36	0,0519	436973,9	3,60	6,63	89,60	0,56	8128,6	22,4	30,4
	0,034	12,36	0,0519	436973,9	3,60	6,63	14,96	0,59	2,1		

Evento	K	LS	C	Qs	Qs	qp	a	b	PS	PSt1	PSt2
	Mg h MJ ⁻¹ mm ⁻¹			m ³	mm	m ³ s ⁻¹				Mg	
41	0,034	12,36	0,2347	1425979,3	11,76	26,48	89,60	0,56	154689,2	169,9	341,3
	0,034	12,36	0,2347	1425979,3	11,76	26,48	14,96	0,59	43,6		
42	0,034	12,36	0,2347	1465515,4	12,08	41,27	89,60	0,56	201390,4	216,7	513,7
	0,034	12,36	0,2347	1465515,4	12,08	41,27	14,96	0,59	57,6		
43	0,034	12,36	0,2347	1070369,5	8,82	49,18	89,60	0,56	186339,0	152,0	374,3
	0,034	12,36	0,2347	1070369,5	8,82	49,18	14,96	0,59	53,1		
44	0,034	12,36	0,2347	1485968,4	12,25	32,11	89,60	0,56	176350,2	198,2	424,6
	0,034	12,36	0,2347	1485968,4	12,25	32,11	14,96	0,59	50,1		

K: fator K de erodibilidade (Mg h MJ⁻¹ mm⁻¹); LS: fator LS de topografia (adimensional); C: fator C de cobertura (adimensional); Qs: volume de escoamento superficial direto do evento (m³ quando utilizado *a* e *b* de Williams (1975)) (mm quando utilizado *a* e *b* de Avanzi *et al.* (2008)); qp: vazão de pico do escoamento superficial direto do evento (m³ s⁻¹); PS: produção de sedimento (Mg) estimada; PSt1: produção de sedimento total observada do evento (Mg) considerando a Proposta 1 de curva-chave; PSt2: produção de sedimento total observada do evento (Mg) considerando a Proposta 2 de curva-chave.

Observa-se na Tabela 12 que a MUSLE, aplicando os coeficientes a e b de Williams (1975), superestima substancialmente os valores de PSt para todos os eventos selecionados para a BHAC. Este comportamento também foi verificado por outros autores. Odongo *et al.* (2013) avaliaram a aplicação da MUSLE para simular a produção de sedimentos na bacia hidrográfica Malewa no Quênia, identificando que a adoção dos coeficientes a e b originais do modelo MUSLE resultam na superestimação da produção de sedimentos. Noor *et al.* (2012) aplicaram a MUSLE para prever a produção de sedimentos em eventos extremos na bacia hidrográfica de Kojour, no Irã. Os autores identificaram que, em comparação com os dados observados de produção de sedimentos, o modelo superestimou consideravelmente a produção na bacia estudada.

Outros autores, tais como Branco (1998), que objetivou avaliar a produção de sedimentos na bacia hidrográfica do arroio Vacacaí-Mirim, localizada no município de Santa Maria/RS, e compará-la com os resultados obtidos pela MUSLE, concluiu que como método de predição da produção de sedimentos a MUSLE se mostrou inadequada para a bacia estudada, superestimando os valores medidos para todos os eventos testados. Silva *et al.* (2011), também constataram esse resultado, sendo indicada uma superestimação de mais de 100% para a produção de sedimento estimada pela MUSLE na sua forma original para a bacia do ribeirão Pípiripau localizada no Distrito Federal. Neste mesmo sentido, Dos Santos *et al.* (2014) no semiárido brasileiro, para as coberturas de Caatinga Nativa, Caatinga Raleada e Capim (pós desmatamento e queima), compararam o uso dos coeficientes originalmente recomendados por Williams (1975) com dados da calibração, o que indicou baixo desempenho do modelo com os coeficientes originais.

Desta forma, foi possível verificar que os resultados da aplicação da MUSLE na sua forma original, ou seja, utilizando os coeficientes originalmente estimados por Williams (1975), não produziu estimativas adequadas de produção de sedimentos para a BHAC, em nenhum dos eventos, bem como, para nenhuma das propostas de curva-chave. Sadeghi *et al.* (2007), da mesma forma, ao ajustarem a MUSLE na microbacia de Hinotani-ike localizada na província de Mie, região central do Japão, com o objetivo de avaliar a sua aplicabilidade, identificaram uma alta capacidade da MUSLE em superestimar a produção de sedimentos, comparada com dados observados de 8 eventos registrados para a bacia. Os autores discutem, o que pode

ser avaliado também para os resultados da BHAC, que a diferença entre os valores de produção de sedimentos medidos e estimados pela MUSLE, pode ser atribuída ao tamanho da bacia (BHAC 122,5km²), que são para além das condições sob as quais a MUSLE foi originalmente desenvolvida (área máxima de aproximadamente 17 km²) (WILLIAMS, 1975; WILLIAMS e BERNDT, 1977).

Neste sentido, pode-se discutir a existência de uma tendência de que aumentando a área de drenagem, diminui-se a taxa de entrega de sedimentos (SDR), ou seja, existe uma maior deposição de sedimentos ao longo da bacia maior. Portando, ao considerar que os valores *a* e *b* ajustados para pequenas bacias também são válidos para bacias como a BHAC, considerar-se-ia a mesma magnitude de SDR e, conseqüentemente, a mesma magnitude de deposição, superestimando os valores de PS. Além disso, Sadeghi *et al.* (2007), salientam que a superestimação pela MUSLE, além de ocorrer pelo desenvolvimento original do modelo ter sido para áreas menores do que do presente estudo, também por não ser regido pelo clima úmido (WILLIAMS e BERNDT, 1977) podendo justificar o desacordo existente.

Ainda foram verificados os coeficientes de Avanzi *et al.* (2008) e a aplicação dos coeficientes calibrados pelas características para a BHAC, os quais apresentaram melhores resultados. Analisando a Tabela 12, verifica-se que os valores de PS calculados pela MUSLE, aplicando os coeficientes *a* e *b* de Avanzi *et al.* (2008), parecem estar mais próximos aos valores observados de PSt dos eventos selecionados para a BHAC. O RMSE calculado para o ajuste considerando os dados observados de PSt1 e PSt2 e o estimado pela aplicação dos coeficientes *a* e *b* de Avanzi *et al.* (2008) foram de 289,6 Mg e 908,9 Mg, bem como o R² de 0,28 e 0,22, respectivamente. Porém, vale lembrar, que os coeficientes de Avanzi *et al.* (2008) foram calibrados para as características da microbacia hidrográfica experimental, situada na cidade de Aracruz/ES, com cobertura predominante de eucalipto e floresta nativa, para uma bacia hidrográfica de declividade plana e com um fator LS baixo de 1,28. Esse autor, obteve valores bem baixos de produção de sedimentos, uma vez que na bacia em estudo foi identificado pouco transporte de sedimentos, dados esses que também foram utilizados para a calibração dos coeficientes *a* e *b*. Além disso, R² menores que 0,5 indicam incapacidade do modelo (SADEGHI *et al.*, 2010).

Odongo *et al.* (2013) mostraram, estudando a sensibilidade dos parâmetros da MUSLE, que os fatores mais sensíveis do modelo foram os coeficientes *a* e *b*

contribuindo com cerca de 66% da variabilidade da produção de sedimentos. Diversos estudos vêm apontando a necessidade de calibração desses coeficientes para as condições locais (Avanzi *et al.*, 2008; Paranhos e Paiva, 2008; Silva *et al.*, 2011). Desta forma, a calibração dos coeficientes *a* e *b* foi realizada para a BHAC. Os resultados dos coeficientes *a* e *b*, bem como, os índices de estatística para o ajuste do Cenário 3, são apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 – Valores dos coeficientes *a* e *b* da MUSLE calibrados e validados para BHAC e resultados dos índices estatísticos de RMSE, NS e R², para as duas propostas de curva-chave

Proposta de curva-chave de sedimentos	a	b	Índice estatístico	Calibração	Validação
PSt1	3,44	1,34	RMSE	103,7	209,9
			NS	0,71	0,64
			R ²	0,60	0,58
PSt2	4,07	1,45	RMSE	256,5	691,7
			NS	0,76	0,65
			R ²	0,64	0,48

PSt1: produção de sedimento total do evento considerando a Proposta 1 de curva-chave; PSt2: produção de sedimento total do evento considerando a Proposta 2 de curva-chave.

Pode-se observar que os coeficientes *a* e *b* calibrados para as características da BHAC, diferiram dos coeficientes de Williams (1975) e Avanzi *et al.* (2008). Para Cenário 3, de calibração e validação para a BHAC, observa-se na Tabela 13, que para a Proposta 1 (PSt1) de curva-chave de sedimentos, RMSE menores foram verificados, porém, para o NS a Proposta 2 (PSt2) tanto para calibração como validação apresentou melhores resultados, bem como para o R² na calibração. Observa-se também que o índice estatístico do RMSE parece ser mais sensível a troca de propostas de curva-chave do que o NS e R². A PSt1 faz a proposta de se utilizar a curva-chave de sedimentos de forma completa, ou seja, ajusta-se a curva-chave de sedimentos utilizando todos os dados disponibilizados para BHAC, e analisando os resultados do índice estatístico do RMSE, essa proposta parece ser mais indicada para o ajuste da MUSLE, com valores menores de RMSE. Porém, como utilizou-se um conjunto de índices estatísticos, realizar uma análise somente do RMSE não seria coerente. Isso é denotado quando analisamos os resultados de R² e NS que tenderam a um comportamento contrário entre as propostas de curva-chave, exceto para o R² da PSt2 de validação.

Na calibração e com o uso da função objetivo, o NS atingiu o valor de 0,76 com a PSt2 considerado, portanto, adequado e bom ($NS > 0,75$) (SANTOS *et al.*, 2014). Para essa mesma proposta de curva-chave (PSt2), objetivando verificar o desempenho do ajuste encontrado na etapa da calibração, obteve-se na etapa de validação um coeficiente NS com valor de 0,65, enquadrando-se na categoria de aceitável. Embora a calibração tenha apresentado um ajuste melhor (como previsto), o NS na validação continua apontando para um bom ajuste, considerado como aceitável para as duas propostas (PSt1 e PSt2). A previsão de que o ajuste da calibração será de melhor eficiência comparado ao de validação, além de levar em consideração que se utiliza as próprias informações dos eventos para estimar os coeficientes a e b e depois deles se estima a PS, na calibração se utilizou um maior número de eventos, 2/3 dos eventos, o que pode ter influenciado o ajuste de forma positiva, considerando o comportamento de um número maior de eventos, comparado com a validação. Para complementar a discussão, a Figura 19 apresenta a dispersão dos valores de produção de sedimentos entre as propostas 1 e 2 de curva-chave de sedimentos e os obtidos pela calibração e validação dos coeficientes a e b para BHAC.

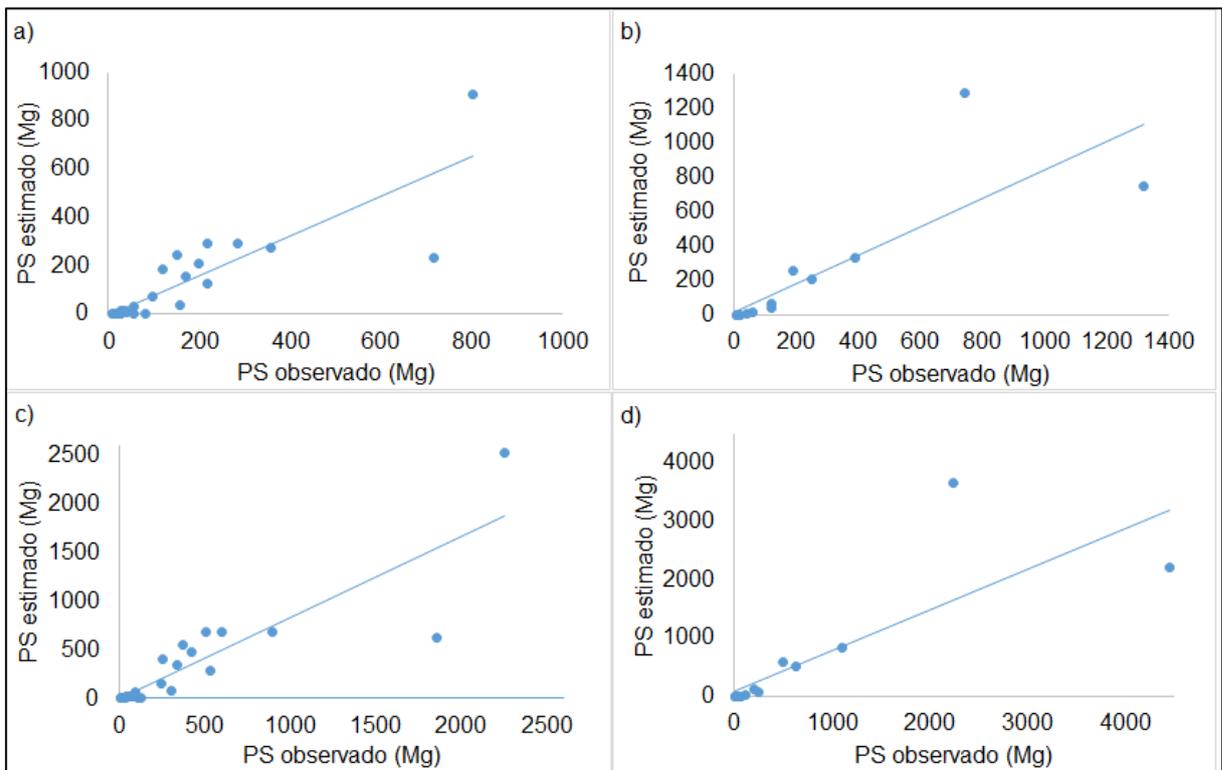


Figura 19 – Dispersão dos valores de produção de sedimentos observados e estimados ajustando os coeficientes a e b da MUSLE para BHAC pela a) PSt1 em calibração; b) PSt1 em validação; c) PSt2 em calibração e d) PSt2 em validação

Analisando a Figura 19, corroborando com os resultados de NS e R^2 da Tabela 13, observa-se uma pequena superioridade nos ajustes considerando a proposta de curva-chave PSt2 para etapa de calibração, pela proximidade dos dados observados com os estimados observando a linha de tendência. Essa proposta considera o ajuste da curva-chave com a divisão dos dados em intervalos de excedência de frequência de vazão. Neste sentido, é interessante analisar, que essa proposta de curva-chave (PSt2), por mais que na etapa de calibração e validação dos coeficientes a e b obteve um maior RMSE, foi a que obteve melhor os valores de produção de sedimentos observados (Figura 13) de acordo com os resultados dos índices estatísticos de ERP, NS e R^2 . Nesta perspectiva, em outras palavras, vale considerar que essa análise da proposta de curva-chave que seria mais indicada a estimativa de PS é relacionada ao ajuste de a e b com base em dados observados de PS, os quais foram melhor obtidos quando estimados pela PSt2.

