

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Centro de Desenvolvimento Tecnológico
Curso de Engenharia Hídrica



Trabalho de Conclusão de Curso

**Aplicação e validação da MUSLE utilizando dados
hidrossedimentológicos locais de uma bacia hidrográfica do Escudo
Sul-Rio-Grandense**

Janice Ferreira da Silveira

Pelotas/RS, 2015

Janice Ferreira da Silveira

**Aplicação e validação da MUSLE utilizando dados
hidrossedimentológicos locais de uma bacia hidrográfica do Escudo Sul-
Rio-Grandense**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia
Hídrica, do Centro de Desenvolvimento
Tecnológico como requisito parcial à
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Hídrica.

Orientador: Prof. Dr. Gilberto Loguercio Collares

Pelotas, 2015

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação na Publicação

S587a Silveira, Janice Ferreira da

Aplicação e validação da MUSLE utilizando dados hidrossedimentológicos locais de uma bacia hidrográfica do escudo sul-rio-grandense / Janice Ferreira da Silveira ; Gilberto Loguercio Collares, orientador. — Pelotas, 2015.

61 f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Hídrica) — Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, 2015.

1. Produção de sedimentos. 2. Desagregação. 3. Bacia hidrográfica. 4. Calibração de fatores. 5. Sig. I. Collares, Gilberto Loguercio, orient. II. Título.

CDD : 627

Janice Ferreira da Silveira

**Aplicação e validação da MUSLE utilizando dados
hidrossedimentológicos locais de uma bacia hidrográfica do Escudo Sul-
Rio-Grandense.**

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado, como requisito parcial, para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Hídrica, Curso de Engenharia Hídrica, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas.

Data da Defesa: 26/06/2015

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Gilberto Loguercio Collares (Orientador)
Doutor em Ciência do Solo pela Universidade Federal de Santa Maria

Eng^o Agrônomo Guilherme Kruger Bartels
Mestre em Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Pelotas

Prof^a. Dr. Viviane Santos Silva Terra
Doutora em Agronomia pela Universidade Federal de Pelotas

Dedico este trabalho aos meus pais Tânia e Orlei que sempre me oportunizaram o estudo e foram fonte de incentivo na realização dos meus ideais, e meus irmãos Márcio e Maurício e minha irmã Rejane pelo contínuo incentivo e apoio ao longo de toda a vida.

Agradecimentos

Primeiramente agradeço a Deus pela força e coragem que sempre me proveu para enfrentar todas as andanças durante esta fase da existência.

Agradeço a minha família pelo apoio do sempre, pelas valiosas lições ao longo da vida, pela moral e ética que trago comigo e pela oportunidade de cursar e concluir o ensino de nível superior.

Ao meu namorado Mauro por todo o auxílio, amor e compreensão durante os vários anos da graduação.

A Universidade Federal de Pelotas por me oportunizar o ensino, em especial ao curso de Graduação em Engenharia Hídrica.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Gilberto Loguercio Collares, pela orientação deste trabalho, pela empolgação contagiante e pela perseverança que tornou realidade este curso de graduação.

Aos professores Idel Milani, Gilberto Collares, Luis Eduardo Suzuki e Maurício Daí Prá, pelo notável apoio, empenho e dedicação intensos e de coração ao longo de toda esta jornada e por jamais medirem esforços para a construção e bom desenvolvimento do ensino, das estruturas físicas e das boas relações entre docentes e discentes dentro do nosso querido curso.

Ao Msc. Guilherme Kruguer Bartels por todo o apoio, tempo e orientações a mim dedicados e pela concessão dos dados necessários para a construção e bom desenvolvimento deste trabalho.

Aos colegas do Laboratório de Hidrometria e Sedimentologia Henrique, Luciana, Mariana, Reginaldo, Roberta, Rute e Viviane por toda a ajuda e pela alegria que trouxeram aos meus últimos semestres dentro da Engenharia Hídrica.

As minhas queridas amigas Aline Saupe, Mariana Souza e Patrícia Ribeiro que foram grandes parcerias para todas as horas e com as quais construí uma grande amizade.

Aos meus colegas da 1^o turma do curso de Graduação em Engenharia Hídrica com os quais dividi muitas madrugadas de estudos, térmicas de mate e churrascos.

“A vida é um processo fluente e em alguns lugares do caminho coisas desagradáveis ocorrerão. Podem deixar cicatrizes, mas a vida continua a fluir. É como a água corrente, que ao estagnar-se perde a pureza.. não pare! Continue bravamente, porque cada experiência nos ensina uma lição.”

Bruce Lee

“A alegria está na luta, na tentativa, no sofrimento envolvido e não na vitória propriamente dita.”

Mahatma Gandhi

Resumo

SILVEIRA, Janice Ferreira. **Aplicação e validação da MUSLE utilizando dados hidrossedimentológicos locais de uma bacia hidrográfica do Escudo Sul-Rio-Grandense**. 2015. 61 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Hídrica) – Universidade Federal de Pelotas, Pelotas-RS, 2015.

A erosão hídrica é uma das principais formas de desagregação e transporte dos solos, principalmente, nas áreas agrícolas. Este processo é relacionado ao manejo e uso dos solos, às precipitações e ao escoamento superficial. Desta forma, o mapeamento e avaliação do risco de erosão é uma importante ferramenta para o planejamento da gestão dos recursos de uma bacia hidrográfica, capaz de permitir a inserção de modificações no uso do solo, e assim possibilitar a determinação de estratégias adequadas. Na intenção de quantificar o aporte de sedimentos em uma pequena bacia, situada entre os municípios de Morro Redondo/RS e Pelotas/RS, aplicou-se a Equação Universal de Perdas de Solo Modificada – MUSLE, calibrando seus fatores, utilizando dados hidrossedimentológicos da bacia hidrográfica do Arroio do Ouro. A utilização de um SIG permitiu, além da espacialização dos fatores do modelo ao longo de toda a bacia, a identificação de áreas mais sensíveis aos processos erosivos. O modelo MUSLE calibrado para a bacia obteve os coeficientes a e b iguais a 0,511 e 0,809, respectivamente. Os fatores K , LS , C e P médios foram definidos: 0,016, 2,100, 0,060 e 0,760, respectivamente. A validade do modelo foi comprovada empregando o índice de eficiência de Nash-Sutcliffe, determinado em 0,993, demonstrando que o modelo é capaz de prever a perda de solo para as condições locais da bacia hidrográfica do Arroio do Ouro, situada no Escudo Rio-Grandense do estado do RS.

Palavras-Chave: produção de sedimentos; desagregação; bacia hidrográfica; calibração de fatores; SIG.

Abstract

SILVEIRA, Janice Ferreira. **Estimates and validation of MUSLE with local hydrosedimentological data from a small watershed, located at the Sul-Rio-Grandense shield.** 2015. 61 f. Final Course Work (Undergraduate degree in Water Engineering) – Federal University of Pelotas, Pelotas-RS, 2015.

The water erosion is one of the main forms of soil detachment and sediments transport, especially, on agricultural areas. This process is related with the soil use and management, rainfall and surface runoff. Thus, the mapping and assessment of erosion risks are important tools for planning of natural resources management of watersheds. This tool allows to simulate modifications on land-use and through this improve management strategies. In order to estimate the sediment yield in a small watershed, located between the towns of Morro Redondo/RS and Pelotas/RS, the Modified Universal Soil Loss Equation – MUSLE was applied with calibration of their factors based on hydrosedimentological data from the watershed of Arroio do Ouro. The use of GIS tools allowed, beyond the spacialization of each MUSLE factor along all the basin, the identification of more susceptible areas to erosion processes. The MUSLE model calibrated for watershed of Arroio do Ouro has obtained the coefficients a and b equal to 0,511 e 0,809, respectively. The averages from the factors erodibility (K), topographic (LS), cover-management (C) and support practice (P) obtained for all the basin was: 0,016, 2,100, 0,060 and 0,760, respectively. In this way, it was possible to validate the calibrated model through the Nash-Sutcliffe's efficiency ratio, estimated at 0,993, meaning that the calibrated MUSLE model with local data can estimate the soil loss for the the watershed of Arroio do Ouro, located at the Sul-Rio-Grandense shield.

Key-words: sediments production; detachment; small watersheds; factors calibration; GIS.

Lista de Figuras

Figura 1	Localização da bacia hidrográfica do Arroio do Ouro	28
Figura 2	Precipitações dos treze eventos selecionados para aplicação da equação MUSLE à bacia do Arroio do Ouro.....	35
Figura 3	Método gráfico da separação do escoamento a partir de uma hidrógrafa isolada	36
Figura 4	Método dos trapézios para o cálculo do volume escoado superficialmente.....	37
Figura 5	Mapa da erodibilidade dos solos da bacia do Arroio do Ouro ($t\ h\ MJ^{-1}\ mm^{-1}$).....	45
Figura 6	Mapa do fator comprimento de encostas da bacia do Arroio do Ouro.....	46
Figura 7	Mapa do fator declividade das vertentes da bacia do Arroio do Ouro.....	46
Figura 8	Mapa do fator de uso e manejo do solo da bacia do Arroio do Ouro.....	47
Figura 9	Mapa de distribuição das práticas conservacionistas na bacia do Arroio do Ouro.....	48
Figura 10	Aporte de sedimentos observados em campo e estimados pela MUSLE com seus coeficientes originais.....	51
Figura 11	Aporte de sedimentos observados em campo e estimados pela MUSLE com seus coeficientes calibrados.....	52

Lista de Tabelas

Tabela 1 Valores do fator C para diferentes usos do solo e culturas utilizados na modelagem para a bacia do Arroio do Ouro.....	33
Tabela 2 Fatores K, LS, C e P definidos para a bacia do Arroio do Ouro.....	48
Tabela 3 Calibração dos parâmetros <i>a</i> e <i>b</i> para a bacia do Arroio do Ouro.....	49
Tabela 4 Aporte de sedimentos observados em campos e simulados pela MUSLE com coeficientes originais.....	51
Tabela 5 Aporte de sedimentos observados em campo e simulados pela MUSLE com coeficientes calibrados.....	52
Tabela 6 Coeficiente Nash-Sutcliffe para MUSLE sem coeficientes calibrados para a bacia do Arroio do Ouro.....	53
Tabela 7 Coeficiente Nash-Sutcliffe para MUSLE com coeficientes calibrados para a bacia do Arroio do Ouro.....	53