Para a BHAC os eventos foram separados de forma aleatória em dois trechos, calibração e validação, para o ajuste dos coeficientes de a e b . Na Tabela 14 são apresentados os valores de produção de sedimentos observados (PStObs), das duas propostas de curva-chave, e os resultados da PSt nos eventos de validação (PStVal) estimados pela MUSLE, ou seja, aqueles eventos que compõe os 1/3 dos eventos que não foram utilizados na calibração, que constitui a etapa de geração dos parâmetros a e b .

Tabela 14 – Produção de sedimentos total (PSt) observada e estimada para os eventos de validação, em duas propostas de curva-chave, considerando a calibração dos coeficientes *a* e *b* da MUSLE obtidos para BHAC

Evento	K	LS	C	Qs	qp	a	b	PSt1 Obs	PSt1 Val	a	b	PSt2 Obs	PSt2 Val
						PSt1				PSt2			
1	0,034	12,36	0,1124	1,94	4,81	3,44	1,34	8,7	0,7	4,07	1,45	10,8	1,0
3	0,034	12,36	0,0851	1,78	6,97	3,44	1,34	15,1	0,8	4,07	1,45	19,8	1,2
7	0,034	12,36	0,1071	5,87	17,28	3,44	1,34	59,8	15,9	4,07	1,45	113,3	31,1
8	0,034	12,36	0,1071	7,54	25,71	3,44	1,34	118,8	37,7	4,07	1,45	243,7	79,4
9	0,034	12,36	0,1071	13,22	74,79	3,44	1,34	391,6	332,3	4,07	1,45	1107,8	836,3
10	0,034	12,36	0,1071	25,66	106,70	3,44	1,34	741,1	1295,7	4,07	1,45	2233,6	3644,5
12	0,034	12,36	0,1071	4,08	11,56	3,44	1,34	40,7	5,7	4,07	1,45	67,9	10,3
14	0,034	12,36	0,1071	1,22	8,69	3,44	1,34	10,2	0,8	4,07	1,45	13,5	1,2
18	0,034	12,36	0,2175	8,26	57,54	3,44	1,34	189,5	253,5	4,07	1,45	496,7	588,7
19	0,034	12,36	0,2175	1,05	8,75	3,44	1,34	7,2	1,3	4,07	1,45	10,2	1,9
20	0,034	12,36	0,0349	36,68	114,31	3,44	1,34	1321,8	747,2	4,07	1,45	4448,7	2202,1
21	0,034	12,36	0,0349	1,61	6,00	3,44	1,34	13,9	0,2	4,07	1,45	18,3	0,3
27	0,034	12,36	0,3050	6,48	20,51	3,44	1,34	121,4	64,8	4,07	1,45	198,5	130,9
33	0,034	12,36	0,1018	2,19	9,22	3,44	1,34	15,2	1,8	4,07	1,45	22,0	2,9
35	0,034	12,36	0,1018	14,99	48,77	3,44	1,34	251,2	210,9	4,07	1,45	630,2	513,4
RMSE									209,9				691,7
NS									0,64				0,65
R ²									0,58				0,48

K: fator K de erodibilidade ($\text{Mg h MJ}^{-1} \text{mm}^{-1}$); LS: fator LS de topografia (adimensional); C: fator C de cobertura (adimensional); Qs: volume de escoamento superficial direto do evento (mm); qp: vazão de pico do escoamento superficial direto do evento ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$); PSt1 e PSt2: produção de sedimento total do evento considerando a Proposta 1 e Proposta 2 de curva-chave, respectivamente (Mg); PStObs: produção de sedimento total observada do evento (Mg); PStVal: produção de sedimento total obtida pela validação dos coeficientes para BHAC (Mg); *a* e *b* coeficientes de ajuste.

Analisando a Tabela 14, pode-se perceber que, diferentemente de quando aplicado os coeficientes a e b de Williams (1975) e Avanzi *et al.* (2008), que mostraram uma tendência constante de superestimação e subestimação, respectivamente, para todos os eventos selecionados, quando aplicados os valores de a e b calibrados para a BHAC, cada evento mostrou um comportamento diferente. Para as duas propostas de curva-chave (PSt1 e PSt2) é interessante observar que a superestimativa da MUSLE ocorreu somente em dois eventos, evento 10 e evento 18, que comparados com os demais eventos, apresentam característica similar de alta magnitude.

Além disso, uma comparação numérica dos valores estimados e observados para BHAC mostrou que os valores estimados pela MUSLE tendem a ter maior diferença dos valores observados em eventos de maior magnitude. Aqueles que apresentam menor magnitude tendem a ter menores diferenças. Este desempenho também foi verificado por Sadeghi *et al.* (2007), que aplicaram a MUSLE na microbacia de Hinotani-ike, Japão.

Considerando os resultados de NS apresentados na Tabela 14, a MUSLE, quando calibrada e validada para BHAC, demonstrou estimativas adequadas, uma vez que o desempenho do modelo pode ser considerado aceitável tendo em vista que o resultado de NS permaneceu no intervalo entre 0,36 a 0,75, tanto para PSt1 como PSt2 (SANTOS *et al.*, 2014). Verifica-se também que os valores de R^2 permaneceram próximos a 0,5, o que indica uma boa adequação do ajuste do modelo. Sadeghi *et al.* (2010) demonstraram que coeficientes de determinação (R^2) próximos e acima de 50%, indicam que o modelo é capaz de estimar o transporte de sedimentos. Maiores valores da estatística de RMSE foram obtidos pelo ajuste da PSt2 (691,7 Mg), comparativamente com o calculado para PSt1 (209,9 Mg). Esse comportamento de maior RMSE para a PSt1, também foi verificado quando se calculou o RMSE para os PSt obtidos pelos coeficientes a e b de Avanzi *et al.* (2008).

Levando em consideração os bons resultados de NS, enquadrando o ajuste em aceitável (SANTOS *et al.*, 2014), o alto valor de RMSE pode estar associado a extensão dos dados observados de Q_{ss} que geraram as curvas-chave. Todavia, o modelo MUSLE apresenta vantagens de uso prático, permitindo ser atualizado constantemente à medida que mais dados de vazão e perdas de solo forem sendo obtidos, sendo incorporados ao modelo, aumentando sua confiabilidade.

Com esses resultados, pode-se afirmar, que as melhores estimativas da MUSLE para PSt foram obtidas quando o modelo ajustado para as características da BHAC, ou seja, a melhor eficiência da estimativa do modelo foi verificada quando realizada a calibração e validação dos coeficientes a e b para as informações da BHAC.

4. Conclusões

Os valores a e b da MUSLE existentes na literatura e testados nesta pesquisa, não foram adequados para estimar a produção de sedimentos na bacia hidrográfica de arroio Cadeia. O uso dos coeficientes originalmente recomendados por Williams (1975), para estimar a produção de sedimentos na BHAC, implicou em altos erros de estimativa, demonstrando superestimação dos resultados.

Quando os coeficientes obtidos por Avanzi *et al.* (2008) foram empregados para a MUSLE, a estimativa pareceu mais próxima aos valores observados, com erros menores do que quando aplicado os coeficientes originais, porém o R^2 demonstrou incapacidade da estimativa para essa metodologia. Contudo, apesar desse resultado, os coeficientes a e b de Avanzi *et al.* (2008) devem ser utilizados com cautela, uma vez que foram ajustados para uma bacia com predominância de cobertura bem específica (eucalipto e floresta nativa), em que a aplicação em bacias puramente rurais pode não fazer sentido hidrológico.

A MUSLE apresentou-se capaz de prever a produção de sedimentos, sendo representada adequadamente, quando os coeficientes a e b foram calibrados e validados para a BHAC, apresentando estimativas aceitáveis. Para estimativa pela MUSLE, aos coeficientes calibrados para a bacia, considerou-se adequado a estimativa de PS considerando a proposta 2 (PSt2) de aplicação da curva-chave, ou seja, utilizando o ajuste da curva-chave com os dados divididos em intervalos de excedência de frequência de vazão.

Considerações finais

Curvas-chave são utilizadas com frequência para converter hidrogramas em dados de descarga sólida, o que torna importante conhecer o comportamento do modelo para utilizá-lo de forma mais eficiente, obtendo dados observados em bacias hidrográficas desprovidas de monitoramento contínuo. A viabilidade na utilização de curvas-chave de sedimentos em suspensão na forma potencial foi avaliada utilizando dados disponibilizados para o Rio Grande do Sul.

Transformações nos dados de entrada e diferentes alternativas de subdivisões foram analisados com base em índices estatísticos, em que melhores resultados foram observados quando o modelo foi aplicado à Descarga de sedimentos em suspensão (Qss), bem como no ajuste realizado com os dados completos. Desta forma, o modelo da curva-chave mostrou-se uma ferramenta viável para várias das estações sedimentométricas analisadas.

Entretanto, limitações como quantidade e confiabilidade de dados e relação entre as variáveis, foram identificadas, indicando que a verificação da eficiência e manipulação dos dados, devem ser realizadas para cada estação de interesse separadamente. Esse conhecimento deve ser aplicado, uma vez que os valores estimados de curva-chave geralmente são considerados como valores observados e comparados com os obtidos por outros modelos de estimativa. Além disso, cabe salientar que nesta pesquisa foi avaliado apenas o modelo de curva-chave de forma de potência, sugerindo-se assim, a avaliação de outras formulações para a representação da produção de sedimentos, podendo ser um espaço interessante para futuras pesquisas.

Diferenciando-se de outros modelos, por considerar diretamente características do escoamento superficial, componente-chave na análise do transporte de sedimentos, e ainda compreender fatores de solo, topografia, cobertura e manejo e práticas conservacionistas, a capacidade preditiva da Modified Universal Soil Loss Equation (MUSLE) foi avaliada. Quando aplicada na sua forma original, ou seja, usando os coeficientes a e b propostos por Williams (1975), a capacidade preditiva da MUSLE foi afetada e erros maiores na estimativa foram verificados, demonstrando incapacidade da estimativa aplicada desta forma. Por outro lado, quando os coeficientes a e b foram calibrados e validados para a sub-bacia monitorada em

estudo, a MUSLE foi capaz de prever a produção de sedimentos, apresentando estimativas aceitáveis. Este resultado evidencia a sensibilidade do modelo aos coeficientes de ajuste, bem como a necessidade da calibração dos coeficientes para a bacia de interesse. Esse ajuste é importante para reduzir as incertezas e aumentar a confiabilidade na capacidade do modelo em realizar as estimativas de forma mais eficaz.

Nesta área de estudo, vale ressaltar que, apesar de que nesta pesquisa os valores de produção de sedimentos observados terem sido usados para avaliar a aplicabilidade de um modelo para uma bacia hidrográfica específica, essas informações, derivadas de hidrogramas combinados com curvas-chave de sedimentos, podem ser utilizadas para outros propósitos, que entre outras aplicações pode-se citar a extração de indicadores mensais, sazonais ou anuais pela avaliação do sedimentograma de longo termo, avaliação de aporte de sedimentos para reservatórios, bem como a construção de sedimentogramas para análise e aplicação de outros modelos preditivos de erosão de solo, no intuito de avaliar a sua capacidade preditiva para a modelagem dos processos hidrossedimentológicos.

Referências

- ADEGEDE, A. P.; MBAJIORGU, C. C. Event-based sediment yield modeling for small watersheds using MUSLE in north-central Nigeria. **Agricultural Engineering International: CIGR Journal**, v. 21, n.2, 2019.
- ANA, Agência Nacional de Águas. **Inventário das Estações Fluviométricas: Superintendência de Gestão da Rede Hidrometeorológica**. (2009). Ministério do Meio Ambiente. 2ª Edição. Brasília – DF. Disponível em: <http://arquivos.ana.gov.br/infohidrologicas/InventariodasEstacoesFluviometricas.pdf>.
- APHA American Public Health Association, **STANDARD METHODS**, 2540 C, STD - STANDARD METHODS. 21ª. Ed. 2005.
- ARRAES C. L.; ROCHA, A. M.; MORAES, R. A.; PISSARRA, T. C. T.; RODRIGUES, F. M.; ZANATA, M. Estimativa da taxa de desmatamento do município de bannach, Pará – Amazônia legal, utilizando imagens landsat5/tm. **Revista de Ciências Agrárias**, v.33 n.2, 2010.
- AREKHI, S. Evaluating long-term annual sediment yield estimating potential of GIS interfaced MUSLE model on two micro-watersheds. **Pakistan Journal of Biological Sciences**. v.11, p.270-274, 2008.
- ARNOLD, J. G.; SRINIVASAN, R.; MUTTIAH, R. S.; WILLIAMS, J. R. Large area hydrologic modeling and assessment. Part I: model development. **Journal of American Water Resources Association**, v.34, n.1, p. 73-89, 1998.
- ARRAES, C. L.; BUENO, C. R. P.; PISSARRA, T. C. T.; Estimativa da erodibilidade do solo para fins conservacionistas na microbacia córrego do Tijuco, SP. **Bioscience Journal, Uberlandia**, v. 26, n. 6, p. 849-857, 2010.
- ASSELMAN, N. E. M. Fitting and interpretation of sediment rating curves. **Journal of Hydrology**, v.234, n.3, p.228-248, 2000.
- AVANZI, J. C. **Modelagem do escoamento superficial e erosão hídrica em uma microbacia hidrográfica na região dos Tabuleiros Costeiros**. 2005. 68p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG. 2005.
- AVANZI, J.C.; SILVA, M.L.N.; CURI, N.; MELLO, C.R.; FONSECA, S. Calibração e aplicação do modelo MUSLE em uma microbacia hidrográfica nos tabuleiros costeiros brasileiros. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.12, p.563-569, 2008.
- BAGARELLO, V.; DI STEFANO, C.; FERRO, V.; PAMPALONE, V. Predicting maximum annual values of event soil loss by USLE-type models. **Catena**, v.155, p.10-19, 2017.