Sumário

1	Introdução	14
1.1	Objetivos	16
1.2	Hipótese	17
2	Revisão bibliográfica	17
2.1	Conceito e dinâmica da bacia hidrográfica	17
2.2	Erosão	18
2.3	Produção de sedimentos	20
2.4	Modelagem matemática	21
2.5	Classificação de modelos	22
2.6	Modelos USLE e MUSLE	24
2.7	Aplicação de SIG à modelagem matemática	25
3	Materiais e métodos	26
3.1	Localização da bacia experimental	26
3.2	Modelagem matemática aplicada à bacia do Arroio do Ouro	27
3.2.1	Fator K	29
3.2.2	Fator LS	30
3.2.3	Fator C	31
3.2.4	Fator P	32
3.2.5	Fatores Q e q_p	33
3.2.6	Coeficientes a e b	37
3.2.7	Calibração da MUSLE	38
3.2.8	Validação da MUSLE	38
3.3	Uso da ferramenta SIG	39
3.3.1	Obtenção do Modelo Digital de Elevação	40
3.3.2	Delimitação da bacia do Arroio do Ouro	40
3.3.3	Cálculo dos fatores da equação MUSLE	41
3.3.4	Fator K	41
3.3.5	Fator LS	42
3.3.6	Fator C	42
3.3.7	Fator P	42
4	Resultados	43
4.1	Fatores MUSLE	43
4.2	Análise do comportamento hidrossedimentológico	47
4.2.1	Calibração dos coeficientes a e b	47

4.2.2	Equação MUSLE calibrada e original	48
4.2.3	Validação do modelo MUSLE para a bacia do Arroio do Ouro	49
4.2.3.1	Estimativa da produção de sedimentos na bacia do Ouro	50
4.2.3.2	Análise do coeficiente de Nash-Sutcliffe	52
4	Conclusão	53
5	Referências Bibliográficas	54

1 Introdução

A humanidade, desde seus primórdios, viveu e se desenvolveu em torno da água. A ocupação de áreas ribeirinhas vem da necessidade fundamental da existência humana em ter água para os mais diversos usos consuntivos e não consuntivos, desde aqueles presentes na vida cotidiana às atividades industriais. O ser humano, agente de mudanças como é, acaba por impactar o meio ao qual se desenvolve. Assim, a ação antrópica acelera os processos considerados naturais e promove a poluição, desproteção e perda do solo, redução da qualidade da água, além de contaminações por elementos tóxicos, tanto no solo, como na água. Isto se dá, principalmente, pelas práticas que expõem os solos aos impactos dos agentes erosivos (BERTONI & LOMBARDI NETO, 2010; PRUSKI, 2006). Dentro desta relação solo-água, podem-se destacar os fenômenos da erosão, da perda de solos e da produção de sedimentos como de grande importância para o diagnóstico da bacia hidrográfica.

A erosão dos solos e a produção de sedimentos são fenômenos naturais e de destaque no cenário da gestão de recursos hídricos e de uso do solo visto que seus impactos provocam importantes alterações no meio em termos socioeconômicos e ambientais. Assim, a mensuração destes fatores se torna importante para embasar tomadas de decisão a respeito do gerenciamento da unidade territorial denominada bacia hidrográfica e da construção do plano de uso e manejo para esse espaço geográfico. Pois possibilita a avaliação do estado de degradação dos recursos naturais, econômicos e sociais em que se encontra a bacia hidrográfica, bem como para avaliar a eficácia de práticas adotadas que visam à melhora dos recursos da bacia (MIQUELONI, 2012; VALLADARES, 2012).

A agricultura é um dos usos do solo que necessita ser avaliado criteriosamente, pois sofre com consideráveis perdas anuais e, este material erodido ao ser carregado para os cursos d'água, tem papel de redutor da qualidade da água adicionando turbidez, reduzindo a entrada de luminosidade

para a coluna d'água, aportando excessiva carga de nutrientes e agregando componentes tóxicos para o meio aquático.

Em função da escassez de dados medidos em campo e também da dificuldade em mensurar os fenômenos hidrossedimentológicos empregam-se modelos matemáticos associados a dados locais de bacias hidrográficas, cuja obtenção é simplificada, para a estimativa de perda de solo e produção de sedimentos. Modelos matemáticos são ferramentas largamente empregadas na previsão do processo erosivo, tanto para um planejamento conservacionista (preventivo) quanto para o monitoramento e controle (JAMES & BURGESS, 1982). Uma das principais vantagens da utilização de modelos de predição de perda de solo reside na possibilidade de simular diferentes cenários com os prováveis impactos das mudanças no uso do solo (SANTOS et al., 2014). Considerando que a erosão depende de fatores locais, associados a ações antrópicas, sua avaliação é intrínseca às características socioambientais da área em estudo e, portanto, torna-se importante associar as informações locais da bacia na estrutura do modelo para que a simulação represente a realidade. Além disso, é necessário que ocorra uma comparação entre os resultados oriundos da modelagem e aqueles obtidos através de medições em campo para que o modelo seja validado. Cabe salientar ainda que modelos matemáticos tornam possível a simulação de eventos futuros e eventos não monitorados em campo. A modelagem é uma ferramenta que quando devidamente calibrada e validada otimiza o tempo investido em estudos e gera resultados de forma mais eficiente. Pode-se considerá-la como facilitadora do desenvolvimento de pesquisas tendo em vista que o monitoramento tradicional demanda deslocamento de equipamentos, pessoas e tempo, gerando custos operacionais regulares, enquanto que os modelos, uma vez calibrados e validados, não exigem frequência amostral elevada. Entretanto, cabe salientar que os dados medidos em campo sempre serão mais confiáveis em relação aos dados estimados através de modelos. Com isso a modelagem é uma ferramenta auxiliar à gestão que não pode preterir de um monitoramento adequado e permanente que, esse sim, aportará dados reais que permitirão sobre o uso, manejo e situação do estado atual do ambiente natural. A associação de modelos matemáticos a Sistemas de Informações Geográficas

(SIGs) torna possível a espacialização dos modelos agregando assim maior confiabilidade aos resultados gerados.

Diante do exposto, tem-se a necessidade de coletar dados hidrossedimentológicos de bacias hidrográficas a fim de construir um panorama representativo das dinâmicas locais atuantes entre água, solo e produção de sedimentos. Este conhecimento auxilia nas tomadas de decisão sobre o uso e manejo da bacia, além de auxiliar em ações corretivas no meio ambiente.

O presente estudo busca associar dados locais da bacia hidrográfica do Arroio do Ouro ao modelo matemático MUSLE, calibrando seus fatores em função das particularidades da bacia e assim validar informações obtidas através da aplicação de validação.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Estimar a produção de sedimentos na bacia hidrográfica do Arroio do Ouro utilizando a Equação Universal de Perda de Solo Modificada (MUSLE).

1.1.2 Objetivo específico

Validar e aplicar a Equação Universal de Perda de Solo Modificada (MUSLE) para estimativas de produção de sedimentos de eventos individuais na bacia hidrográfica do Arroio do Ouro.

1.2 Hipótese

O modelo matemático MUSLE representa adequadamente a produção de sedimentos da bacia hidrográfica do Arroio do Ouro mediante a utilização de características determinadas na própria bacia.

2 Revisão bibliográfica

2.1 Conceito e dinâmica da bacia hidrográfica

A bacia hidrográfica é frequentemente utilizada na abordagem e condução dos diferentes estudos que o campo da hidrologia abrange. “Uma bacia hidrográfica compõe-se de um conjunto de superfícies vertentes e de uma rede de drenagem formada por cursos de água que confluem até resultar em um leito único no exutório” (TUCCI, 2009, pg 40).

Esse conceito pode ser aplicado a todas as áreas urbanas, industriais, agrícolas ou de preservação, pois estes locais sempre fazem parte de alguma bacia hidrográfica (PORTO & PORTO, 2008). Os processos que ocorrem dentro de uma bacia hidrográfica são dinâmicos, não lineares e interdependentes. O mecanismo de cada processo dentro de uma bacia pode ser conhecido de forma determinística, mas as interações e retroalimentações fazem com que as combinações de processos ocorram de maneira aleatória (CHRISTOFOLETTI, 1980). Didoné (2013) ressalta que os processos em bacias nada mais são do que a tendência de estabilização com o meio, através da dissipação da energia das precipitações e de outros fatores de entrada. É preciso então caracterizar os fluxos de entrada e saída e a dinâmica interna do sistema de modo a possibilitar a compreensão e descrição dos processos hidrológicos presentes (DIDONÉ, 2013). Diversos fatores influenciam na forma como a água interage dentro de uma bacia hidrográfica, porém os principais

são o clima, os solos, a vegetação e as características morfométricas da bacia. As características morfométricas de uma bacia hidrográficas estão associadas ao relevo, ao comprimento do curso d'água principal, à área da rede de drenagem, à forma da bacia e à declividade (TUCCI & MENDES, 2006). Oliveira (2011) indica que a área, a forma e a declividade da bacia são diretamente proporcionais à vazão máxima de escoamento superficial.

2.2 Erosão

A erosão hídrica é a forma mais importante de erosão (ZACHAR, 1982). Esse processo é uma das principais formas de degradação dos solos agrícolas, sendo mais expressivo em regiões com altos índices pluviométricos, associado a áreas de solo exposto com declividade expressiva e solos de baixa resistência a erosão (DIDONÉ, 2013). Beskow et al. (2009) também indicam que a intensidade da erosão hídrica pode ser fortemente afetada pelo comprimento do declive (fator L) e seu gradiente (fator S).

As perdas por erosão de um mesmo tipo de solo variam em intensidade de acordo com o uso da terra, ou seja, está atrelada ao tipo de cultivo desenvolvido com perdas podendo variar de 0,7 ton ano⁻¹ (pastagem) a 38 ton ano⁻¹ (algodão) (ZACHAR, 1982), que vem a causar perdas econômicas para a agricultura, como também causa sérios problemas ambientais relacionados ao transporte de sedimentos. A erosão dos solos é um fenômeno natural ocasionado pela ação dos processos de desagregação, transporte e deposição de sedimentos. Porém, a erosão acelerada é característica da ação antrópica, ocasionada pelas práticas que expõem os solos aos impactos dos agentes erosivos (BERTONI & LOMBARDI NETO, 2010; PRUSKI, 2006). Vitte e Mello (2007) citam que a desagregação é o estágio inicial do processo erosivo que consiste na ruptura dos agregados e no efeito “*splash*” (erosão por salpicamento de gotas de chuva) que também auxilia na ruptura dos agregados. Cabe salientar que a intensidade do efeito “*splash*” é ligada à resistência do solo ao impacto das gotas da chuva. Zachar (1982) faz uma

ressalva de que o efeito “*splash*” é um aspecto ou processo independente da erosão hídrica, pois pode ocorrer sem a formação do escoamento superficial.