BAGARELLO, V.; FERRO, V.; PAMPALONE, V.; PORTO, P.; TODISCO, F.; VERGNI, L. Predicting soil loss in central and south Italy with a single USLE-MM model. **Journal of Soils and Sediments**. v.18, p.3365-3377, 2018.

BERTOL, I.; SCHICK, J.; BATISTELA, O. Razão de perdas de solo e fator C para as culturas de soja e trigo em três sistemas de preparo em um cambissolo húmico alumínico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 25, p. 451-461, 2001.

BERTOL, I.; SCHICK, J.; BATISTELA, O. Razão de perdas de solo e fator C para milho e aveia em rotação com outras culturas em três tipos de preparo de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 26, p. 545-552, 2002.

BLAIN, G. C.; CAMARGO, M. B. P. Probabilistic structure of an annual extreme rainfall series of a coastal area of the State of São Paulo, Brazil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola**, v.32, p.552-559, 2012.

BLAIN, G. C.; MESCHIATTI, M. C. Using multi-parameters distributions to assess the probability of occurrence of extreme rainfall data. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.18, p.307- 313, 2014.

BRANCO, N. **Avaliação da produção de sedimentos de eventos chuvosos em uma pequena bacia hidrográfica rural de encosta**. Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Santa Maria (RS), 1998.

CAMPOS, S.; SILVA, M.; PIROLI, E. L.; CARDOSO, L. G.; BARROS, Z. X. Evolução do uso da terra entre 1996 e 1999 no município de Botucatu-SP. **Engenharia Agrícola**, v.24, n.1, 2004.

CARVALHO, N. O. **Hidrossedimentologia Prática**. 2ª. Ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2008. 600p.

CASSALHO, F.; BESKOW, S.; MELLO, C. R.; MOURA, M. M.; KERSTNER, L.; ÁVILA, L. F. At-Site Flood Frequency Analysis Coupled with Multiparameter Probability Distributions. **Water Resources Management**, v.32, p.285-300, 2017.

CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. **Applied Hydrology**. McGraw-Hill Book Company, 1988. 571 p.

COHN, T. A.; CAULDER, D. L.; GILROY, E. J.; ZYNJUK, L. D.; SUMMERS, R. M. The validity of a simple statistical model for estimating fluvial constituent loads: na empirical study involving nutrient loads entering Chesapeake Bay. **Water Resources Research**, v.28, p.2353–2363, 1992.

COMINO, J. R.; SINOGA, J. R.; GONZÁLEZ, J. S.; GUERRA-MERCHÁN, A.; SEEGER, M.; RIES, J. B. High variability of soil erosion and hydrological processes in Mediterranean hillslope vineyards (Montes de Málaga, Spain). **Catena**, v.145, p.274-284, 2016.

CUNHA, N. G.; SILVEIRA, R. J. C. **Estudo dos solos do município de Pelotas**. EMBRAPA-CPACT (Documentos, 11/96). Pelotas, Ed. UFPel, 1996. 54p.

CUNHA, N. G.; SILVEIRA, R. J. C.; SEVERO C. S. R.; NUNES, M. L.; SOARES, M. J.; COSTA, C. N. **Estudo dos solos do município de Canguçu**. EMBRAPA-CPACT (Documentos, 31/97). Pelotas, Ed. UFPel, 1997. 90p.

CUNHA, N. G.; SILVEIRA, R. J. C.; SEVERO, C. R. S. **Estudo dos solos do município de Morro Redondo**. EMBRAPA-CPACT (Documentos, 23/96). Pelotas, Ed. UFPel, 1996. 28p.

CUNHA, N. G.; SILVEIRA, R. J. C.; SEVERO, C. R. S. **Solos e Terras do Planalto Sul-Rio-Grandense e Planícies Costeiras**. EMPRAPA-CPACT (Documento, 55/06). Pelotas, Ed. UFPel, 2006. 43p.

DE MARIA, I. C.; LOMBARDI NETO, F. Razão de perdas de solo e fator C para sistemas de manejo da cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.21, p.263-270, 1997.

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

DE VENDE, J.; POESEN, J.; VERSTRAETEN, G.; GOVERS, G.; VANMAERCKE, M.; VAN ROMPAEY, A.; ARABKHEDRI, M.; BOIX-FAYOS, C. Predicting soil erosion and sediment yield at regional scales: where do we stand? **Earth-Science Reviews**. v.127, p.16–29, 2013.

DENARDIN, J. E. **Erodibilidade do solo estimada por meio de parâmetros físicos e químicos**. Tese (Doutorado em Agronomia/Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 81f, 1990.

DIDONÉ, E. J. **Erosão bruta e produção de sedimentos em bacia hidrográfica sob plantio direto no planalto do Rio Grande do Sul**. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM/RS), Santa Maria, 228f, 2013.

DORNELES, V.R.; DAMÉ, R. C. F.; TEIXEIRA-GANDRA, C. F. A.; VEBER, M. V.; KLUMB, G. B.; RAMIREZ, M. A. A. Modeling of probability in obtaining intensity-duration-frequency relationships of rainfall occurrence for Pelotas, RS, Brazil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, v.23, n.7, p.499-505, 2019.

DOS SANTOS, J. C. N.; ANDRADE, E. M.; MEDEIROS, P.H. A.; ARAÚJO NETO, J. R.; PALÁCIO, H. A. Q.; RODRIGUES, R. N. Determinação do fator de cobertura e dos coeficientes da MUSLE em microbacias no semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.18, n.11, p.1157-1164, 2014.

DUAN, Q.; SOROOSHIAN, S.; GUPTA, V. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. **Water Resources Research**. v. 28, n. 4, p.1015-1031, 1992.

Djoukbala, O. HASBAIA, M. BENSELAMA, O. MAZOUR, M. Comparison of the erosion prediction models from USLE, MUSLE and RUSLE in a Mediterranean watershed, case of Wadi Gazouana (N-W of Algeria). **Modeling Earth Systems and Environment**. v.5, p.725-743, 2019.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro: SNCS, 1979. 271p.

ESRI, ArcGIS DESKTOP 10.5. Redlands, CA: **Environmental Systems Research Institute**, Inc. (ESRI), 2014. CD-ROM.

FAN, X.; SHI, C.; ZHOU, Y.; SHAO, W. Sediment rating curves in the Ningxia-Inner Mongolia reaches of the upper Yellow River and their implications. **Quaternary International**, v.282, p.152-162, 2012.

FARR, T. G.; ROSEN, P. A.; CARO, E.; CRIPPEN, R.; DUREN, R.; HENSLEY, S.; KOBRICK, M.; PALLER, M.; RODRIGUEZ, E.; ROTH, L.; SEAL, D.; SHAFFER, S.; SHIMADA, J.; UMLAND, J.; WERNER, M.; OSKIN, M.; BURBANK, D.; ALSDORF, D. The Shuttle Radar Topography Mission. **Reviews of Geophysics**, v. 45, n. 2, 2007.

FEIX, R. D.; LEUSIN JÚNIOR, S. **Painel do agronegócio no Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: SEPLAG, Departamento de Economia e Estatística, 2019.

FOSTER, G.R.; MCCOOL, D. K.; RENARD, K. G. MOLDENHAUER, W. C. Conversion of the Universal Soil Loss Equation to SI metric units. **Journal of Soil and Water Conservation**, v.36, n.6, p. 355-359, 1981.

GALDINO, S. **Estimativa da perda de terra sob pastagens cultivadas em solos arenosos da bacia hidrográfica do Alto Taquari – MS/MT**. 2012. 115f. Tese (Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Campinas, Campinas.

GAO, G.; FUA, B.; ZHANGA, J.; MAC, Y.; SIVAPALAND, M. Multiscale temporal variability of flow-sediment relationships during the 1950s–2014 in the Loess Plateau, China. **Journal of Hydrology**, n.563, p.609-619, 2018.

GAO, P.; DENG, J.; CHAI, X.; MU, X.; ZHAO, G.; SHAO, H.; SUN, W. Dynamic sediment discharge in the Hekou–Longmen region of Yellow River and soil and water conservation implications. **Science Total Environmental**, v.578, p.56-66, 2017.

GARRIDO, J. W. A.; DE SOUSA, T. M. I.; ISMAEL, L. L.; CRISPIM, D. L.; FERREIRA, P. M. R.; QUEIROZ, M. M. F. Determinação das curvas-chave de descargas de sedimentos em suspensão na bacia hidrográfica do Rio Piancó-

Piranhas-Açu. **Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.23 n.1, p.69-75, 2018.

GHAFAARI, H.; GORJI, M.; ARABKHEDRI, M.; ROSHANI, G. A.; HEIDARI, A.; AKHAVAN, S. Identification and prioritization of critical erosion areas based on onsite and offsite effects. **Catena**, v.156, p.1-9, 2017.

GIROLAMO, A. M.; DI PILLO, R.; LO PORTO, A.; TODISCO, M. T.; BARCA, E. Identifying a reliable method for estimating suspended sediment load in a temporary river system. **Catena**, v.165, p.442-453, 2018.

GIROLAMO, A. M.; PAPPAGALLO, A. LO PORTO Temporal variability of suspended sediment transport and rating curves in a Mediterranean river basin: The Celone (SE Italy). **Catena**, v. 128, p. 135-143, 2015.

HAPSARI, D.; ONISHI, T.; IMAIZUMI, F.; NODA, J. SENGE, M. The Use of Sediment Rating Curve under its Limitations to Estimate the Suspended Load. **Reviews in Agricultural Science**, n.7, p.88-101, 2019.

HASSAN, S. K. A. A. Suspended Sediment Rating Curve for Tigris River Upstream Al-Amarah Barrage. *International Journal of Advanced Research*, v.2, n.5, p.624-629, 2014.

HASSANZADEH, H.; BAJESTAN, M. S.; PAYDAR, G. R. Performance evaluation of correction coefficients to optimize sediment rating curves on the basis of the Karkheh dam reservoir hydrography, west Iran. **Arabian Journal of Geosciences**. v.11, p.595, 2018.

HENG, S.; SUETSUGI, T. Comparison of regionalization approaches in parameterizing sediment rating curve in ungauged catchments for subsequent instantaneous sediment yield prediction. **Journal of Hydrology**. v.512, p.240-253, 2014.

HOROWITZ, A. J. A quarter century of declining suspended sediment fluxes in the Mississippi River and the effect of the 1993 flood. **Hydrological Processes**, v.24, n.1, p.13-34, 2010.

HOROWITZ, A. J. An evaluation of sediment rating curves for estimating suspended sediment concentrations for subsequent flux calculations. **Hydrological Processes**. v.17, p.3387-3409, 2003.

HOROWITZ, A. J. Determining Annual Suspended Sediment and Sediment-Associated Trace Element and Nutrient Fluxes. **Science of the Total Environment**, v.400, p.315-345, 2008.

HU, B.; WANG, H.; YANG, Z.; SUN, W. Temporal and spatial variations of sediment rating curves in the Changjiang (Yangtze River) basin and their implications. **Quaternary International**, v.230, p.34-43, 2011.

IADANZA, C.; NAPOLITANO, F. Sediment transport time series in the Tiber River physics and chemistry of the earth. **Parts A/B/C**, v.31, p.212–1227, 2006.

IBGE, 2016. Manuais técnicos em Geociências. **Manual Técnico de Uso da Terra**. 3º edição, n.7, Rio de Janeiro: IBGE, 2016.

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Catálogo de imagens 2020**. Acessado em 07 fev. 2020. Disponível em: <http://www.dgi.inpe.br/CDSR>

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

KENDALL, M. G. **Rank correlation methods**. London: Charles Griffin & Company Limited, 1975.

KINNELL, P. I. A. Event soil loss, runoff and the Universal Soil Loss Equation family of models: A review. **Journal of Hydrology**. v.385, n.1, p.384-397, 2010.

KINNELL, P. I. A. Why the universal soil loss equation and the revised version of it do not predict event erosion well. **Hydrological Processes**. v.19, n.3, p.851–854, 2005.

KINNELL, P.I.A. Comparison between the USLE, the USLE-M and replicate plots to model rainfall erosion on bare fallow areas. **Catena**, v.145, p.39-46, 2016.

LAFLEN, J. M.; LANE, L. J.; FOSTER, G. R. WEPP: A new generation of erosion prediction technology. **Journal of Soil and Water Conservation**, v.46, p.34-38, 1991.

LEE, S. Soil erosion assessment and its verification using the Universal Soil Loss Equation and Geographic Information System: a case study at Boun, Korea. **Environmental Geology**, v.45, p.457-465, 2004.

LEE, T. **Mann-Kendall with Missing Values and Same Values**. MATLAB Central File Exchange. 2020. Disponível em: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/70408-mann-kendall-with-missing-values-and-same-values>.

LEVINE, D.M.; BERENSON, M. L.; STEPHAN, D. **Estatística; Teoria e aplicações**. Rio de Janeiro, LTC, 2000.

LI, Z.; XU, X.; XU, C.; LIU, M.; WANG, K.; YI, R. Monthly sediment discharge changes and estimates in a typical karst catchment of southwest China. **Journal of Hydrology**, v.555, p.95-107, 2017.

LIMA, J. E. F. W.; SILVA, E. M. Seleção de modelos para o traçado de curvas granulométricas de sedimentos em suspensão em rios. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.11, n.1, p.101–107, 2007.

MANN, H. B. Non-parametric tests against trend. **Econometrica**, v.13, p.245-259, 1945.