A ocorrência de processos erosivos está diretamente associada ao escoamento superficial. O escoamento superficial tem sua ocorrência atrelada a uma condição de máxima saturação do solo ou então de eventos de precipitação com intensidade superior a capacidade de infiltração de água no solo. Neste processo forma-se um fluxo na superfície do solo que provoca uma progressiva degradação dos horizontes superficiais. A lâmina de fluxo superficial que escoar pelo terreno acaba por gerar linhas de fluxo preferenciais que dão origem ao fluxo em sulcos. O fluxo oriundo das áreas entre os sulcos que segue na direção dos sulcos é denominado fluxo entressulcos.

O efeito “*splash*” está associado como principal fator da erosão entressulcos, enquanto que a erosão em sulcos é vinculada diretamente ao escoamento superficial. A intensificação desse fenômeno origina a erosão em ravinas que ocorre devido à formação de canais com maior fluxo de água sobre o solo que são capazes de agir de maneira muito mais agressiva. Por fim a manifestação mais grave da erosão vem através da evolução desse processo culminando na formação das voçorocas. Cabe salientar que alguns autores não diferenciam ravinas de voçorocas em função da dificuldade de definição e diferenciação de ambos. Além disso, outros fenômenos erosivos ocorrem em conjunto aos citados. Todos esses processos quando observados em escala de bacia hidrográfica são complexos e definidos por características intrínsecas de cada bacia.

De acordo com Tucci e Collischonn (1998), a erosão em bacias rurais ocorre devido à exposição periódica do solo, em função das práticas agrícolas e dessa maneira ocorre aumento da produção de sedimentos. Cabe salientar que nem todo solo erodido atinge os cursos d'água, ou seja, nem toda perda de solo produz sedimentos. Barros (2012) cita que a produção de sedimentos é uma das principais consequências da erosão hídrica.

2.3 Produção de sedimentos

A produção de sedimentos é definida como a quantidade de sedimentos que deixa a área de captação da bacia e atinge a área de drenagem (PARSONS et al., 2006). Os sedimentos presentes nos corpos hídricos são oriundos dos diversos processos erosivos que ocorrem na bacia hidrográfica e também daqueles que atingem as margens e o leito do curso d'água. Em ocasiões de chuvas, as enxurradas transportam muitas partículas para o rio, onde esse sedimento se move em suspensão ou no leito, rolando, deslizando ou em saltos (CARVALHO, 2000). Segundo Minella e Merten (2011) a produção de sedimentos é função dos processos erosivos que ocorrem na bacia, compreendidos pela taxa de desagregação de solo devido à precipitação e pelo fluxo de escoamento laminar e concentrado, dos processos de transferência dos sedimentos entre bacia vertente e calha fluvial e pelos processos de erosão e deposição que ocorrem na própria calha fluvial.

Ao atingir as águas, os sedimentos podem torna-las impróprias para uso e consumo em diferentes níveis, além de dificultar e encarecer o tratamento necessário para o consumo humano da água. Considerada esta importância fica salientada a necessidade de avaliação da descarga sólida, pois ela é capaz de indicar onde ocorre a maior produção de sedimentos, e assim descrever quais processos contribuem com maior relevância nessa produção, quais tipos de contaminantes estão agregados aos sedimentos e qual o fluxo espacial e temporal dos poluentes (TUCCI, 2006; FERNANDES, 2001; MACHADO, 2011) e assim permitir ações para gerenciamento. Guimarães (2010) cita que em uma bacia hidrográfica rural, a produção de sedimentos, além da qualidade da água, é o principal parâmetro de avaliação do nível de degradação dos recursos naturais e socioeconômicos.

O monitoramento das perdas de solo permite inferir sobre a eficiência de práticas conservacionistas na bacia frente às adversidades climáticas, topográficas e pedológicas (WALLING, 1983), bem como reflete as taxas erosivas causadas pela energia da chuva e da enxurrada sobre as diferentes proporções de uso do solo e tipos de manejos aplicados (MINELLA et al., 2008). Para tal, análises em pequenas bacias são consideradas adequadas,

observando a condição da escala de estudo, visto que é uma unidade integradora dos processos envolvidos no ciclo hidrológico, sensíveis a mudanças do uso e manejo do solo e às precipitações (BARROS, 2012). Segundo Carvalho (1994), no Brasil predominam estudos de sedimentos que tem por objetivo, principalmente, a avaliação dos problemas físicos, como o assoreamento de rios e lagos. Porém, cabe lembrar que, além disso, existe grande interação entre sedimentos, contaminantes e o meio aquático, a qual deve ser considerada no estudo da bacia hidrográfica.

2.4 Modelagem matemática

Na intenção de compreender estas complexas interações que promovem perda de solos e produção de sedimentos, a modelagem tem sido utilizada como forma de melhor compreender o sistema, auxiliando tanto na identificação de áreas de risco, quanto no entendimento dos mecanismos de ambos os processos e na previsão de situações futuras (OLIVEIRA, 2011). Modelos estimadores de erosão e sedimentação são ferramentas que permitem a mensuração da erosão, perdas do solo e produção de sedimentos, além da eficácia de práticas conservacionistas. Silva et al. (2011) mencionam que modelos hidrossedimentológicos utilizados na gestão ambiental de bacias hidrográficas estão em constante otimização, objetivando sempre oferecer maior facilidade de aplicação e melhor acurácia.

Para aumentar a eficiência da aplicação de modelos de previsão da erosão no planejamento de uso do solo ou ainda no controle do processo erosivo, é necessário considerar todos os critérios relevantes que dizem respeito à sua aplicabilidade (a erosão em sulcos, em entressulcos, em voçorocas, o aporte de sedimentos em bacias, a morfologia do solo, a intensidade da precipitação, o volume escoado superficialmente, entre outros), possuir estrutura de modelo vinculada aos dados disponíveis localmente, entre outros fatores (JAMES & BURGESS, 1982). Desta forma, percebe-se a dificuldade em trabalhar com os modelos matemáticos e os limites da aplicação concernentes a estes modelos. Apesar das dificuldades a que a modelagem

está sujeita, existem modelos que se adaptam melhor a certas características do local em estudo e são assim capazes de expressar informações condizentes com a realidade através de um maior enfoque a fatores específicos. Dentre estes se destaca a Equação Universal de Perda de Solo Modificada (MUSLE) (Williams, 1975) quando avalia o escoamento superficial e a vazão de pico proporcionando assim estudos em escala de bacia hidrográfica, ao invés da Equação Universal de Perda de Solo (USLE) (Wischmeier & Smith, 1958) que avalia a precipitação apenas de maneira geral utilizando um coeficiente que indica a erosividade da chuva, ou seja, o potencial da chuva em provocar erosão pontualmente, o que dificulta sua aplicação para bacias hidrográficas.

Existe uma grande variedade de modelos para a simulação da perda de solos e da produção de sedimentos. Cada tipo de modelo matemático serve a um propósito e apenas um tipo de modelo em particular não pode ser considerado mais apropriado em todas as situações possíveis em relação aos demais (MERRITT et al., 2003). Dessa maneira a escolha de um modelo irá depender da finalidade almejada e das características da área de estudo.

2.5 Classificação de modelos

A construção de um modelo matemático envolve a seleção das variáveis consideradas mais importantes para o fenômeno avaliado e das leis que regem as variáveis selecionadas. Os modelos matemáticos podem ser diferenciados em relação aos processos considerados, ao nível de complexidade e aos dados necessários. Estas diferenças permitem agrupá-los segundo diferentes critérios: os objetivos, a base conceitual e a escala espacial e temporal (MINELLA et al., 2010). Conceitualmente, os modelos podem ser classificados como sendo empíricos, conceituais ou físicos. Esta diferenciação ocorre em função do embasamento tomado para a formulação do modelo. Cabe salientar que um modelo pode não estar restrito a apenas um tipo específico de fundamentação, podendo ter seu embasamento formulado por mais de um conceito ao mesmo tempo.

Os modelos empíricos são construídos a partir de relações estatísticas de dados obtidos experimentalmente. As variáveis e fatores definidos como determinantes no processo são experimentados e observados em parcelas e a partir daí são extraídas relações que representam e constroem o modelo. Um exemplo de modelo empírico é a Equação Universal de Perda se Solo Revisada (RUSLE) (RENARD et al., 1997). Este modelo é o resultado do aperfeiçoamento do modelo USLE. No RUSLE, a tecnologia de avaliação dos fatores foi alterada e novos dados foram introduzidos para avaliar os termos da equação em condições específicas (RENARD et al., 1997).

Os modelos conceituais são constituídos não só por um conjunto de equações, que representam o sistema de forma simples, mas como também por um conjunto de elementos associados (RODRIGUES, 2011). Além disso, são incorporados mecanismos de produção e transporte de sedimentos junto à estrutura do modelo. O Soil and Water Assessment Tool (SWAT) é um modelo conceitual desenvolvido pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA) (KING et al., 1996). O referido modelo é capaz de simular o escoamento e a qualidade da água e sua aplicação abrange a prevenção e o controle da erosão dos solos e da poluição difusa.

Santos (2009) cita que os modelos físicos utilizam as principais equações diferenciais do sistema físico para então construir uma representação matemática do sistema. As equações físicas que descrevem os processos hidrológicos como, por exemplo, infiltração, evapotranspiração e escoamento superficial e erosão como, por exemplo, desagregação, transporte e deposição de sedimentos são alguns dos processos representados nos modelos físicos (MINELLA et al., 2010). Um dos mais divulgados modelos físicos é o WEPP (Water Erosion Prediction Project) (Nearing et al., 1989) que prediz o escoamento através da utilização do método do Número da Curva (CN) (USDA, 1986) ou utilizando o método de Green-Ampt (GREEN & AMPT, 1911). Os processos erosivos são calculados nesse modelo com base em fatores como declividade, cobertura vegetal, tensão de cisalhamento, rugosidade, entre outros.

2.6 Modelos USLE e MUSLE

A Equação Universal de Perdas de Solo – USLE, desenvolvida por Wischmeier & Smith (1958), é um dos principais modelos estimadores de perda de solos. Este modelo empírico fundamentou grande parte dos demais modelos estimadores de erosão existentes e é largamente utilizado em todo o mundo em função de sua simplicidade e facilidade de obtenção de dados. É considerada como uma das mais utilizadas metodologias para estimativa de perda de solos e resultou de esforços realizados na década de 70 por agências de pesquisa e de extensão dos Estados Unidos da América (EUA). Por ser projetado como um método para a estimativa da média anual de perda de solo causada por erosão laminar, o modelo USLE não é considerado adequado para avaliar eventos de precipitação específicos. A USLE foi criada para fornecer subsídio aos profissionais da área de conservação do solo no planejamento de uso do solo de áreas rurais ao avaliar a perda de solo para diferentes áreas e cultivos e a eficácia de práticas conservacionistas. A estimativa das perdas de solo por erosão laminar é realizada empregando seis fatores intrínsecos às características climáticas, propriedades do solo, paisagem do terreno, cobertura vegetal com manejo agrícola e práticas conservacionistas (DUTRA et al., 1997).

Com o avanço nas pesquisas baseadas na USLE, Williams (1975) propôs uma modificação na equação original do modelo, substituindo o fator erosividade da chuva por um fator referente aos efeitos do escoamento superficial na produção de sedimentos, assim adaptando-o para a previsão da produção de sedimentos em escala de bacia hidrográfica (SCHULTZ et al., 2013). Assim, foi criada a MUSLE (Modified Universal Soil Loss Equation), modelo que tem sido muito utilizado na predição do aporte de sedimentos em pequenas bacias hidrográficas (SADEGHI et al., 2007).

A MUSLE considera o volume escoado superficialmente, a vazão de pico do escoamento superficial e adota dois coeficientes (a e b). Cabe salientar que assim como a USLE, a MUSLE é um modelo empírico e necessita da calibração de seus parâmetros a fim de representar as condições reais da área em estudo. Para tal, é necessária a aplicação de informações hidrológicas da

bacia na construção dos fatores da equação MUSLE através de interações de equações.

Para que a equação construída para a bacia hidrográfica seja validada, ou seja, exponha um resultado representativo e condizente com a realidade é preciso aplicar testes de validação como o proposto por Nash & Sutcliffe (1970), importante critério estatístico desenvolvido especialmente para avaliar modelos hidrológicos, e realizar campanhas amostrais a fim de comparar os dados coletados em campo com aqueles obtidos a partir da simulação pelo modelo matemático.

2.7 Aplicação de SIG à modelagem matemática

Na aplicação em modelos de erosão, um Sistema de Informações Geográficas (SIG) pode ser utilizado como suporte às análises permitindo sua espacialização (OLIVEIRA, 2011). Esta importante ferramenta é capaz de espacializar a análise das informações de maneira muito precisa e ágil. Assim, a utilização dos SIGs faz com que, apesar da heterogeneidade dos ambientes avaliados, seja possível realizar uma análise mais detalhada através da subdivisão da bacia para que a predominância e o nível de significância de cada fator sejam avaliados com a devida exatidão e em conformidade com a realidade ao serem associados aos modelos, permitem determinar a distribuição espacial do processo erosivo (BÜHLMANN et al., 2010; CEBECAUER & HOFIERKA, 2008; ERDOGAN et al., 2007; PATRICHE et al., 2006). Desta forma, a associação de modelos hidrossedimentológicos à técnicas de geoprocessamento permite simular a intensidade de ação dos principais fatores de influência nas perdas de solo e, assim simular o efeito de diversos cenários de uso e manejo do solo frente à perda efetiva de solos em bacias hidrográficas (PEREIRA et al., 2009).

3 Materiais e métodos

3.1 Localização da bacia experimental

Para o desenvolvimento do presente trabalho foram avaliados diversos parâmetros em uma pequena bacia hidrográfica denominada bacia do Arroio do Ouro, localizada na figura 1. Situada entre os limites dos municípios de Morro Redondo/RS e Pelotas/RS, a bacia experimental está distante 36km do campus Porto da Universidade Federal de Pelotas e é caracterizada como uma bacia rural, tendo como curso principal o Arroio do Ouro.

A região é caracterizada por relevos ondulados a suaves. Os solos predominantes na bacia são caracterizados como pouco profundos e pouco estruturados (BARTELS, 2015). Situada na região fisiográfica denominada Encosta do Sudeste e na região geomorfológica do Escudo Uruguaio-Sul-Rio-Grandense, a bacia experimental do Arroio do Ouro é contribuinte do Arroio Cadeia, cujo fluxo tem como destino o Arroio Pelotas. Essas águas são drenadas até a bacia Mirim-São Gonçalo, uma das principais bacias hidrográficas do Rio Grande do Sul, cuja extensão é de quase 26.000km² abrangendo nove municípios da região sul desse estado (SEMA, 2015).

Para a aplicação da Equação Universal de Perdas de Solo Modificada à bacia do Arroio do Ouro são necessários dados representativos da bacia hidrográfica. Tais dados foram obtidos a partir do estudo de dissertação conduzido por Bartels (2015) onde foram realizados monitoramentos hidrossedimentológicos na seção situada nas coordenadas 31°34'17" de latitude sul e 52°33'44" de longitude oeste. As principais informações utilizadas neste trabalho que estão disponibilizadas pelo referido autor são itens como precipitação, descarga líquida e descarga sólida.



Figura 1. Localização da bacia hidrográfica do Arroio do Ouro.

A bacia do Arroio do Ouro é representativa da região delimitada pela bacia do Pelotas e Bartels (2015) salienta que, em função de suas características geomorfológicas e de uso e ocupação do solo, pode ser referência na caracterização dos processos que originam perda de solo e a produção de sedimentos para a região. Dessa maneira, justifica-se a escolha da bacia do Arroio do Ouro em virtude de ser um local de fácil acesso, da reduzida área para aquisição de dados e monitoramento, da existência de estações de monitoramento de parâmetros hidrológicos e, principalmente, da representatividade que a região possui da bacia do arroio Pelotas.

Cabe salientar que maiores informações sobre as características da área de estudo estão relatadas no trabalho de Bartels (2015) e podem lá ser obtidas.

3.2 Modelagem matemática aplicada à bacia do Arroio do Ouro

A Equação Universal de Perdas de Solo – USLE é um dos principais modelos estimadores de erosão. O referido modelo matemático é expresso pela seguinte equação:

$$PS = R \times K \times L \times S \times C \times P \quad (1)$$

Onde:

PS = perda de solo por área(t ha⁻¹ ano⁻¹);

R = erosividade da chuva (MJ mm ha⁻¹ h⁻¹);

K = erodibilidade do solo [t ha⁻¹ (MJ ha⁻¹ mm h⁻¹)⁻¹];

L = fator comprimento de rampa (adimensional);

S = grau de declive, baseado nos valores em porcentagem da declividade (adimensional);

C = fator uso e manejo do solo (adimensional);

P = fator práticas conservacionistas (adimensional).

Esta equação fundamentou a construção de diversos outros modelos estimadores de perdas de solo, entre eles a MUSLE. Largamente usada para estimar o aporte de sedimento em pequenas bacias hidrográficas, a MUSLE tem sido alterada para se adaptar a regiões com características distintas das bacias utilizadas para sua formulação (SADEGHI et al., 2007).

Os parâmetros da MUSLE podem ser encontrados na USLE e suas metodologias de cálculo são semelhantes, exceto os fatores Q, q_p, e os coeficientes a e b, que substituíram o fator R. Estas diferenças surgem a partir da premissa da MUSLE em estimar a produção de sedimentos para bacias hidrográficas, enquanto que a USLE é projetada para a predição da média anual de perda de solo causada por erosão laminar.

O fator R, que representa o potencial erosivo médio das chuvas de uma região, tomados como base períodos de 20 a 30 anos de dados pluviográficos Wischmeier (1959), foi substituído na MUSLE pelos fatores Q, q_p e coeficientes a e b. Desta forma seria possível representar adequadamente eventos de precipitação isolados e assim construir uma estimativa mais representativa dos processos que levam à produção de sedimentos que ocorrem em escala de bacia hidrográfica.

A MUSLE é dada pela seguinte equação:

$$Y = a \times (Q \times q_p)^b \times K \times LS \times C \times P \quad (2)$$

Onde:

Y = aporte de sedimento em um determinado evento (toneladas);

a e b = coeficientes de ajuste (adimensionais);

Q = volume de escoamento superficial do evento (m³);

q_p = é a vazão de pico do evento (m³ s⁻¹);

K = erodibilidade média dos solos da bacia (t h MJ⁻¹ mm⁻¹);

C = fator médio de uso e manejo do solo da bacia (adimensional);

LS = fator de comprimento de rampa e declividade das vertentes da bacia (adimensional);

P = fator de práticas conservacionistas (adimensional).

3.2.1 Fator K

Este é o fator que representa a erodibilidade do solo, ou seja, sua susceptibilidade à erosão (FREIRE et al., 1992). O fator K varia conforme as propriedades texturais, físico-químicas e estruturais do solo. Kinell (1994) ressaltou que a textura do solo como fator importante que influencia a erosão do solo por interferir nos processos de desagregação e transporte, ao passo que enquanto grandes partículas de areia são mais resistentes ao transporte, solos cujo teor de argila é mais elevado resistem à desagregação, sendo a areia fina e o silte as texturas consideradas mais suscetíveis à desagregação e ao transporte. Assim, é comum observar em diversos trabalhos acadêmicos a busca de uma relação entre o fator K e propriedades do solo. Ainda que complexas, a busca por estas relações se dá em função da morosidade da medição do fator K diretamente através de parcelas experimentais, além de esta ser dispendiosa.

O cálculo da erodibilidade dos solos (K) neste trabalho foi baseado na equação (3), desenvolvida por Roloff e Denardin (1994), onde são utilizados

apenas parâmetros físicos do solo como percentagem de silte, areia fina e permeabilidade codificada por Wischmeier et al. (1971). Através desta equação é possível identificar locais cuja suscetibilidade à erosão é maior utilizando como parâmetros os percentuais de areia fina e silte, além da permeabilidade. Estes parâmetros são capazes de esclarecer em parte a capacidade de resistência do solo frente aos processos erosivos.

$$K = 0,0049 \times P + 0,0000331 \times Mm^{0,5} \quad (3)$$

Onde:

K = erodibilidade média dos solos da bacia ($t h MJ^{-1} mm^{-1}$);

P = Fator de estrutura e permeabilidade do solo (adimensional);

Mm = teor de silte ($g kg^{-1}$) multiplicado pela soma de silte e areia fina ($g kg^{-1}$), sendo a análise granulométrica feita utilizando-se NaOH $1 mol L^{-1}$.

3.2.2 Fator LS

Os fatores L e S expressam o comprimento de vertentes e o grau de declive, respectivamente. Correa e Sanjos Pinto (2012) salientam que o fator L possui elevada importância na perda de solo, pois sua extensão influencia diretamente na velocidade do escoamento superficial. Igualmente, o volume e a velocidade das enxurradas estão da mesma forma relacionadas ao grau de declividade do terreno, ou seja, são diretamente proporcionais (BERTONI & LOMBARDI NETO, 2010).