MATLAB. (2013). **Math Works - Matlab Manual**. Disponível em: <http://www.mathworks.com/products/matlab/>

MEDEIROS, G. D. O. R.; GIAROLLA, A., SAMPAIO, G.; MARINHO, M. D. A. Estimates of annual soil loss rates in the state of São Paulo, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.40, 2016.

MEDEIROS, P. A.; CORDERO, A. **Transporte de Sedimentos em Suspensão em 3 Postos Sedimentométricos da Bacia do Rio Itajaí-Açú**. VIII Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos, 2008.

MELLO, C. R. D.; SILVA, A. M. D. **Hidrologia: princípios e aplicações em sistemas agrícolas**. 1ª. ed. Lavras: UFLA, 2013.

MINELLA, J.P.; MERTEN, G.H.; MAGNAGO, P.F. Análise qualitativa e quantitativa da histerese entre vazão e concentração de sedimentos durante eventos hidrológicos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, n.12, p.1306-1313, 2011.

MINELLA, J.P.; MERTEN, G.H.; REICHERT, J.M.; CLARKE, R.T. Estimating suspended sediment concentrations from turbidity measurements and the calibration problem. **Hydrological Processes**, v.22, p.1819-1830, 2008.

MIRAKHORLO, M. S.; RAHIMZADEGAN, M. Evaluating estimated sediment delivery by Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) and Sediment Delivery Distributed (SEDD) in the Talar Watershed, Iran. **Frontiers in Earth Science**. 2020.

MOLINAS, A.; WU, B. Transport of Sediment in Large Sand-Bed Rivers. **Journal of Hydraulic Research**, v.39, n. 2, p.135-146, 2001.

MORGAN, R.P.C. **Soil erosion and conservation**, 2.ed. Longman, London, 1995.

MUSGRAVE, G. W. The quantitative evaluation of factors in water erosion a first approximation. **Journal Soil and Water Conservation**. v.2, n.3, p. 133-138, 1947.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models. Part I. A discussion of principles. **Journal of Hydrology**, v.10, n.3, p.282–290, 1970.

NEARING, M. A. **A process based soil erosion model for USDA** – Water Erosion Prediction Project technology. Trans. ASABE, v.32, p.1587-1593, 1989.

NETELER, M.; MITASONA, H. Open Source GIS: **A GRASS GIS Approach**. Springer Science Business Media. New York. 2002.

NOOR, H.; FAZLI, S.; ALIBAKHSHI, S. M.; Prediction of storm-related sediment-associated contaminant loads in a watershed scale. **Ecohydrology & Hydrobiology**, v.12. n.3, p.183-189, 2012.

ODONGO, V. O.; ONYANDO, J. O.; MUTUA, B. M.; VAN OEL, P. R.; BECHT, R. Sensitivity analysis and calibration of the Modified Universal Soil Loss Equation (MUSLE) for the upper Malewa Catchment, Kenya. **International Journal of Sediment Research**. v. 28, p. 368-383, 2013.

OLSON, T. C. E.; WISCHMEIER, W. H. Erodibility evaluations for soils on the runoff and erosion stations. **Soil Science Society of America Journal**, v. 27, n. 5, p. 590-592, 1963.

PAIVA, E. M. C. D. Métodos de estimativa da produção de sedimentos em pequenas bacias hidrográficas. In: PAIVA, J. B. D.; PAIVA, E. M. C. D. Hidrologia Aplicada a gestão de pequenas bacias hidrográficas. Porto Alegre: ABRH, p. 365-394, 2001.

PAIVA, M. H. R.; DO CARMO, D. F.; PRADO, R. B. Avaliação do impacto de iniciativas conservacionistas no serviço ecossistêmico de controle à erosão hídrica. **Brazilian Journal of Production Engineering**, v.5, n.2. p.44-55, 2019.

PANDEY, A., HIMANSHU, S. K., MISHRA, S. K.; SINGH, V. P. Physically based soil erosion and sediment yield models revisited. **Catena**, v.147, p.595-620, 2016.

PARANHOS R. M.; PAIVA J. B. D. Avaliação de metodologia de estimativa de produção de sedimentos em uma pequena bacia rural de encosta. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.13, p.7-18, 2008.

PIMENTEL, D.; BURGESS, M. Soil erosion threatens food production. **Agriculture**, v.3 n.3, p.443-463, 2013.

POLETO, C. **Sedimentologia Fluvial: Estudos e Técnicas**. Volume 1. Associação Brasileira de Recursos Hídricos. ABRH. 2014.

PONAGOS, P.; BORRELLI, P.; MEUSBURGER, K.; ALEWELL, C.; LUGATO, E.; MONTANARELLA, L. Estimating the soil erosion cover-management factor at the European scale. *Land Use Policy*, v.48, p. 38-50, 2015.

RAGHUNATH, H. M. **Hydrology: Principles, Analyses and Design**. New Delhi: New Age International, 2006. 476 p.

R Development Core Team, 2011. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.

R Development Core Team, 2012. An Introduction to R. Vienna, Austria.

SADEGHI S. H. R; FAZLI, S.; KHALEDI DARVISHAN, A. Evaluation of efficiency sediment rating curve in Khamesan typically watershed. In: 4rd **National Seminar on Erosion and Sediment**, p. 6 -11, 2010.

SADEGHI, S. H. R.; MIZUYAMA, T.; MIYATA, S.; GOMI, T.; KOSUGI, K.; FUKUSHIMA, T.; ONDA, Y. Development, evaluation and interpretation of sediment rating curves for a Japanese small mountainous reforested watershed. **Geoderma**, v.144, n.1, p. 198-211, 2008.

SADEGHI, S. H. R.; MIZUYAMA, T.; MIYATA, S.; GOMI, T.; KOSUGI, K.; MIZUGAKI, S.; ONDA, Y. Is MUSLE apt to small steeply reforested watershed? **Journal of Forest Research**, v.12, n.4, p.270-277, 2007.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAÚJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**, SiBCS, 5. ed., Brasília, DF: Embrapa, 2018.

SANTOS, I.; FILL, H. D.; SUGAI, M. R. B.; BUDA, H.; KISHI, R.; MARONE, E.; LAUTERT, F. L. **Hidrometria aplicada**. Curitiba: LACTEC (Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento Centro Politécnico). 2001. 372p.

SANTOS, J. C. N.; ANDRADE, E. M.; MADEIROS, P. H. A.; ARAÚJO NETO, J. R.; PALÁCIO, H. A. Q.; RODRIGUES, R. N. Determinação do fator de cobertura e dos coeficientes da MUSLE em microbacias no semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.18, n.11, p. 1157-1164, 2014.

SCHMIDT, K.H.; MORCHE, D. Sediment output and effective discharge in two small high mountain catchments in the Bavarian Alps Germany. **Geomorphology**, v.80, n.1-2, p.131-145, 2006.

SHEN, Z.Y.; GONG, Y.W.; LI, Y.H.; HONG, Q.; XU, L.; LIU, R.M. A comparison of WEPP and SWAT form modeling soil erosion of the Zhangjiachong watershed in the Three Gorges reservoir area. **Agriculture Water Management**. v.96, p.1435-1442, 2009.

SILVA, A.M.; SCHULZ, H.E.; CAMARGO, P.B. Erosão e hidrossedimentologia em bacias hidrográficas. São Carlos: Rima. 140 p. 2013.

SILVA, B. P. C.; SILVA, M. L. N.; BATISTA, P. V. G.; PONTES, L. M.; ARAÚJO, E. F.; CURI, N. Soil and water losses in eucalyptus plantation and natural forest and determination of the USLE factors at a pilot sub-basin in Rio Grande do Sul, Brazil. **Ciência e Agrotecnologia**, v.40, n.4, p.432-442, 2016a.

SILVA, C. R.; CHAVES, H. M. L.; CAMELO, A. P. Calibração e validação da equação universal de perda de solos modificada (MUSLE) utilizando dados hidrossedimentológicos locais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, p.1431-1439, 2011.

SILVA, F. G. B.; MINOTTI, R. T.; LOMBARDI NETO, F.; PRIMAVESI, O.; CRETANA, S. Previsão da perda de solo na Fazenda Canchim – SP (EMBRAPA) utilizando

geoprocessamento e o USLE 2D. **Revista Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental**. v. 15, n. 2, p. 141-148, 2010.

SILVA, L. F. S.; MARINHO, M. A.; ROCCO, E. O.; WALTER, K. C.; BOSCHI, R. S. Métodos indiretos de estimativa da erodibilidade de um latossolo vermelho da região de Campinas, SP. **Revista Ciência, Tecnologia e Ambiente**. v.3, n.1, p.51-58, 2016b.

SILVA, V.C. Estimativa da erosão atual da bacia do Rio Paracatu (MG/GO/DF). **Revista Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.3, p.147-159, 2004.

SIQUEIRA, E. C.; VANZELA, L. S. Simulação temporal e espacial do aporte de sedimentos em bacia agrícola no município de Fernandópolis (SP). **Revista Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.23 n.1, p.15-25, 2018.

SMITH, D. D. E.; WISCHMEIER, W. H. Factor's affecting sheet and rill erosion. **Eos, Transactions American Geophysical Union**. v.38, n.6, p.889-896, 1957.

SPAROVEK, G.; LIER, Q.D.J.V.; DOURADO NETO, D. Computer assisted Koeppen climate classification: a case study for Brazil. **International Journal of Climatology**. v.27, p.257-266, 2007.

STRECK, E.V.; KAMPF, N.; DALMOLIN, R.S.D.; KLAMT, E.; NASCIMENTO, P.C.; SCHNEIDER, P.; GIASSON, E.; PINTO, L.F.S. **Solos do Rio Grande do Sul**. 2 edição. Porto Alegre: EMATER/RS, 2008. 222p.

TABATABAEI, M.; JAM, A. S.; HOSSEINI, S. A. Suspended sediment load prediction using non-dominated sorting genetic algorithm II. **International Soil and Water Conservation Research**. v.7, n.2, p.119-129, 2019.

THIESSEN, A.; ALTER, J. C. Precipitation averages for large areas. Climatological Data for July, 1911. **Monthly Weather Review**, v. 39, n. 10, p. 1082-1084, 1911.

USDA, **Water Erosion Prediction Project (WEPP)**, Hill Slope Profile and Watershed Model Documentation, In: "NSERL Report 10". Flanagan, D.C., Nearing, M.A. (Ed.) USDA ARS. 1995.

VAN PELT, R. S.; HUSHMURODOV, S. X.; BAUMHARDT, R. L.; CHAPPELL, A.; NEARING, M. A.; POLYAKOV, V. O.; STRACK, J. E. The reduction of partitioned wind and water erosion by conservation agriculture. **Catena**, v.148, p.160-167, 2017.

VARGAS, M. M.; BESKOW, S.; CALDEIRA, T. L.; CORRÊA, L. L.; CUNHA, Z. A. SYHDA - System of Hydrological Data Acquisition and Analysis. **Revista Brasileira De Recursos Hídricos**, v. 24, p. 1, 2019.

VERSTRAETEN, G.; POESEN, J. The nature of small-scale flooding, muddy floods and retention pond sedimentation in central Belgium. **Geomorphology**, v.29, n.3, p.275-292, 1999.

VIGIAK, O. A.; MALAGÓ, A. A.; BOURAOUI, F. A.; VANMAERCKE, M. B. C.; POESEN, J. Adapting SWAT hillslope erosion model to predict sediment concentrations and yields in large Basins. **Science of the Total Environment**, v.538, p.855–875, 2015.

WICKAMA, J.; MASSELINK, R.; STERK, G. The effectiveness of soil conservation measures at a landscape scale in the West Usambara highlands, Tanzania. **Geoderma**, v.241, p.168-179, 2015.

WILLIAMS, J. R. (1975). **Sediment-yield prediction with universal equation using runoff energy factor**. USDA, Agricultural Research Service, ARS- 5 - 40, p.244-252.

WILLIAMS, J. R.; BERNDT, H. D. **Determining the universal soil loss equation's length-slope factor for watershed**. In: Soil erosion: prediction and control. Ankeny: Soil Conservation Society of America, p. 217-225, 1977.

WILLIAMS, J. R.; BERNDT, H. D. Sediment yield prediction based on watershed hydrology. **Transactions of the ASAE**, v.20, n.6, p.1100–1104, 1977.

WISCHMEIER, W. H. A rainfall erosion index for a Universal Soil Loss Equation. **Soil Science Society of America Journal**. v.23, n.3, p.247-249, 1959.

WISCHMEIER, W. H. Cropping management factor evaluations for a universal soil loss equation. **Soil Science Society of America Journal**, v.24, n.4, p.322-326, 1960.

WISCHMEIER, W. H. E.; SMITH, D. D. Rainfall energy and its relationship to soil loss. **Eos, Transactions American Geophysical Union**. v.39, n.2, p. 285-291, 1958.

WISCHMEIER, W. H.; JOHNSON, C.B.; CROSS, B.V. A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. **Journal of Soil and Water Conservation**, v.26, p.189-193, 1971.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. **A universal equation for predicting rainfall-erosion losses - An aid to conservation farming in humid regions**. ARS Special Report 22-66. Agricultural Research Service, US Department of Agriculture, Washington, DC. 1961.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. **Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains: Guide for selection of practices for soil and water conservation**. Agriculture Handbook n.282. Agricultural Research Service, U. S. Department of Agriculture: Washington DC. 47pp, 1965.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. **Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning**. Agriculture Handbook, n.537 U.S. Department of Agriculture: Washington DC. 58 p, 1978.

WMO - WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **Methods of observation. In: Guide to Hydrological Practices: hydrology from measurement to hydrological information.** 6. ed. Geneva, Switzerland, 2008. v. 1, cap. 2, p. 24-27. (WMO - n. 168).

YADOLAH, D. The Concise Encyclopedia of Statistics. **Springer.** p. 88-91, 2008.

YAEKOB, T.; TAMENE, L. GEBREHIWOT, S. G.; DEMISSIE, S. S.; ADIMASSU, Z.; WOLDEAREGAY, K.; MEKONNEN, K.; AMEDE, T.; ABERA, W.; RECHA, J. W.; SOLOMON, D.; THORNE, P. Assessing the impacts of different land uses and soil and water conservation interventions on runoff and sediment yield at different scales in the central highlands of Ethiopia. **Renewable Agriculture and Food Systems,** v.1-15, 2020.