A metodologia de cálculo utilizada para a obtenção do fator comprimento de encostas (L) da bacia do Arroio do Ouro foi proposta por Desmet & Govers (1996). A equação 4 proposta pelos autores é considerada como adequada para a estimativa desse fator para o presente estudo, pois atrela o conceito de fluxo acumulado de drenagem a montante da célula avaliada caracterizando assim melhor uma bacia hidrográfica e associando o uso de SIG.

$$L_{ij} = \frac{(A_{ij} + D_{ij}^2)^{m+1} - A_{ij}^{m+1}}{D^{m+2} \times (\text{sen}\theta_{ij} + \text{cos}\theta_{ij})^m \times 22,13^m} \quad (4)$$

Onde:

L = comprimento da encosta (m);

A = área de fluxo acumulado (m²);

ij = coordenadas da célula que a localiza no mapa da bacia;

D = resolução da grade de células (m);

m = expoente do comprimento de encostas (adimensional);

θ = declividade média da vertente (m/m).

O fator de declividade (S) foi calculado segundo a metodologia de Wischmeier & Smith (1978):

$$S = 0,00654 \times s^2 + 0,0456 \times S + 0,065 \quad (5)$$

Onde:

S = Fator de declividade (adimensional);

s = Declividade média da vertente (%).

3.2.3 Fator C

O fator de uso e manejo do solo é a relação esperada entre as perdas de solo em um terreno cultivado em condições específicas e em um terreno continuamente desprotegido. O valor adotado está relacionado ao tipo de cultura e manejo adotados, a quantidade de chuvas, a fase do ciclo vegetativo, entre outras variáveis, cujas combinações apresentam diferentes efeitos na perda de solo (BERTONI & LOMBARDI NETO, 2010). Tormena et al. (1998) citam que a estrutura do solo pode ser modificada através de práticas de manejo, onde estas atuam modificando a produtividade das culturas por meio de alterações na oferta de água, na propagação de oxigênio e na resistência do solo à penetração das raízes.

Para a determinação do fator C na bacia do Arroio do Ouro foram utilizados os valores contidos na tabela 1, na qual foram agrupadas diferentes bibliografias com valores para diversas culturas e usos do solo presentes na área, com base no mapeamento realizado por BARTELS, 2015.

Tabela 1 – Valores do fator C para diferentes usos do solo e culturas utilizados na modelagem para a bacia do Arroio do Ouro.

Uso do Solo	Fator C	Autor
Água	0,000	Silva (2004)
Campo nativo	0,042	Farinasso et al. (2006)
Construções	0,001	Farinasso et al. (2006)
Cultura anual	0,20	Brito et al. (1998)
Estradas	1	Avanzi, et al. (2008)
Fruticultura	0,01	Tomazoni et al (2005)
Mata cultivada	0,03	Silva (2007)
Mata nativa	0,012	Farinasso et al. (2006)

3.2.4 Fator P

O fator P aborda o impacto de práticas conservacionistas em relação às perdas de solo. Trata-se da relação entre a intensidade esperada de perda de solo com determinada prática conservacionista ou quando a cultura está disposta no sentido do declive. Uma área sem cobertura vegetal é geralmente mais suscetível à erosão do que aquela recoberta por vegetação, considerando ainda que o seu efeito dependerá do tipo e fase do crescimento da vegetação associada à sequência de culturas e ao manejo (BERTONI & LOMBARDI NETO, 2010). As práticas conservacionistas mais comuns para as culturas anuais são o plantio em contorno, plantio em faixas de contorno, terraceamento e alternância de capinas (WISCHMEIER & SMITH, 1978).

Os valores de P aplicados neste trabalho foram obtidos através da formulação desenvolvida por Bertoni e Lombardi Neto (2010), onde a declividade é considerada como fator determinante para as práticas de manejo conservacionistas. O valor de P para o plantio em nível é determinado em função da declividade (D), conforme a equação 6 (para D entre 0,5 a 20%).

Para declividades menores que 0,5% foi assumido o valor de $P=0,6$ e para declividades maiores que 20% o valor fixado foi de $P=1$.

$$P = 0,069947 - 0,08911 \times D + 0,01184 \times D^2 - 0,000335 \times D^3 \quad (6)$$

Onde:

P = fator práticas conservacionistas (adimensional);

D = declividade quando situada entre 0,5% a 20%.

3.2.5 Fatores Q e q_p

O fator Q representa o volume de escoamento superficial (m^3) e o fator q_p representa a vazão de pico gerada pelo evento de precipitação avaliado ($m^3 s^{-1}$). Desta forma é necessário o monitoramento da vazão no corpo hídrico (hidrograma) ao mesmo tempo em que monitora-se a precipitação (hietograma) para possibilitar a identificação dessas variáveis. De posse dessas informações é possível realizar a separação do escoamento para obter a vazão referente ao escoamento superficial direto gerado pelo evento, além da vazão de pico atingida. Bartels (2015) monitorou diversos eventos de precipitação, dos quais foram selecionados treze (13) eventos para serem avaliados neste estudo, conforme a figura 2 exhibe.

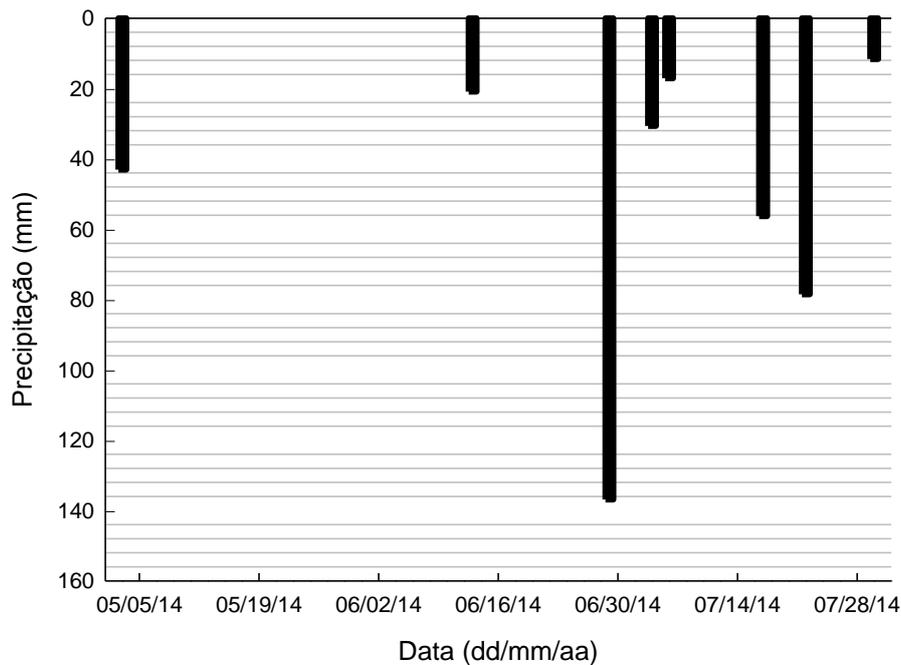


Figura 2. Precipitações dos treze eventos selecionados para aplicação da equação MUSLE à bacia do Arroio do Ouro.

Para efetuar a separação do escoamento superficial direto foi utilizada a metodologia gráfica baseada nas inflexões de A e C do hidrograma obtido durante o evento de precipitação. Esta é uma das metodologias mais utilizadas quando existem dados observados e é de fácil aplicação.

O procedimento consiste na observação de uma hidrógrafa isolada e definição dos pontos A e C levando em conta a linearidade do escoamento de base e considerando a inclinação da reta AC. Após definidos os pontos A e C deve ser traçado um segmento de reta unindo ambos os pontos. O deflúvio na parte superior do segmento corresponde ao escoamento superficial e aquele situado na parte inferior representa o escoamento de base, conforme demonstrado pela figura 3.

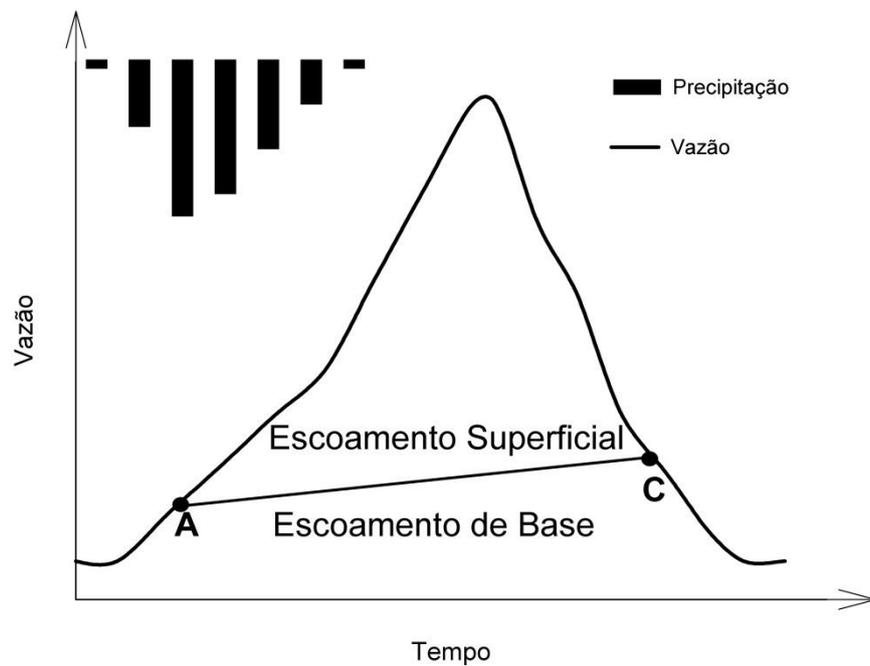


Figura 3. Método gráfico da separação do escoamento a partir de uma hidrógrafa isolada.

Onde:

A = Início da separação do escoamento;

C = Fim da separação do escoamento.

Para efetuar o cálculo do volume do escoamento superficial direto, a fração determinada como escoamento superficial deverá ser separada com base no método dos trapézios, conforme demonstra a figura abaixo:

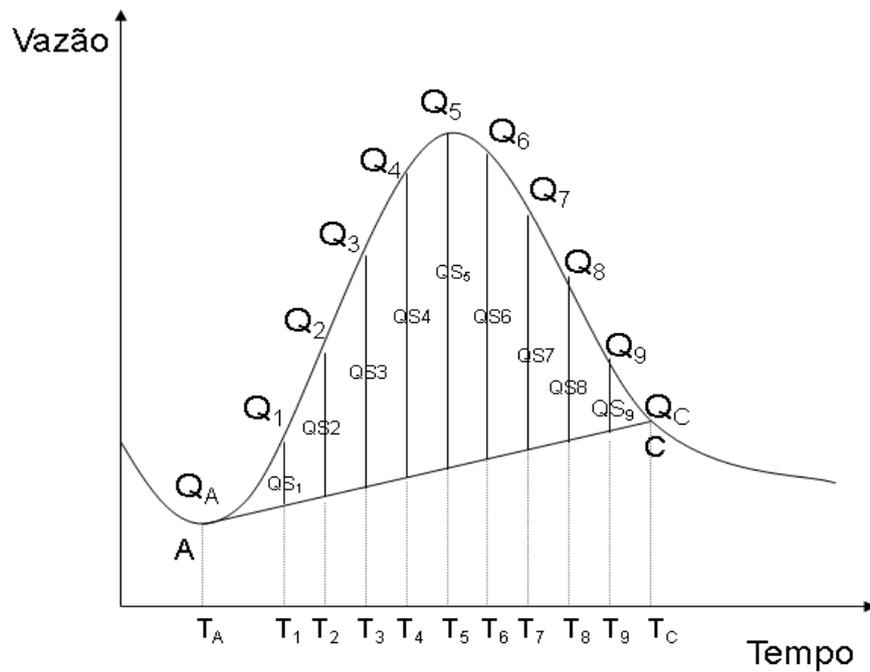


Figura 4. Método dos trapézios para o cálculo do volume escoado superficialmente.

Onde:

Q_n = Vazão total;

Q_{Sn} = Vazão superficial;

T_n = Intervalo de tempo;

A = Início da separação do escoamento;

C = Fim da separação do escoamento;

T_A = Tempo de início do escoamento superficial;

T_C = Tempo de término do escoamento superficial;

Feita a divisão acima, deverá ser aplicada a equação 7 aos valores de vazão superficial para que seja obtido o volume escoado superficialmente, ou seja, o fator Q presente no modelo matemático MUSLE.

$$ESD = \frac{(Q_{S1} \times \Delta t)}{2} + \frac{(Q_{S1} + Q_{S2})}{2} \times \Delta t + \frac{(Q_{S2} + Q_{Sn})}{2} \times \Delta t \quad (7)$$

Onde:

ESD = volume escoado superficialmente;

Q_{Sn} = vazão de escoamento superficial;

Δt = intervalo de tempo;

A vazão de pico do evento pode ser facilmente determinada considerando que os eventos foram monitorados. Desta forma, a vazão de pico corresponde ao ponto situado no extremo superior da hidrógrafa.

3.2.6 Coeficientes *a* e *b*

Na MUSLE original, os coeficientes da equação 2 são $a = 89,6$ e $b = 0,56$ (WILLIAMS, 1975). Entretanto, estes coeficientes podem variar em função das condições fisiográficas e hidrológicas das bacias, uma vez que a relação de aporte de sedimentos, que é a razão entre o aporte de sedimento e a erosão total na bacia, é muito variável (SADEGHI et al., 2007; CHAVES, 2010). Odongo et al. (2013) mostraram, estudando a influência dos fatores da MUSLE, que aqueles cuja maior interferência nos resultados do modelo foi constatada foram os coeficientes *a* e *b*, contribuindo com cerca de 66% da variabilidade da produção de sedimentos, evidência também levantada por Chaves (1991).

Estes coeficientes são considerados os fatores mais sensíveis da MUSLE na estimativa da produção de sedimentos e seu cálculo é realizado através de regressão linear (AVANZI et al., 2008) segundo a equação 8, introduzida por (JOHNSON et al., 1985).

$$Z = aX^b \quad (8)$$

Onde:

$$Z_{\text{cal}} = \frac{Y}{K \times LS \times C \times P} \quad (9)$$

$$X = (Q \times q_p) \quad (10)$$

3.2.7 Calibração da MUSLE

A calibração dos coeficientes a e b foi realizada com base nos dados obtidos a partir do monitoramento dos eventos hidrossedimentológicos (volume de escoamento superficial, vazão de pico). O procedimento consistiu na estimativa dos parâmetros a e b com base na linearização da equação 8 utilizando 2/3 (9 eventos) dos dados de monitoramento (AVANZI, 2005). A composição do conjunto amostral dos nove (9) eventos para a calibração dos parâmetros foi realizada de modo a contemplar a faixa de variação do aporte de sedimentos observada na bacia do Arroio do Ouro. Os eventos foram selecionados da referida maneira em função da grande probabilidade de eventos não monitorados se enquadrarem na faixa daqueles elencados, o que permitirá um melhor ajuste do modelo.

Além disso, foram aplicados os coeficientes a e b originalmente propostos por Williams (1975) para a equação MUSLE a fim de comparar o nível de discrepância na estimativa do aporte de sedimentos sem o ajuste desses coeficientes.

3.2.8 Validação da MUSLE

A validação do modelo foi realizada através da comparação entre o aporte de sedimentos calculado pela MUSLE e o aporte obtido nas medições em campo para os eventos não utilizados na calibração do modelo. Para proceder à validação do modelo foram adotadas duas metodologias:

O primeiro teste de validação foi realizado segundo o coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS) (Nash & Sutcliffe, 1970), dado pela equação 11. O coeficiente de Nash é um importante critério estatístico e um dos mais utilizados na avaliação da precisão de modelos hidrológicos. O coeficiente NS varia de $-\infty$ até 1, onde quanto mais próximo da unidade, melhor é a representação dos dados apresentada pelo modelo. O desempenho de um modelo matemático é considerado adequado e bom se o valor de NS superar

0,75, e considerado aceitável se o valor de NS estiver compreendido pelo intervalo de 0,36 a 0,75 (COLLISCHONN, 2001; SANTOS et al., 2014). Esse coeficiente pode ser entendido como o coeficiente R^2 , entretanto pelo fato de ter sido especificamente desenvolvido para avaliar correlações hidrológicas, é considerado mais confiável para esta aplicação (SILVA, 2010).

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_{obs} - Y_{est})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_{est} - \bar{Y})^2} \quad (11)$$

Onde:

NS = coeficiente de Nash-Sutcliffe;

Y_{obs} = aporte de sedimentos observado (toneladas);

Y_{est} = aporte de sedimentos estimado (toneladas);

\bar{Y} = aporte de sedimentos médio observado (toneladas);

n = número eventos observados.

Cabe salientar ainda que foi observada a dispersão e também o erro, em termos percentuais, entre os dados simulados e os dados monitorados a campo.

3.3 Uso da ferramenta SIG

De modo a espacializar a aplicação da equação MUSLE para toda a extensão da bacia hidrográfica do Arroio do Ouro foi utilizado o software “ArcGIS”. A partir da inserção de informações referentes a curvas de nível, hidrografia e pontos cotados oriundos da base cartográfica do Rio Grande do Sul em escala 1:50.000 neste programa computacional foi possível criar informações para os 17,17 km² da bacia.

Inicialmente foi gerado um modelo de elevação digital para então proceder à delimitação da bacia hidrográfica. De posse dessas informações foi

possível trabalhar as camadas de informações geradas com as equações definidas para os fatores da equação MUSLE e então obter detalhadamente cada fator de maneira especializada (por pixel) para a bacia.

3.3.1 Obtenção do Modelo Digital de Elevação

O modelo digital de elevação (MDE) é uma representação matemática computacional da distribuição das elevações de uma determinada paisagem, representando assim as variações de altitude desta região. Utilizando o *software "ArcGIS"* foi gerado um MDE para a região da bacia hidrográfica do Arroio do Ouro, conforme os cinco passos a seguir:

1 – Importação de curvas de nível, hidrografia e pontos cotados para o *software "ArcGIS"*;

2 – Recorte das camadas inseridas no passo 1 da área de interesse a partir de um polígono (de área superior àquela correspondente a da bacia do Arroio do Ouro) através da ferramenta "*clip*";

4 – Através da ferramenta "*Topo to Raster*" (*Arctoolbox -> Spatial Analyst tools -> Interpolation -> Topo to Raster*) foi gerado o MDE, resultando em uma imagem "*raster*" cuja resolução das células foi definida para o tamanho de 30 x 30 metros (em função de ser a máxima resolução permitida pela fonte dos dados);

5 – Para correção de imperfeições no modelo gerado este foi tratado através da ferramenta "*fill*" (*Arctoolbox -> Spatial Analyst tools-> Hydrology -> Fill*).

3.3.2 Delimitação da bacia do Arroio do Ouro

Para a delimitação da bacia hidrográfica do Arroio do Ouro através do *software "ArcGIS"* foi necessário primeiramente obter informações referentes a direção do fluxo ("*Flow direction*") e acumulação do fluxo ("*Flow accumulation*")

na região de interesse para então proceder à delimitação da bacia através da ferramenta “*Watershed*” com base no exutório da mesma. A seguir são descritos em detalhes as ferramentas e rotinas utilizadas para a delimitação da bacia do Arroio do Ouro:

A ferramenta “*Flow direction*” (*Spatial Analyst Tool -> Hidrology -> Flow Direction*) indica o caminho preferencial de um corpo hídrico em função da declividade do terreno com base no MDE gerado anteriormente. Ao comparar o valor determinado com as células vizinhas esta rotina adota a direção onde prevalece a maior declividade.

O procedimento “*Flow accumulation*” (*Spatial Analyst Tool -> Hidrology -> Flow Accumulation*) determina quais células recebem fluxo de água e em qual magnitude a partir da utilização das informações obtidas pela rotina direção de fluxo, resultando na acumulação do fluxo.

A ferramenta “*Watershed*” (*Spatial Analyst tools -> Hidrology -> Watershed*) interpreta as informações geradas pela direção de fluxo delimitando então a bacia hidrográfica em função de um ponto de referência: o exutório da bacia.

A partir deste último procedimento foi obtida a bacia hidrográfica do Arroio do Ouro expressa por 19088 pixels, onde cada pixel representa uma área de 30 metros por 30 metros, ou seja, uma área de 900m².

3.3.3 Cálculo dos fatores da equação MUSLE

Para cada um dos 19088 pixels componentes da bacia do Arroio do Ouro foram calculados os valores dos fatores K, LS, C e P descritos a seguir.

3.3.4 Fator K

O fator K construído para a bacia hidrográfica do Arroio do Ouro foi obtido através de comunicação pessoal com o autor Bartels (2015a). Tal

informação integra um estudo em que o referido autor trabalhou e para o qual existe um artigo em vias de publicação.

3.3.5 Fator LS

Para a determinação do fator LS foi utilizada a ferramenta “*Raster calculator*” (*Spatial Analyst tools* -> *Surface analysis* -> *Raster calculator*) onde foram construídas expressões matemáticas conforme as equações 4 (para a obtenção do fator L) e 5 (para a obtenção do fator S). Cabe salientar que todas as informações inseridas em graus foram convertidas em radianos, em função do programa “*ArcGIS*” trabalhar apenas com esta unidade.