YANG, C.; LEE, K. T. Analysis of flow-sediment rating curve hysteresis based on flow and sediment travel time estimations. **International Journal of Sediment Research,** v.33, n.2, p.171-182, 2018.

ZEBKER, H. A.; GOLDSTEIN, R. M. Topographic mapping from interferometric synthetic aperture radar observations. **Journal of Geophysical Research,** v. 91, n. B5, p. 4993–4999, 1986.

ZENG, C.; ZHANG, F.; LU, X.; WANG, G.; GONG, T. Improving sediment load estimations: The case of the Yarlung Zangbo River (the upper Brahmaputra, Tibet Plateau). **Catena,** v.160, p.201-211, 2018.

ZHANG, W.; WEI, X.; JINHAI, Z.; YULIANG, Z.; ZHANG, Y. Estimating suspended sediment loads in the Pearl River Delta region using sediment rating curves. **Continental Shelf Research,** v.38, p.35-46, 2012.

ZHENG, M. A spatially invariant sediment rating curve and its temporal change following watershed management in the Chinese Loess Plateau. **Science of the Total Environment,** n.630, p.1453-1463, 2018.

ZHENG, M. A.; YANG, J. B.; QI, D. A.; SUN, L. A.; CAI, Q. A. Flow–sediment relationship as functions of spatial and temporal scales in hilly areas of the Chinese Loess Plateau. **Catena,** v.98, p.29-40, 2012.

Apêndices

Apêndices A – Informações das estações sedimentométricas analisadas para o estado do Rio Grande do Sul

Nº	Código	Nome da Estação	Tipo	Curso d'água	Entidade	LAT	LONG	Área (km ²)	Período	N	Média Css	Máx Css	Mín Css
1	70200000	Invernada Velha	FFRDSdQa	Rio Pelotas	ANA	-28 26 58	-50 17 47	2.841	1979-2017	79	8,40	105,68	0,23
2	70700000	Passo Socorro	FDSdQa	Rio Pelotas	ANA	-28 12 39	-50 45 31	8.400	1978-2004	75	17,90	210,06	0,35
3	72300000	Passo do Virgílio	FDSdQa	Rio Pelotas	ANA	-27 30 04	-51 42 49	29.114	1978-2000	38	16,20	77,98	0,98
4	72430000	Passo do Granzotto	FDSdQa	Rio Forquilha ou Inhanduva	ANA	-27 52 45	-51 45 17	1.604	1998-2017	57	25,10	194,80	2,64
5	72630000	Passo Santa Tereza	FDSdQa	Rio Apue ou Ligeiro	ANA	-27 42 21	-51 53 06	2.775	1978-2017	77	30,40	222,50	0,36
6	73010000	Marcelino Ramos	FFRDSdQa	Rio Uruguai	ANA	-27 27 40	-51 54 16	41.267	1979-1999	30	13,50	58,74	0,71
7	73480000	Ponte do Rio Passo Fundo	FDSdQa	Rio Passo Fundo	ANA	-27 23 12	-52 43 13	3.709	1998-2006	23	11,30	59,25	2,31
8	74100000	Iraí	FFRDSdQa T	Rio Uruguai	ANA	-27 11 25	-53 15 55	62.199	1978-2017	68	20,80	138,30	0,70
9	74270000	Passo Rio da Várzea	FDSdQa	Rio da Várzea	ANA	-27 16 49	-53 19 07	5.356	1978-2017	79	60,80	697,75	1,70
10	74370000	Palmitinho	FDSdQa	Rio Guarita	ANA	-27 19 58	-53 38 22	2.057	1978-2017	81	37,80	1275,00	0,65
11	74470000	Três Passos	FDSdQa	Rio Turvo	ANA	-27 23 34	-53 52 52	1.538	1977-2017	82	47,20	1015,00	0,11
12	74600000	Cascata Burica	FDSdQa	Rio Burica	ANA	-27 31 19	-54 13 56	2.265	1978-2000	36	33,90	182,16	0,88
13	74610000	Cascata Burica - Nova	FDSdQa	Rio Burica	ANA	-27 31 19	-54 13 56	-	2000-2017	32	26,60	151,42	3,20
14	74700000	Tucunduva	FDSdQa	Rio Santa Rosa	ANA	-27 40 21	-54 27 39	1.139	1978-2017	78	27,50	321,71	2,98
15	74750000	Linha Cascata	FDSdQa	Rio Santo Cristo	ANA	-27 50 43	-54 33 17	337	1979-2017	81	31,20	348,38	3,24
16	74800000	Porto Lucena	FDSdQaT	Rio Uruguai	ANA	-27 51 16	-55 01 21	85.809	2012-2017	12	20,30	84,00	5,70
17	74900000	Linha União	FDSdQa	Rio Comandai	ANA	-27 55 54	-54 56 17	1.248	1978-2017	84	39,30	347,70	1,76
18	75155000	Passo Faxinal	FDSdQa	Rio Ijuí	ANA	-28 17 21	-53 46 48	2.003	1979-2017	81	52,80	1125,50	5,10
19	75185000	Ponte Nova do Potiribu	FDSdQa	Rio Potiribu	ANA	-28 22 38	-53 52 32	629	1979-2001	34	72,50	812,00	5,54

Nº	Código	Nome da Estação	Tipo	Curso d'água	Entidade	LAT	LON	Área (km²)	Período	N	Média Css	Máx Css	Mín Css
20	75186000	Ponte Nova do Potiribu – Jusante	FDSdQa	Rio Potiribu	ANA	-28 22 38	-53 52 32	629	2002-2017	40	46,10	934,00	5,20
21	75205000	Ponte Nova do Conceição	FDSdQa	Rio Conceição	ANA	-28 23 01	-54 01 54	966	1979-2017	79	34,60	335,30	2,09
22	75295000	Colônia Mousquer	FDSdQa	Rio Ijuizinho	ANA	-28 23 21	-54 19 55	2.131	1979-2017	84	24,80	155,39	0,40
23	75320000	Ponte Mística	FDSdQaT	Rio Ijuí	ANA	-28 10 53	-54 44 18	9.426	1977-2008	57	42,90	332,31	2,58
24	75450000	Passo Santa Maria	FDSdQaT	Rio Piratinim	ANA	-29 34 40	-54 54 53	3.277	1978-2017	82	27,40	146,60	1,08
25	75500000	Passo do Sarmento	FDSdQa	Rio Piratinim	ANA	-28 12 43	-55 19 11	5.281	1977-1998	27	27,30	104,19	0,77
26	75700000	Passo do Novo	FDSdQa	Rio Icamagua	ANA	-28 40 43	-55 34 53	3.700	1978-2017	76	20,80	199,65	1,57
27	76100000	Vila Clara	FDSdQa	Rio Toropi	ANA	-29 33 22	-54 20 31	2.783	1998-2017	54	27,92	215,38	0,00
28	76120000	Ponte Toropi	FDSdQa	Rio Toropi	ANA	-29 39 13	-54 25 48	3.310	1977-1981	12	53,10	96,42	18,16
29	76310000	Rosário do Sul	FDSdQaT	Rio Santa Maria	ANA	-30 14 34	-54 54 58	12.077	1977-2017	92	51,10	447,77	0,88
30	76380000	Cacequi	FDSdQa	Rio Cacequi	ANA	-29 54 00	-54 50 00	1.826	1977-1979	07	85,00	174,21	35,33
31	76440000	Jaguari	FDSdQa	Rio Jaguarí	ANA	-29 29 56	-54 41 18	2.296	1977-2017	89	42,20	1965,50	0,29
32	76560000	Manoel Viana	FDSdQaT	Rio Ibicuí	ANA	-29 35 44	-55 28 51	29.321	1978-2017	82	35,90	138,57	3,49
33	76750000	Alegrete	FDSdQaT	Rio Ibirapuita	ANA	-29 46 06	-55 47 15	5.942	1978-2017	87	30,20	207,00	1,02
34	76800000	Passo Mariano Pinto	FDSdQaT	Rio Ibicui	ANA	-29 18 30	-56 03 17	42.498	1978-2017	67	30,40	127,20	1,64
35	77150000	Uruguaiana	FFRDSdQa T	Rio Uruguai	ANA	-29 44 53	-57 05 22	163.547	1998-2017	51	44,00	338,66	5,15
36	77500000	Quaraí	FDSdQaT	Rio Quaraí	ANA	-30 23 11	-56 27 35	2.878	1993-2017	63	21,40	200,07	1,44
37	79400000	Estância do Espantoso	FDSdQa	Rio Negro	ANA	-31 32 02	-54 17 40	1.172	1998-2017	48	63,40	1311,10	3,48
38	85400000	Dona Francisca	FDSdQaT	Rio Jacuí	-	-29 37 39	-53 21 12	14.014	1978-2017	78	18,00	177,98	0,93
39	85580000	Passo do Verde	FDSdQa	Rio Vacacaí	ANA	-29 56 00	-53 43 00	5.343	1978-1981	09	100,40	227,96	19,48

Nº	Código	Nome da Estação	Tipo	Curso d'água	Entidade	LAT	LON	Área (km²)	Período	N	Média Css	Máx Css	Mín Css
40	85600000	Passo das Tunas	FDSdQa	Rio Vacacaí	ANA	-29 55 33	-53 24 56	6.790	1986-2017	72	38,90	350,50	6,42
41	85620000	Pulqueria	FDSd	Rio São Sepé	ANA	-30 13 00	-53 41 00	618	1981-1981	01	-	-	-
42	85623000	São Sepé - Montante	FDSdQa	Rio São Sepé	ANA	-30 11 36	-53 33 47	721	1985-2017	81	49,50	744,00	0,97
43	85625000	São Sepé	FDSdQa	Rio São Sepé	ANA	-30 11 00	-53 33 00	725	1981-1981	04	31,11	59,34	8,11
44	85730000	Passo Linha do Rio	FDSdQa	Rio Pardo	ANA	-29 36 00	-52 47 00	1.228	1979-1986	08	36,50	75,15	11,23
45	85735000	Candelária Montante	FDSdQa	Rio Pardo	ANA	-29 40 24	-52 46 10	1.376	2002-2017	42	35,80	422,90	3,30
46	85740000	Candelária	FDSdQa	Rio Pardo	ANA	-29 40 24	-52 46 10	1.376	1986-2001	30	11,00	40,79	1,02
47	85900000	Rio Pardo	FDSdQa	Rio Jacuí	ANA	-29 59 46	-52 22 28	38.753	1998-2017	57	27,40	148,50	1,90
48	86100000	Passo do Gabriel	FDSdQa	Rio das Antas	ANA	-28 48 20	-50 29 38	1.725	2001-2017	45	5,30	24,26	0,10
49	86410000	Passo Barra do Guaiaveira	FDSdQa	Rio Turvo	ANA	-28 44 22	-51 25 28	2.839	1979-2017	80	17,90	176,50	0,06
50	86470000	Ponte do Rio das Antas	FDSdQa	Rio Das Antas	ANA	-29 02 42	-51 34 01	12.298	1978-2007	49	16,10	93,39	2,43
51	86500000	Passo Carreiro	FFRDSdQa	Rio Carreiro	ANA	-28 51 03	-51 50 00	1.829	1979-2017	74	24,70	156,37	1,20
52	86510000	Muçum	FDSdQa	Rio Taquari	ANA	-29 09 59	-51 52 05	15.826	1979-2017	76	24,70	402,95	2,62
53	86560000	Linha Colombo	FFRDSdQa	Rio Guaporé	ANA	-28 54 42	-51 57 11	1.980	1979-2017	82	35,80	225,50	1,40
54	87035000	São Jerônimo - Jusante	FFRDSQa	Rio Jacuí	ANA	-29 56 00	-51 41 00	68.713	1981-1989	04	33,48	130,95	1,03
55	87270000	Passo Montenegro	FFRDSdQa	Rio Caí	ANA	-29 42 02	-51 26 26	4.357	1986-2014	65	67,65	1705,79	0,83
56	87380000	Campo Bom	FFRDSdQa	Rio dos Sinos	ANA	-29 41 31	-51 02 42	2.864	1986-2017	73	49,50	622,34	2,21
57	87590000	Passo do Caçõo	FDSdQa	Rio Camaquã	ANA	-30 57 40	-53 29 19	4.069	1978-2008	51	38,20	238,35	2,48
58	87905000	Passo do Mendonça	FDSdQa	Rio Camaquã	ANA	-31 00 36	-52 03 10	15.543	1978-2017	68	60,70	478,50	4,33

Nº	Código	Nome da Estação	Tipo	Curso d'água	Entidade	LAT	LON	Área (km²)	Período	N	Média Css	Máx Css	Mín Css
59	88176000	Arroio Candiota Montante	FDSdQa	Arroio Candiota	SEIVAL	-31 32 00	-53 40 00	-	2005-2017	66	32,60	258,80	3,39
60	88177000	Sanga Funda Montante	FDSdQa	Arroio Sanga Funda	SEIVAL	-31 32 00	-53 40 00	-	2005-2017	62	15,00	48,78	2,28
61	88181000	Arroio Candiota Jusante	FDSdQa	Arroio Candiota	SEIVAL	-31 33 00	-53 40 00	-	2005-2017	68	33,20	284,08	1,37
62	88220000	Picada da Areia	FDSd	Rio Jaguarão	ANA	-32 23 08	-53 38 16	6.098	1997-1998	04	11,49	21,56	6,02
63	88680000	Passo do Ricardo	FDSdQa	Rio Piratini	ANA	-31 54 00	-52 39 00	5.370	1977-1981	11	75,50	141,34	34,06

F: indica estação com escala para observação do nível d'água; R: indica estação com registrador (linígrafo); D: indica que na estação são efetuadas medições de vazão; Sd: indica estação com medição de descarga sólida; Qa: indica estação de qualidade de água; ANA: Agência Nacional de Águas; SEIVAL: SEIVAL Usina Termelétrica Ltda; N: número de amostragens de sedimentos em suspensão; Média Css: Valor médio das concentrações de sedimento em suspensão observadas (mg L⁻¹); Máx Css: Valor máximo das concentração de sedimento em suspensão observada (mg L⁻¹); Mín Css: valor mínimo das concentração de sedimento em suspensão observada (mg L⁻¹).

Apêndices B – Coeficientes *a* e *b* e índices estatísticos das curvas-chaves ajustadas aos dados de Concentração de sedimentos em suspensão completas, subdivididas em períodos de 10 anos e subdivididas em intervalos de vazão das estações sedimentométricas para o estado do Rio Grande do Sul

Código	Dados completos					Período de 10 anos					Intervalo de vazão				
	<i>a</i>	<i>b</i>	R ² Css	ERPCss	NSC _{ss}	<i>a</i>	<i>b</i>	R ² Css	ERPCss	NSC _{ss}	<i>a</i>	<i>b</i>	R ² Css	ERPCss	NSC _{ss}
70200000	0,850	0,452	0,15	98	0,02	5,640	0,075	0,00	251	-0,17	0,007	1,370	0,40	75	0,16
						0,479	0,544	0,30	97	0,33	0,675	0,510	0,04	121	-0,09
						0,369	0,661	0,43	71	0,19	1,440	0,280	0,01	335	-0,09
						0,540	0,507	0,20	50	0,02					
70700000	4,940	0,096	0,00	154	-0,09	69,610	-0,379	0,05	271	-0,08	0,259	0,589	0,28	39	0,16
						0,281	0,566	0,42	46	0,29	0,001	1,870	0,29	140	0,21
						0,343	0,575	0,48	40	0,23	2077,500	-1,540	0,14	144	-0,12
						27,760	0,107	0,01	156	-0,15	1777,600	-0,748	0,04	133	-0,17
72300000	13,240	0,047	0,00	224	-0,02	3,730	0,073	0,01	67	-0,07	7,500	0,060	0,00	119	-0,16
						3,540	0,132	0,01	103	-0,07	39,230	-0,291	0,02	112	-0,12
						4,400	0,327	0,15	61	0,09	0,021	1,450	0,41	79	0,16
						1,880	0,600	0,32	51	0,05	13,590	0,038	0,00	64	-0,06
72430000	2,960	0,454	0,23	57	0,07						6,380	0,134	0,02	29	0,01
						72,310	-0,279	0,03	310	-0,12	0,579	0,867	0,41	37	0,41
						0,406	0,804	0,37	106	0,35	11,670	0,084	0,00	87	-0,07
						1,210	0,683	0,35	72	0,47	48,830	-0,537	0,03	261	-0,09
72630000	1,950	0,569	0,19	123	0,06	0,460	0,911	0,49	67	0,16					
						1,950	0,270	0,05	97	-0,03	358207,000	-1,300	0,29	36	0,05
						0,041	0,820	0,45	64	0,14	1657,500	-0,855	0,21	57	0,13
											11,000	-0,118	0,00	128	-0,12
73010000	0,660	0,424	0,13	91	0,04						523,490	-0,752	0,12	69	0,02
											4,110	0,097	0,02	57	-0,05
73480000	3,120	0,212	0,07	64	-0,04	3,120	0,212	0,07	64	-0,04					
						2,680	0,358	0,23	36	0,29	0,000	1,880	0,49	64	0,33
						0,021	0,902	0,47	68	0,44	0,275	0,511	0,04	96	-0,08
						0,004	0,985	0,55	53	0,34	795521,000	-1,880	0,17	127	0,09
74100000	0,204	0,562	0,17	114	0,10										

Código	Dados completos					Período de 10 anos					Intervalo de vazão				
	a	b	R²C _{ss}	ERPC _{ss}	NSC _{ss}	a	b	R²C _{ss}	ERPC _{ss}	NSC _{ss}	a	b	R²C _{ss}	ERPC _{ss}	NSC _{ss}
74270000	2,980	0,447	0,14	126	-0,06	33,220	0,077	0,00	221	-0,15	811,330	-0,373	0,04	135	-0,15
						24,260	-0,127	0,04	56	-0,10	23,370	0,013	0,00	117	-0,07
						0,650	0,703	0,42	72	0,01	19,020	-0,065	0,00	118	-0,06
						0,120	1,090	0,55	109	0,52					
74370000	4,730	0,277	0,04	170	-0,03	31,180	-0,138	0,01	106	-0,06	24756,000	-1,370	0,16	216	-0,28
						1,140	0,604	0,24	68	0,01	4,950	0,297	0,01	73	-0,05
						3,230	0,316	0,05	260	-0,05	30,300	-0,452	0,04	101	0,18
						0,075	1,330	0,62	56	0,11					
74470000	5,420	0,348	0,05	297	-0,04	4,310	0,618	0,08	1939	-0,11	7609,200	-1,150	0,06	92	-0,04
						126,190	-0,688	0,08	318	0,00	0,999	0,766	0,07	159	0,00
						3,040	0,550	0,28	48	0,05	75,310	-0,689	0,04	412	-0,08
						1,990	0,559	0,31	45	0,08					
74600000	3,090	0,539	0,19	99	0,07	8,040	0,323	0,10	87	0,02	0,000	3,050	0,50	54	0,70
						0,233	1,160	0,49	69	0,23	8,330	0,222	0,01	71	-0,11
											1,170	0,986	0,12	159	-0,08
74610000	0,395	1,040	0,67	39	0,32	0,069	1,540	0,87	38	0,61	0,065	1,450	0,10	42	-0,05
						0,723	0,876	0,62	37	0,26	0,688	0,887	0,20	40	0,08
											0,322	1,120	0,67	32	0,46
74700000	3,520	0,483	0,22	63	0,01	12,750	0,207	0,03	152	-0,16	428,670	-0,572	0,06	53	-0,04
						2,910	0,420	0,21	60	0,12	3,340	0,470	0,05	53	-0,03
						2,560	0,600	0,29	57	0,01	4,400	0,389	0,05	76	-0,11
						2,090	0,596	0,64	34	0,52					
74750000	8,260	0,438	0,18	47	-0,11	18,470	0,018	0,00	102	-0,08	3,000	0,825	0,19	91	0,19
						21,140	0,124	0,01	72	-0,12	3,190	0,861	0,07	64	-0,02
						5,490	0,676	0,50	59	0,51	16,490	-0,252	0,03	52	-0,02
						5,960	0,481	0,31	44	0,20					
74800000	0,003	1,110	0,66	41	0,46	0,003	1,110	0,66	41	0,46	0,000	1,690	0,73	37	0,18
											0,039	0,753	0,25	30	0,26

Código	Dados completos					Período de 10 anos					Intervalo de vazão				
	a	b	R²C _{ss}	ERPC _{ss}	NSC _{ss}	a	b	R²C _{ss}	ERPC _{ss}	NSC _{ss}	a	b	R²C _{ss}	ERPC _{ss}	NSC _{ss}
74900000	2,070	0,794	0,51	66	0,37	7,040	0,513	0,18	126	0,25	1,710	0,848	0,26	72	0,16
						1,090	0,928	0,56	61	0,35	0,767	1,110	0,31	52	0,15
						1,390	0,892	0,63	59	0,13	10,570	-0,093	0,00	61	-0,21
						1,010	0,997	0,73	45	0,60					
75155000	1,570	0,751	0,32	57	0,04	0,898	1,060	0,24	121	0,12	0,785	0,900	0,07	99	-0,06
						5,220	0,277	0,11	51	-0,03	0,661	0,959	0,11	40	-0,05
						0,660	0,974	0,59	34	0,25	1,250	0,846	0,16	59	0,01
						1,200	0,822	0,72	36	0,59					
75185000	7,950	0,490	0,09	100	-0,02	19,370	0,410	0,04	237	-0,12	7,950	0,574	0,01	280	-0,33
						13,890	0,120	0,02	70	-0,10	2,090	0,887	0,23	43	0,13
						1,670	1,060	0,80	27	0,74	31,860	-0,178	0,00	111	-0,17
						35,560	-0,071	0,00	119	-0,17	14,410	0,262	0,02	101	-0,11
75205000	4,450	0,482	0,17	77	0,02	2,400	0,606	0,42	44	0,22	61,730	-0,365	0,02	82	-0,04
						5,160	0,406	0,33	38	0,07	10,670	0,035	0,00	64	-0,06
						2,390	0,674	0,24	113	0,05					
						9,750	0,272	0,04	161	-0,15	432,140	-0,503	0,07	72	-0,21
75295000	1,550	0,622	0,25	103	0,11	0,575	0,833	0,40	102	0,49	1,980	0,539	0,04	72	-0,01
						0,294	1,030	0,68	49	0,74	3,710	0,282	0,01	126	-0,08
						3,930	0,369	0,15	82	0,03					
						4,060	0,500	0,19	83	-0,07	10,420	0,211	0,04	50	-0,02
75320000	3,530	0,389	0,13	80	-0,07	59,770	-0,228	0,02	106	-0,08	0,314	0,834	0,10	70	0,02
						0,712	0,637	0,48	50	0,17	0,030	1,560	0,20	108	0,03
						144,290	-0,498	0,07	205	-0,19	37,610	-0,031	0,00	176	-0,26
						3,080	0,180	0,06	76	-0,08	0,314	0,920	0,12	75	0,27
75450000	2,420	0,445	0,14	117	0,00	0,271	0,974	0,63	50	0,80	28,120	-0,423	0,02	120	-0,11
						0,492	0,884	0,66	68	0,55					
						11,440	0,272	0,13	66	-0,20	32,060	-0,174	0,01	121	-0,18
						2,140	0,351	0,17	125	-0,16	28,630	-0,097	0,00	128	-0,14
75500000	9,630	0,136	0,02	158	-0,21						1,060	1,120	0,55	100	0,01

Código	Dados completos					Período de 10 anos					Intervalo de vazão				
	a	b	R²C _{ss}	ERPC _{ss}	NSC _{ss}	a	b	R²C _{ss}	ERPC _{ss}	NSC _{ss}	a	b	R²C _{ss}	ERPC _{ss}	NSC _{ss}
75700000	4,720	0,276	0,15	82	-0,01	28,540	-0,338	0,08	133	-0,15	14,410	0,161	0,01	60	-0,05
						343,890	-1,710	0,68	73	0,37	1,590	0,480	0,16	61	0,01
						1,760	0,535	0,55	58	0,32	19,390	-0,339	0,04	78	-0,06
						3,980	0,313	0,52	38	0,59					
76100000	1,930	0,526	0,55	68	0,35	1,430	0,598	0,56	59	-0,64	1,390	0,644	0,05	68	-0,02
						2,170	0,492	0,54	74	0,37	1,290	0,581	0,22	68	0,20
											5,290	0,113	0,06	39	0,04
76120000	59,580	0,097	0,05	107	-1,03	59,580	0,097	0,05	107	-1,03	1,340	0,912	0,37	52	0,55
											92,640	-0,370	0,55	19	0,71
76310000	10,690	0,232	0,13	123	-0,04	38,490	0,045	0,00	342	-0,24	4,470	0,301	0,03	53	-0,01
						1,460	0,522	0,70	56	0,60	6,200	0,384	0,07	157	-0,05
						12,220	0,216	0,12	83	-0,06	4,270	0,580	0,13	100	-0,08
						12,770	0,174	0,14	72	-0,03					
76380000	61,050	0,048	0,01	58	-0,05	61,050	0,048	0,01	58	-0,05					
76440000	3,570	0,308	0,09	158	-0,02	36,150	-0,005	0,00	95	-0,10	239,500	-0,373	0,01	94	-0,05
						7,560	-0,081	0,01	72	-0,10	2,150	0,372	0,04	69	-0,03
						0,845	0,586	0,30	155	0,34	26,340	-0,721	0,14	172	-0,13
						1,680	0,506	0,25	81	-0,02					
76560000	5,180	0,278	0,13	82	0,02	16,710	0,186	0,13	52	0,08	109,060	-0,169	0,00	106	-0,16
						3,150	0,166	0,13	50	0,06	40,730	-0,032	0,00	66	-0,09
						11,440	0,152	0,05	71	-0,03	7,340	0,162	0,02	70	-0,10
						1,700	0,491	0,43	46	0,34					
76750000	6,370	0,302	0,20	88	0,05	26,430	0,090	0,02	106	-0,13	63,720	-0,048	0,00	69	-0,09
						5,530	0,125	0,04	86	0,03	3,510	0,412	0,07	85	0,10
						4,880	0,328	0,26	66	0,12	14,950	-0,057	0,00	80	-0,10
						5,160	0,380	0,38	57	0,11					
76800000	6,450	0,216	0,08	65	-0,04	1,260	0,620	0,37	49	0,36	65,600	-0,112	0,00	64	-0,08
						3,310	0,130	0,02	80	-0,12	3,080	0,351	0,09	37	-0,03
						33,510	-0,036	0,00	47	-0,05	41,150	-0,181	0,01	107	-0,09
						1,750	0,434	0,51	32	0,42					