3.3.6 Fator C

O fator de uso e manejo do solo para a bacia do Arroio do Ouro foi determinado a partir da observação de imagens de satélite e classificação manual dos usos do solo pela construção de polígonos indicando as categorias citadas no item 3.4.3. Posteriormente, os dados foram importados para o programa “*ArcGIS*” onde realizou-se a união dos polígonos com precisão a fim de evitar lacunas. O passo seguinte foi o processamento das informações para a indexação aos pixels dos valores atribuídos na classificação.

3.3.7 Fator P

O fator de práticas conservacionistas foi determinado a partir do mapa de declividades da bacia, que já fora obtido para o cálculo de outros fatores, no qual foram atribuídos os valores mencionados no item 3.4.4 conforme a declividade encontrada. Para as declividades situadas entre 0,5 % e 20% foi

utilizada a ferramenta “*Raster calculator*” (*Spatial Analyst tools* -> *Surface analysis* -> *Raster calculator*) onde foi construída expressão matemática conforme a equação 6 para a obtenção do valor referente a P.

4 Resultados

4.1 Fatores MUSLE

Para cada um dos 19088 pixels componentes da bacia do Arroio do Ouro foram calculados os valores dos fatores K, LS, C e P através dos procedimentos descritos no item 3.2.

Através da análise espacial tornou-se possível exibir no formato de mapa a distribuição dos valores associados a cada fator avaliado dentro da bacia do Arroio do Ouro.

A figura 5 apresenta o mapa de erodibilidade construído a partir das análises desenvolvidas com o uso da ferramenta SIG. A partir da observação da figura abaixo se pode inferir que a área com maior concentração da coloração azul reflete o local com maior potencial de erosão e produção de sedimentos, entretanto não é possível afirmar que esta é a área onde ocorre de fato mais erosão. Além disso, ainda é possível inferir sobre a possibilidade deste local possuir solos cuja textura predominante é composta por areia fina e silte ou menor permeabilidade, pois estes são os parâmetros mais importantes para a quantificação do fator K através da equação 3.

O valor médio de erodibilidade dos solos da bacia do Arroio do Ouro foi determinado em $0,016 \text{ t h MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$.

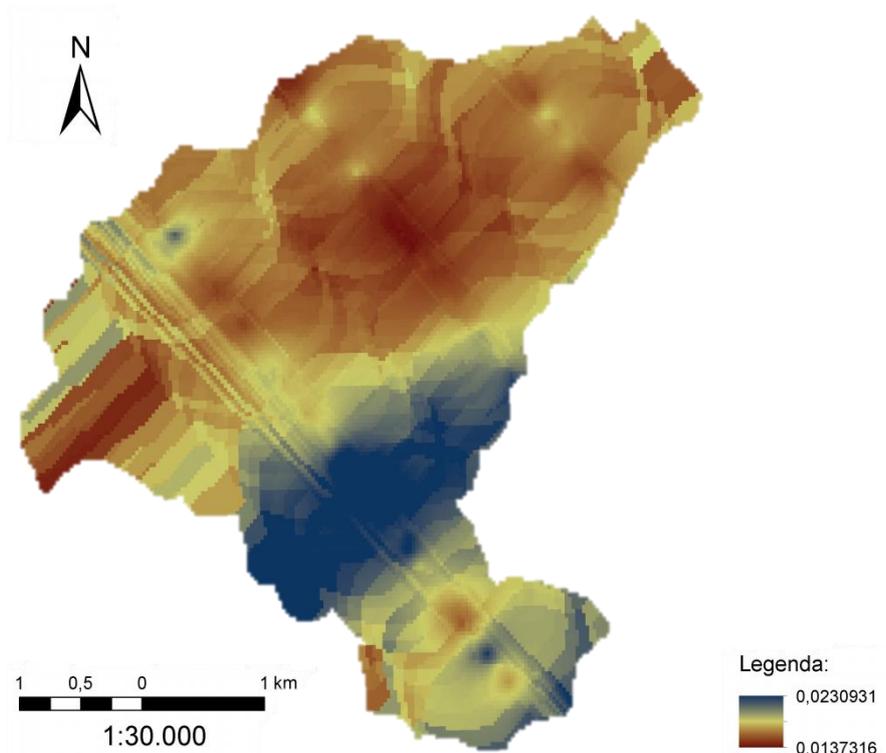


Figura 5. Mapa da erodibilidade dos solos da bacia do Arroio do Ouro ($t h MJ^{-1} mm^{-1}$).

Os mapas apresentados nas figuras 6 e 7 representam o comprimento de encostas, ou seja, o fator L na bacia do Arroio do Ouro e o fator declividade das vertentes (S), respectivamente. É possível observar na figura 6 que os pontos mais claros são aqueles cujo comprimento de encostas é maior, enquanto que tons escuros representam comprimentos de encostas menores. Já na figura 7, fica caracterizada a maior influência do fator S na porção norte do mapa e em menor escala na área próxima ao limite sul da bacia.

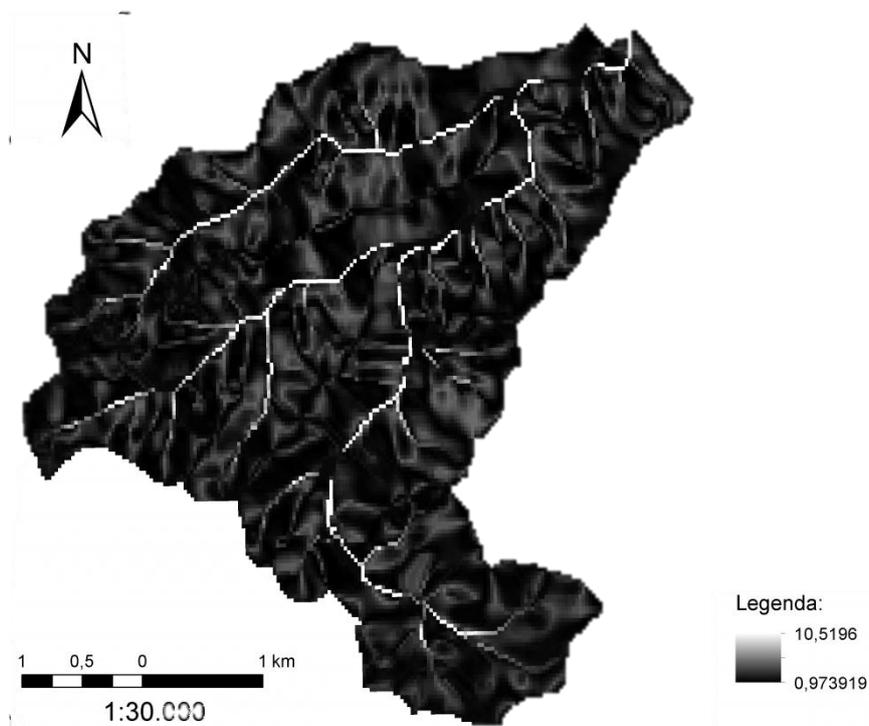


Figura 6. Mapa do fator comprimento de encostas da bacia do Arroio do Ouro.

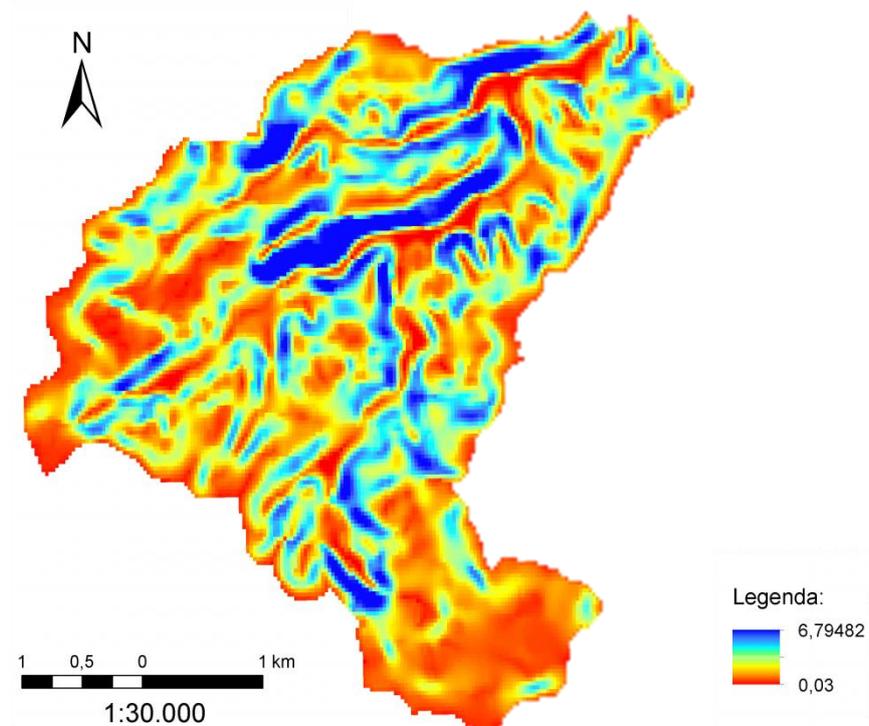


Figura 7. Mapa do fator declividade das vertentes da bacia do Arroio do Ouro.

O mapa do fator de uso e manejo do solo apresentado na figura abaixo caracteriza a predominância de áreas com algum tipo de cobertura vegetal na

bacia, o que a torna mais resistente à ação dos eventos de chuva e consequentemente à ação dos processos erosivos.