Código	Dados completos					Período de 10 anos					Intervalo de vazão				
	a	b	R²Css	ERPCss	NSCcss	a	b	R²Css	ERPCss	NSCcss	a	b	R²Css	ERPCss	NSCcss
77150000	31,090	0,019	0,00	118	-0,02	104,370	-0,126	0,04	76	-0,08	102698,000	-0,885	0,50	30	0,36
						0,150	0,593	0,40	51	0,12	592,900	-0,370	0,01	68	-0,04
											61,450	-0,154	0,04	106	-0,10
77500000	5,180	0,287	0,36	50	0,11	2,910	0,405	0,58	45	0,18	11,430	0,199	0,04	45	-0,05
						6,970	0,183	0,30	49	0,38	3,440	0,354	0,21	40	0,04
						6,380	0,312	0,27	60	0,00	8,702	0,026	0,00	68	-0,04
79400000	15,610	0,279	0,15	60	-0,03	13,680	0,360	0,35	57	0,09	5,420	0,544	0,10	50	-0,04
						18,650	0,173	0,04	62	-0,04	70,350	-0,344	0,05	56	-0,03
											9,950	0,929	0,32	52	0,09
85400000	2,740	0,231	0,06	81	-0,08	173,590	-0,327	0,07	137	-0,11	8,070	0,093	0,00	62	-0,09
						0,608	0,477	0,35	75	0,20	0,000	1,980	0,19	80	0,00
						0,552	0,455	0,29	42	0,30	10,870	-0,064	0,00	81	-0,06
						1,870	0,242	0,21	51	0,18					
85580000	102,580	0,126	0,06	181	-0,75	102,580	0,126	0,06	181	-0,75					
85600000	14,540	0,173	0,14	55	0,01	9,200	0,159	0,25	51	0,07	100,380	-0,182	0,01	40	-0,03
						13,460	0,143	0,08	48	-0,01	9,350	0,307	0,06	66	0,02
						16,570	0,231	0,31	36	0,08	13,560	0,162	0,08	43	-0,04
85623000	5,010	0,592	0,27	132	0,11	8,860	0,019	0,00	147	-0,10	8,150	0,534	0,07	351	-0,10
						4,420	0,642	0,36	88	0,05	9,790	0,217	0,01	99	-0,09
						4,510	0,797	0,52	76	0,52	8,710	0,073	0,00	68	-0,09
85730000	52,400	0,209	0,33	285	-11,73	52,400	0,209	0,33	285	-11,73					
85735000	2,020	0,597	0,37	84	0,07	1,610	0,588	0,32	71	0,06	0,053	1,560	0,16	203	-0,06
						2,530	0,640	0,47	102	0,12	2,030	0,456	0,18	53	0,09
											5,770	0,069	0,02	34	-0,01
85740000	4,700	0,164	0,05	95	-0,14	1,830	0,372	0,22	90	-0,05	1,630	0,388	0,09	41	-0,01
						10,510	0,000	0,00	72	-0,09	6,310	0,063	0,00	105	-0,16
											1,250	1,080	0,22	91	-0,12
85900000	1,040	0,458	0,31	60	0,16	0,788	0,512	0,28	47	0,07	19,480	0,080	0,00	39	-0,05
						1,140	0,433	0,32	68	0,19	0,165	0,742	0,17	72	0,05
											48,650	-0,238	0,02	43	-0,04

Código	Dados completos					Período de 10 anos					Intervalo de vazão				
	a	b	R²C _{ss}	ERPC _{ss}	NSC _{ss}	a	b	R²C _{ss}	ERPC _{ss}	NSC _{ss}	a	b	R²C _{ss}	ERPC _{ss}	NSC _{ss}
86100000	1,150	0,356	0,16	130	0,20	1,250	0,398	0,29	68	0,33	0,133	0,828	0,44	47	0,10
						1,290	0,249	0,07	154	0,04	0,349	0,666	0,05	192	0,03
											4,590	-0,212	0,04	35	0,01
86410000	2,290	0,331	0,08	210	-0,09	72,430	-0,340	0,14	151	-0,13	1739,900	-0,865	0,13	86	-0,09
						0,025	1,280	0,53	198	0,57	1,560	0,397	0,03	80	-0,09
						0,722	0,654	0,20	84	-0,05	6,050	-0,030	0,00	473	-0,13
						0,799	0,525	0,55	42	0,39					
86470000	6,730	0,086	0,01	71	-0,09	1113,000	-0,764	0,27	73	0,44	0,001	1,560	0,34	53	0,35
						1,820	0,248	0,27	35	0,37	1,590	0,353	0,03	68	-0,08
						1,830	0,294	0,13	50	0,10	11,260	-0,010	0,00	84	-0,13
86500000	3,540	0,421	0,28	78	0,10	83,870	-0,318	0,08	144	-0,16	0,438	0,888	0,34	63	0,17
						2,580	0,355	0,35	42	0,18	2,770	0,419	0,10	59	-0,01
						1,840	0,647	0,56	57	0,48	1,120	1,460	0,34	105	0,14
						2,550	0,435	0,60	48	0,48					
86510000	1,600	0,367	0,12	67	-0,04	40,180	-0,157	0,02	143	-0,16	18,310	-0,010	0,00	40	-0,04
						0,645	0,457	0,42	42	0,22	0,157	0,785	0,11	72	-0,04
						0,212	0,779	0,31	63	-0,05	6,440	0,041	0,00	79	-0,11
						0,701	0,460	0,52	37	0,52					
86560000	1,740	0,654	0,34	102	0,26	34,080	-0,137	0,01	162	-0,19	1,020	0,818	0,34	59	0,26
						1,460	0,504	0,31	68	0,05	5,790	0,247	0,01	100	-0,08
						1,330	0,742	0,48	64	0,32	5,120	0,224	0,01	96	-0,08
						0,503	0,982	0,73	62	0,52					
87270000	2,020	0,570	0,27	104	0,00	1,120	0,536	0,27	97	0,30	1,120	0,730	0,03	143	-0,14
						4,630	0,361	0,22	60	0,03	4,580	0,361	0,02	75	-0,06
						1,490	0,822	0,36	93	0,01	13,750	-0,197	0,03	97	-0,11
87380000	4,560	0,384	0,12	95	-0,01	3,900	0,254	0,11	75	0,01	2,600	0,455	0,01	136	-0,12
						4,510	0,374	0,11	79	-0,01	3,080	0,501	0,05	91	-0,03
						2,430	0,624	0,25	85	0,04	2,870	0,513	0,09	70	0,07
87590000	0,004	1,540	0,18	82	-0,04	23,030	0,087	0,00	122	-0,14	0,000	2,350	0,11	31	-0,11
						0,004	1,430	0,22	45	-0,06	0,004	1,530	0,05	71	-0,07
						0,000	2,550	0,62	38	0,27	0,000	2,060	0,02	136	-0,15

Código	Dados completos					Período de 10 anos					Intervalo de vazão				
	<i>a</i>	<i>b</i>	R ² Css	ERPCss	NSC _{Css}	<i>a</i>	<i>b</i>	R ² Css	ERPCss	NSC _{Css}	<i>a</i>	<i>b</i>	R ² Css	ERPCss	NSC _{Css}
87905000	3,770	0,437	0,24	87	0,04	13,050	0,372	0,08	91	-0,07	1,030	0,632	0,05	114	0,07
						1,180	0,589	0,37	92	0,21	13,710	0,209	0,01	89	-0,09
						1,560	0,618	0,60	44	0,72	26,640	-0,075	0,00	65	-0,08
88176000	19,370	0,276	0,16	70	0,01	18,730	0,146	0,07	69	-0,05	35,550	0,110	0,02	35	-0,03
						19,300	0,542	0,39	64	0,22	18,370	0,198	0,01	80	-0,08
											7,400	-0,490	0,12	60	-0,02
88177000	13,160	0,310	0,37	49	0,33	12,670	0,243	0,27	51	0,18	19,170	0,242	0,12	28	0,05
						12,880	0,458	0,54	46	0,56	11,440	0,585	0,17	45	0,07
											11,520	0,193	0,12	52	-0,04
88181000	19,160	0,143	0,08	92	-0,02	19,620	0,043	0,01	91	-0,05	118,390	-0,332	0,15	81	-0,05
						17,880	0,350	0,36	65	0,25	18,610	0,135	0,02	112	-0,07
											14,540	-0,068	0,00	49	-0,05
88680000	141,890	-0,219	0,15	42	0,22	141,890	-0,219	0,15	42	0,22	0,801	1,060	0,60	20	0,67
											917,090	-0,936	0,83	19	0,84

a e *b*: coeficientes de ajuste do modelo da curva-chave de potência para valores de Concentração de sedimentos em suspensão (Css); R²Css: coeficiente de determinação, para o ajuste do modelo nos valores de Css; ERPCss: estatística do Erro Relativo Percentual Médio, em %, para o ajuste do modelo nos valores de Css; NSC_{Css}: modelo Nash e Sutcliffe para o ajuste do modelo nos valores de Css.

Apêndice C – Coeficientes *a* e *b* e índices estatísticos das curvas-chaves ajustadas aos dados de Descarga de sedimentos em suspensão completas, subdivididas em períodos de 10 anos e subdivididas em intervalos de vazão das estações sedimentométricas para o estado do Rio Grande do Sul

Código	Dados completos					Período de 10 anos					Intervalo de vazão				
	<i>a</i>	<i>b</i>	R ² Qss	ERPQss	NSQss	<i>a</i>	<i>b</i>	R ² Qss	ERPQss	NSQss	<i>a</i>	<i>b</i>	R ² Qss	ERPQss	NSQss
70200000	0,073	1,450	0,65	97	0,22	0,488	1,070	0,33	247	0,52	0,001	2,370	0,66	70	0,21
						0,041	1,540	0,77	95	0,72	0,058	1,510	0,24	121	0,05
						0,032	1,660	0,82	70	0,28	0,124	1,280	0,20	328	-0,06
						0,047	1,510	0,69	51	0,22					
70700000	0,427	1,090	0,38	150	0,26	6,010	0,621	0,12	270	-0,09	0,022	1,590	0,74	40	0,85
						0,024	1,570	0,85	47	0,86	0,000	2,870	0,49	130	0,31
						0,030	1,570	0,88	39	0,94	179,490	-0,543	0,02	143	-0,11
72300000	1,140	0,953	0,38	121	0,31	2,390	0,893	0,30	155	0,20	153,590	0,252	0,05	133	-0,13
						0,322	1,070	0,68	66	0,53	0,648	1,060	0,13	119	-0,07
						0,306	1,130	0,49	102	0,35	3,390	0,709	0,08	112	-0,19
72430000	0,256	1,450	0,75	56	0,31	0,380	1,330	0,75	62	0,24	0,002	2,450	0,66	80	0,31
						0,162	1,600	0,77	51	0,31	1,170	1,040	0,21	64	0,01
											0,551	1,130	0,60	29	0,40
72630000	0,169	1,560	0,63	119	0,72	6,250	0,721	0,17	310	0,18	0,050	1,870	0,76	38	0,87
						0,035	1,800	0,75	105	0,63	1,010	1,080	0,14	86	-0,03
						0,105	1,680	0,35	71	0,85	4,220	0,460	0,02	259	-0,21
						0,040	1,910	0,81	66	0,84					
73010000	0,056	1,420	0,64	88	0,37	0,169	1,270	0,54	97	0,35	30949,000	-0,301	0,02	36	-0,05
						0,004	1,820	0,80	63	0,12	143,210	0,145	0,01	57	-0,09
											0,951	0,882	0,07	128	-0,14
73480000	0,269	1,210	0,71	63	0,11	0,269	1,210	0,71	63	0,11	45,230	0,248	0,01	69	-0,11
											0,355	1,097	0,75	57	0,34
74100000	0,018	1,560	0,61	113	0,40	0,232	1,360	0,81	36	0,87	0,000	2,878	0,70	74	0,53
						0,002	1,900	0,79	65	0,71	0,024	1,511	0,25	96	0,07
						0,000	1,980	0,83	56	0,54	68733,000	-0,888	0,04	120	-0,14

Código	Dados completos					Período de 10 anos					Intervalo de vazão				
	a	b	R²Qss	ERPQss	NSQss	a	b	R²Qss	ERPQss	NSQss	a	b	R²Qss	ERPQss	NSQss
74270000	0,257	1,440	0,63	121	0,21	2,870	1,070	0,31	213	-0,05	70,099	0,628	0,11	135	-0,08
						2,090	0,873	0,66	56	0,20	2,019	1,013	0,12	117	0,31
						0,056	1,700	0,81	70	-0,45	1,640	0,935	0,11	118	-0,04
						0,010	2,090	0,82	109	0,61					
74370000	0,409	1,270	0,48	164	0,07	2,690	0,862	0,20	106	-0,06	2138,900	-0,371	0,01	215	-0,22
						0,099	1,600	0,68	67	0,58	0,428	1,297	0,13	73	-0,06
						0,279	1,320	0,49	266	0,09	2,618	0,549	0,06	101	0,65
						0,006	2,330	0,84	56	0,01					
74470000	0,469	1,350	0,46	299	0,01	0,372	1,620	0,37	1949	0,01	657,440	-0,149	0,00	92	-0,08
						10,900	0,312	0,02	318	-0,30	0,086	1,766	0,28	159	0,13
						0,263	1,550	0,75	48	0,36	6,507	0,311	0,01	412	-0,07
						0,173	1,560	0,78	45	0,35					
74600000	0,268	1,540	0,65	100	0,36	0,694	1,320	0,64	86	0,28	0,000	4,050	0,64	53	0,73
						0,020	2,160	0,77	69	0,64	0,720	1,222	0,23	71	0,05
											0,101	1,986	0,36	159	0,04
74610000	0,034	2,040	0,89	39	0,49	0,006	2,530	0,95	37	0,63	0,006	2,445	0,24	41	-0,04
						0,063	1,880	0,88	38	0,64	0,059	1,887	0,54	40	0,30
											0,028	2,119	0,88	32	0,58
74700000	0,305	1,480	0,73	62	0,08	1,100	1,210	0,48	152	0,13	37,037	0,428	0,04	53	-0,06
						0,252	1,420	0,75	60	0,63	0,289	1,470	0,34	53	0,08
						0,221	1,600	0,75	58	-0,13	0,381	1,389	0,40	77	-0,07
						0,181	1,600	0,93	34	0,84					
74750000	0,713	1,440	0,70	68	0,34	1,600	1,020	0,33	103	0,03	0,260	1,825	0,53	91	0,58
						1,830	1,120	0,50	76	0,49	0,276	1,861	0,27	64	0,07
						0,474	1,680	0,86	59	0,58	1,425	0,748	0,22	52	0,08
						0,515	1,480	0,81	44	0,36					
74800000	0,000	2,110	0,88	34	0,58	0,000	2,110	0,88	34	0,58	0,000	2,695	0,87	46	-0,12
											0,003	1,753	0,64	30	0,53

Código	Dados completos					Período de 10 anos					Intervalo de vazão				
	a	b	R ² Qss	ERPQss	NSQss	a	b	R ² Qss	ERPQss	NSQss	a	b	R ² Qss	ERPQss	NSQss
74900000	0,179	1,790	0,84	65	0,53	0,608	1,510	0,65	126	0,86	0,148	1,848	0,62	72	0,29
						0,094	1,930	0,85	61	0,49	0,066	2,114	0,61	53	0,31
						0,120	1,890	0,88	58	-0,14	0,913	0,907	0,17	61	-0,06
						0,088	1,990	0,92	44	0,71					
75155000	0,136	1,750	0,72	57	0,10	0,078	2,060	0,54	121	0,20	0,068	1,900	0,25	99	-0,03
						0,451	1,280	0,73	52	0,70	0,057	1,956	0,35	39	0,07
						0,057	1,970	0,85	34	0,49	0,108	1,846	0,48	59	0,21
						0,103	1,820	0,93	36	0,86					
75185000	0,687	1,490	0,49	100	0,04	1,670	1,410	0,32	236	0,01	0,687	1,574	0,05	279	-0,32
						1,200	1,120	0,59	70	0,67	0,181	1,887	0,57	43	0,38
						0,144	2,060	0,94	27	0,83	2,753	0,822	0,03	111	-0,19
75205000	0,385	1,480	0,67	77	0,08	3,070	0,930	0,29	119	0,18	1,245	1,262	0,35	101	-0,11
						0,207	1,610	0,84	44	0,41	5,333	0,635	0,04	82	-0,09
						0,445	1,410	0,86	39	0,14	0,922	1,035	0,22	64	-0,05
						0,207	1,670	0,66	111	0,23					
75295000	0,134	1,620	0,69	103	0,32	0,842	1,270	0,45	159	0,27	37,340	0,497	0,07	72	0,15
						0,050	1,830	0,76	101	0,96	0,171	1,539	0,25	72	0,08
						0,025	2,030	0,89	49	0,84	0,321	1,282	0,20	126	-0,10
						0,339	1,370	0,71	83	-0,84					
75320000	0,305	1,390	0,66	80	0,18	0,351	1,500	0,68	83	0,05	0,900	1,211	0,56	50	0,27
						5,160	0,772	0,16	106	-0,14	0,027	1,834	0,36	70	0,23
						0,062	1,640	0,86	51	-0,90	0,003	2,558	0,40	106	0,08
75450000	0,209	1,450	0,63	119	0,42	12,470	0,502	0,07	205	-0,12	3,249	0,969	0,15	176	0,01
						0,266	1,180	0,72	76	0,01	0,028	1,920	0,37	78	0,56
						0,023	1,970	0,87	49	0,89	2,430	0,577	0,04	120	-0,12
						0,043	1,880	0,54	67	0,20					
75500000	0,832	1,140	0,64	160	0,51	0,988	1,270	0,76	66	-0,49	2,770	0,826	0,23	121	0,41
						0,185	1,350	0,75	124	0,74	2,474	0,903	0,13	128	-0,09
										0,091	2,116	0,55	99	0,09	

Código	Dados completos					Período de 10 anos					Intervalo de vazão				
	a	b	R²Qss	ERPQss	NSQss	a	b	R²Qss	ERPQss	NSQss	a	b	R²Qss	ERPQss	NSQss
75700000	0,408	1,280	0,79	83	0,42	2,470	0,662	0,24	133	-0,02	1,245	1,161	0,41	60	0,34
						29,710	-0,706	0,27	74	0,24	0,138	1,480	0,64	61	0,68
						0,152	1,530	0,91	57	0,57	1,675	0,661	0,13	78	-0,06
						0,344	1,310	0,95	37	0,75					
76100000	0,167	1,520	0,43	66	0,43	0,124	1,590	0,90	58	0,45	0,120	1,644	0,25	67	0,11
						0,188	1,490	0,92	73	0,45	0,112	1,581	0,67	68	0,58
											0,457	1,113	0,86	39	0,51
76120000	5,150	0,903	0,82	47	0,49	5,150	0,903	0,82	47	0,49	0,116	1,912	0,72	52	0,73
											8,004	0,630	0,78	19	0,72
76310000	0,924	1,230	0,81	122	0,35	3,330	1,040	0,54	337	0,74	0,387	1,301	0,33	53	0,45
						0,126	1,520	0,95	56	0,69	0,536	1,384	0,50	158	0,09
						1,060	1,220	0,81	85	0,24	0,369	1,580	0,53	100	0,27
						1,100	1,170	0,88	71	0,63					
76380000	5,270	1,050	0,80	59	0,33	5,270	1,050	0,80	59	0,33					
						3,120	0,990	0,72	93	0,25	20,693	0,627	0,03	94	-0,08
						0,653	0,919	0,47	72	0,07	0,186	1,372	0,35	69	0,00
						0,073	1,590	0,76	157	0,58	2,276	0,279	0,02	172	-0,12
76440000	0,308	1,310	0,63	158	0,00	0,145	1,510	0,75	82	-0,02					
						1,440	1,190	0,86	54	0,67	9,422	0,831	0,09	105	0,08
						0,273	1,170	0,88	51	0,67	3,519	0,968	0,21	66	0,18
						0,989	1,150	0,74	70	0,50	0,635	1,162	0,55	70	0,29
76560000	0,448	1,280	0,76	82	0,63	0,147	1,490	0,88	46	0,74					
						2,280	1,090	0,76	106	0,76	5,506	0,952	0,38	69	-0,05
						0,478	1,120	0,77	85	0,59	0,303	1,412	0,50	85	0,53
						0,422	1,330	0,85	67	0,05	1,292	0,944	0,37	80	0,05
76750000	0,550	1,300	0,82	87	0,40	0,446	1,380	0,89	57	0,78					
						0,109	1,620	0,80	49	0,81	5,668	0,883	0,07	62	-0,10
						0,286	1,130	0,65	80	0,72	0,266	1,351	0,59	37	0,47
						2,900	0,965	0,71	47	0,27	3,555	0,819	0,10	107	-0,06
76800000	0,557	1,220	0,74	67	0,43	0,151	1,430	0,92	31	0,72					

Código	Dados completos					Período de 10 anos					Intervalo de vazão				
	a	b	R²Qss	ERPQss	NSQss	a	b	R²Qss	ERPQss	NSQss	a	b	R²Qss	ERPQss	NSQss
77150000	2,690	0,981	0,64	82	0,07	9,020	0,874	0,68	76	-0,06	8873,100	0,115	0,02	30	-0,03
						0,013	1,590	0,83	50	-0,94	51,230	0,630	0,04	68	-0,11
											5,310	0,846	0,58	107	-0,08
77500000	0,447	1,290	0,92	51	0,46	0,252	1,410	0,94	47	0,30	0,987	1,199	0,60	45	0,03
						0,602	1,180	0,95	49	0,98	0,297	1,354	0,80	40	0,43
						0,552	1,310	0,87	59	0,87	0,697	1,026	0,53	63	-0,02
79400000	1,350	1,280	0,79	60	0,14	1,180	1,360	0,89	57	0,18	0,468	1,544	0,46	50	-0,02
						1,160	1,170	0,66	53	-0,03	6,079	0,656	0,17	56	-0,05
											0,860	1,929	0,67	52	0,38
85400000	0,237	1,230	0,63	80	0,43	14,990	0,673	0,23	137	-0,03	0,698	1,093	0,36	62	0,37
						0,053	1,480	0,84	77	0,60	0,000	2,982	0,35	82	0,04
						0,048	1,450	0,81	41	0,85	0,939	0,936	0,31	81	-0,07
						0,161	1,240	0,87	50	0,78					
85580000	8,860	0,874	0,77	79	0,68	8,860	0,874	0,77	79	0,68					
85600000	1,260	1,170	0,88	55	0,33	0,795	1,160	0,95	52	0,64	8,673	0,818	0,19	40	0,18
						1,160	1,140	0,84	47	0,68	0,808	1,307	0,54	66	0,19
						1,430	1,230	0,93	35	0,31	1,172	1,162	0,82	43	0,62
85623000	0,433	1,590	0,73	131	0,16	0,765	1,020	0,38	147	0,07	0,705	1,534	0,39	351	0,04
						0,382	1,640	0,79	87	-0,23	0,846	1,217	0,20	99	-0,05
						0,389	1,800	0,85	77	0,58	0,753	1,073	0,27	68	0,05
85730000	4,530	0,791	0,87	43	0,69	4,530	0,791	0,87	43	0,69					
85735000	0,175	1,600	0,81	85	0,12	0,139	1,590	0,78	72	0,09	0,005	2,565	0,34	207	0,13
						0,218	1,640	0,85	102	0,18	0,175	1,456	0,69	53	0,26
											0,499	1,069	0,81	34	0,37
85740000	0,406	1,160	0,73	94	0,78	0,158	1,370	0,79	89	0,73	0,141	1,388	0,55	41	0,55
						0,908	0,990	0,75	71	0,82	0,545	1,063	0,24	105	0,10
											0,108	2,081	0,51	91	-0,06
85900000	0,090	1,450	0,82	58	0,53	0,068	1,510	0,77	47	0,34	1,683	1,080	0,29	39	0,15
						0,099	1,430	0,84	67	0,54	0,014	1,742	0,54	72	0,23
											4,203	0,762	0,16	43	0,09

Código	Dados completos					Período de 10 anos					Intervalo de vazão				
	a	b	R²Qss	ERPQss	NSQss	a	b	R²Qss	ERPQss	NSQss	a	b	R²Qss	ERPQss	NSQss
86100000	0,099	1,360	0,74	131	0,74	0,108	1,400	0,83	68	0,86	0,011	1,828	0,79	47	0,67
						0,112	1,250	0,65	154	0,73	0,030	1,666	0,26	192	0,27
											0,396	0,788	0,35	35	0,28
86410000	0,198	1,330	0,59	209	0,24	6,260	0,660	0,38	151	0,10	150,320	0,135	0,00	86	-0,12
						0,002	2,280	0,78	201	0,67	0,135	1,397	0,28	80	-0,06
						0,062	1,650	0,62	82	0,15	0,523	0,970	0,13	473	-0,07
						0,069	1,520	0,91	41	0,77					
86470000	0,582	1,090	0,50	74	0,28	96,170	0,236	0,03	73	-0,03	0,000	2,556	0,58	54	0,53
						0,157	1,250	0,90	35	0,77	0,137	1,353	0,30	67	0,12
						0,152	1,290	0,74	47	0,28	0,973	0,990	0,15	84	-0,13
86500000	0,306	1,420	0,82	78	0,52	7,250	0,682	0,27	144	0,07	0,038	1,888	0,70	63	0,62
						0,223	1,350	0,89	42	0,94	0,240	1,419	0,57	60	0,12
						0,159	1,640	0,89	56	0,73	0,097	2,457	0,59	89	-0,03
						0,220	1,440	0,94	49	0,59					
86510000	0,139	1,370	0,65	68	0,02	3,470	0,843	0,34	142	0,11	1,582	0,990	0,19	40	0,15
						0,056	1,460	0,88	43	0,47	0,014	1,785	0,38	72	-0,02
						0,018	1,780	0,70	63	-0,06	0,556	1,041	0,21	79	-0,06
						0,061	1,460	0,52	37	0,85					
86560000	0,151	1,650	0,77	101	0,61	2,940	0,830	0,28	147	0,08	0,088	1,818	0,72	58	0,57
						0,126	1,500	0,80	67	0,18	0,501	1,247	0,18	100	0,04
						0,115	1,740	0,84	64	0,84	0,442	1,224	0,19	95	-0,02
						0,044	1,980	0,92	62	0,71					
87270000	0,174	1,570	0,74	104	0,07	0,097	1,540	0,75	98	0,83	0,097	1,730	0,14	143	-0,14
						0,309	1,470	0,76	82	0,03	0,395	1,361	0,24	75	-0,06
						0,301	1,540	0,63	73	0,56	1,188	0,803	0,34	97	0,21
87380000	0,394	1,380	0,63	93	0,10	0,337	1,250	0,75	74	0,25	0,225	1,455	0,09	136	-0,02
						0,390	1,370	0,63	77	0,07	0,266	1,501	0,31	91	0,04
						0,210	1,620	0,69	84	0,15	0,248	1,513	0,46	70	0,46
87590000	0,000	2,540	0,37	90	0,17	1,990	1,090	0,07	124	-0,07	0,000	3,352	0,20	40	0,06
						0,000	2,430	0,46	50	0,04	0,000	2,533	0,14	78	-0,01
						0,000	3,550	0,76	44	0,51	0,000	3,061	0,05	100	-0,25

Código	Dados completos					Período de 10 anos					Intervalo de vazão				
	<i>a</i>	<i>b</i>	R ² Qss	ERPQss	NSQss	<i>a</i>	<i>b</i>	R ² Qss	ERPQss	NSQss	<i>a</i>	<i>b</i>	R ² Qss	ERPQss	NSQss
87905000	0,326	1,440	0,77	88	0,66	1,130	1,370	0,55	90	0,36	0,089	1,632	0,27	113	0,54
						0,102	1,590	0,81	93	0,47	1,184	1,209	0,32	89	0,15
						0,135	1,620	0,91	44	0,93	2,302	0,925	0,11	65	-0,01
88176000	1,670	1,280	0,81	70	0,48	1,620	1,150	0,81	69	0,89	3,071	1,110	0,62	35	0,29
						1,670	1,540	0,84	64	0,40	1,587	1,198	0,35	80	0,25
											0,640	0,510	0,13	60	-0,01
88177000	1,140	1,310	0,91	49	0,89	1,090	1,240	0,91	51	0,90	1,656	1,242	0,79	28	0,85
						1,110	1,460	0,92	45	0,80	0,988	1,585	0,60	45	0,55
											0,996	1,193	9,84	52	0,23
88181000	1,660	1,140	0,85	92	-9,99	1,690	1,040	0,83	90	-1,26	10,229	0,668	0,42	81	0,47
						1,540	1,350	0,90	65	0,69	1,608	1,135	0,61	112	0,47
											1,257	0,932	0,18	49	0,04
88680000	12,260	0,781	0,69	42	0,67	12,260	0,781	0,69	42	0,67	0,069	2,056	0,85	20	0,90
											79,237	0,064	0,02	19	0,03

a e *b*: coeficientes de ajuste do modelo da curva-chave de potência para valores de Descarga de sedimentos em suspensão (Qss); R²Qss: coeficiente de determinação, para o ajuste do modelo nos valores de Qss; ERPQss: estatística do Erro Relativo Percentual Médio, em %, para o ajuste do modelo nos valores de Qss; NSQss: modelo Nash e Sutcliffe para o ajuste do modelo nos valores de Qss.