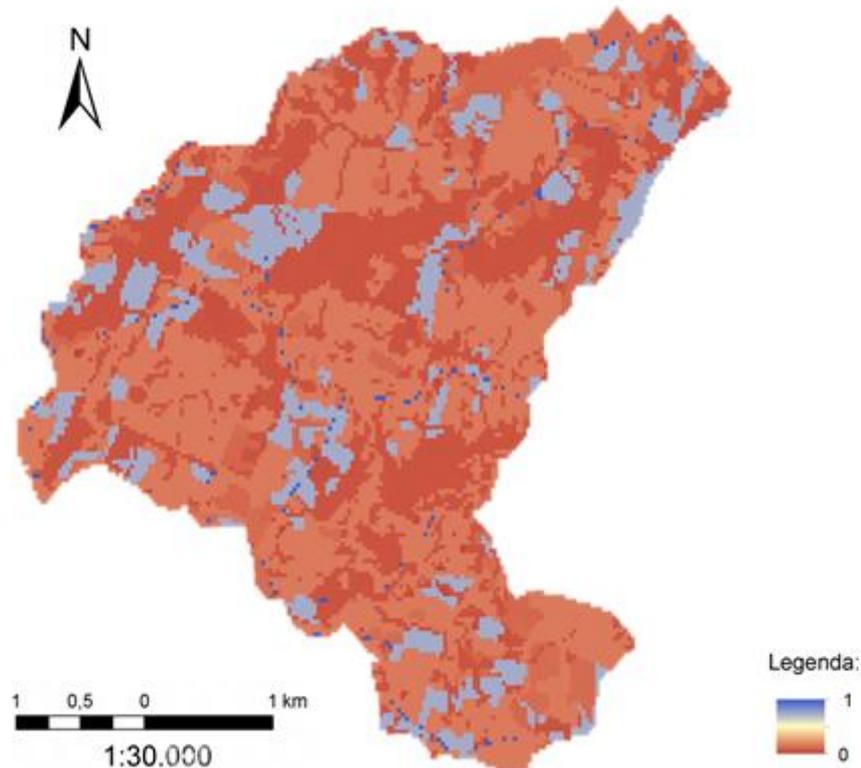


Figura 8. Mapa do fator de uso e manejo do solo da bacia do Arroio do Ouro.

A figura 9 mostra a distribuição dos valores associados às práticas conservacionistas ao longo de toda a bacia do Arroio do Ouro. É possível verificar que em alguns pontos esparsos no mapa são adotadas práticas totalmente inadequadas de conservação do solo (indicadas pelos tons de vermelho). Entretanto, na maior parte da bacia são adotadas práticas menos prejudiciais à conservação do solo (simbolizadas pelos tons em azul). O fator P médio (0,76) obtido através do cálculo entre todos os pixels evidenciou um valor 25% menor se comparado ao valor tradicionalmente aplicado a este fator (1). Desta forma, fica clara a importância da estimativa do fator P, principalmente em áreas onde são desenvolvidas práticas agrícolas, para que os dados resultantes não sejam influenciados por valores superestimados.

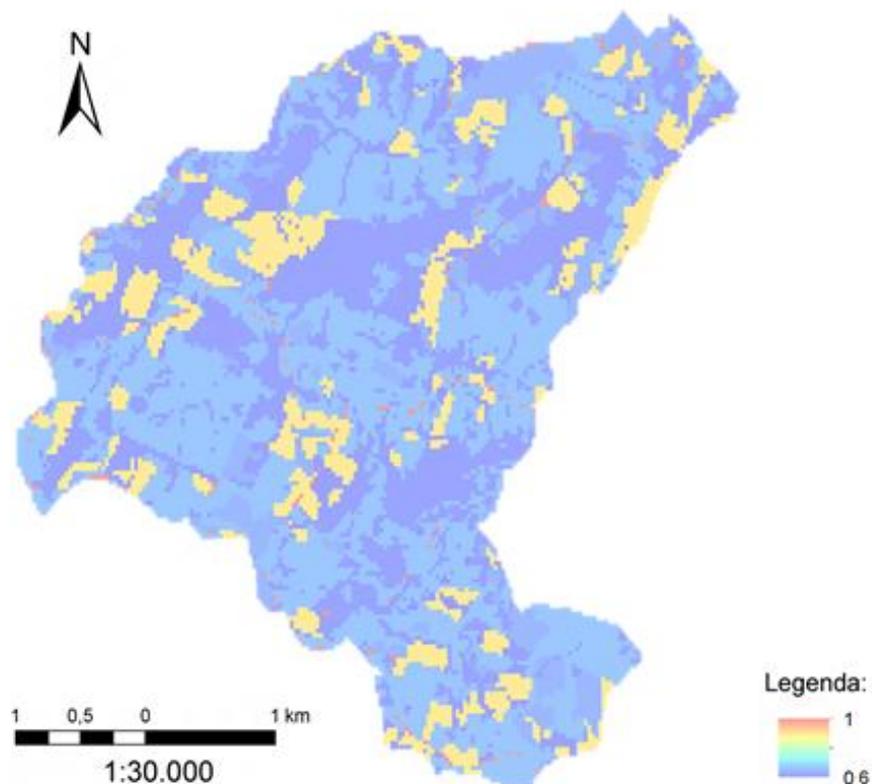


Figura 9. Mapa de distribuição das práticas conservacionistas na bacia do arroio do Ouro.

Definiu-se a média individual de cada conjunto (K, LS, C e P) de valores de pixels como representativa da totalidade da bacia. Desta forma, foram obtidos os fatores K, LS, C e P descritos na tabela 2 para a bacia do Arroio do Ouro.

Tabela 2 – Fatores K, LS, C e P definidos para a bacia do Arroio do Ouro.

Fator K	Fator LS	Fator C	Fator P
0,016	2,100	0,060	0,760

4.2 Análise do comportamento hidrossedimentológico

4.2.1 Calibração dos coeficientes *a* e *b*

Os parâmetros estabelecidos foram definidos em função de expressarem a menor diferença absoluta entre o somatório das variáveis Z (equações 8 e 10) e Z_{cal} (equação 9). A calibração dos parâmetros a e b foi realizada através da aplicação do software *Microsoft Excel* e de sua ferramenta *Solver*. Através da utilização desta rotina foram obtidos os parâmetros a e b que melhor expressam a simulação de nove eventos monitorados (2/3 do total de eventos observados) demonstrados na tabela abaixo.

Tabela 3 – Calibração dos parâmetros a e b para a bacia do Arroio do Ouro.

Evento	X	Z	Zcal	a	b
1	911529,8	67446,10917	33952,91992	0,511879	0,809043
2	69353,05	9465,36769	4224,70798		
3	46931881	836506,32708	823594,24370		
4	1814161	74477,94125	59252,15232		
5	605399,7	18900,07226	24382,99389		
6	-	-	-		
7	10407279	177391,28234	243496,95942		
8	26118,82	1251,45860	1917,21993		
9	-	-	-		
10	-	-	-		
11	-	-	-		
12	18569,42	1453,01105	1454,81569		
13	4023773	118259,64596	112875,20257		
SOMA		1305151	1305151		
Diferença Absoluta		2,32831E-09			

Onde:

Z = equação 8;

Z_{cal} = equação 9;

X = equação 10;

a e b = coeficientes adimensionais.

4.2.2 Equação MUSLE calibrada e original

A equação MUSLE para a bacia do Arroio do Ouro com seus coeficientes calibrados foi definida da seguinte forma:

$$Y = 0,511(Q \times q_p)^{0,809} \times 0,016 \times 2,100 \times 0,060 \times 0,760 \quad (12)$$

Onde:

Q = Volume escoado superficialmente (m^3);

q_p = Vazão de pico do evento (m^3/s).

Já a equação MUSLE para a bacia do Arroio do Ouro com seus coeficientes originais possui a seguinte forma:

$$Y = 89,6(Q \times q_p)^{0,56} \times 0,016 \times 2,100 \times 0,060 \times 0,760 \quad (13)$$

Onde:

Q = Volume escoado superficialmente (m^3);

q_p = Vazão de pico do evento (m^3/s).

É notável a discrepância entre os valores originais dos parâmetros a e b da equação em relação aos calibrados para a bacia do Arroio do Ouro. O coeficiente b calibrado é aquele que mais se aproxima de seu valor original.

Para verificar a precisão dos resultados obtidos foram estimados a produção de sedimentos de eventos monitorados na bacia com o uso das equações 12 e 13 na intenção de comparar a precisão dos resultados fornecidos e validá-las ou não.

4.2.3 Validação do modelo MUSLE para a bacia do Arroio do Ouro

A validação do modelo calibrado para a bacia do Arroio do Ouro é uma avaliação imprescindível para verificar a consistência e precisão dos dados resultantes da modelagem quando comparados com os dados observados. Para tal foram comparadas as estimativas geradas pelo modelo, assim como calculado o fator de Nash-Sutcliffe.

4.2.3.1 Estimativa da produção de sedimentos na bacia do Ouro

A estimativa da produção de sedimentos para a bacia do Arroio do Ouro fornecida pela equação MUSLE com seus coeficientes originais é exibida pela figura 10 em um comparativo com os dados medidos em campo. É possível inferir que os coeficientes originais causam uma superestimativa da produção de sedimentos para a bacia em estudo. Cabe salientar que os eventos de precipitação nove (9) e dez (10) resultaram nos aportes de sedimentos mais superestimados, atingido mais 1000%, conforme indica a tabela 9.

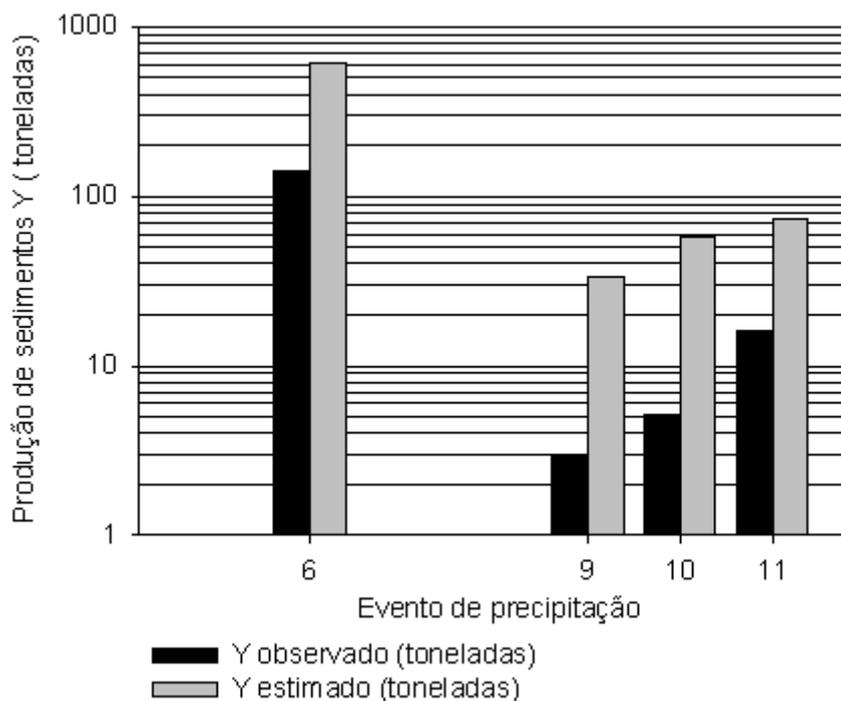


Figura 10. Aporte de sedimentos observados em campo e estimados pela MUSLE com seus coeficientes originais.

Tabela 4 – Aporte de sedimentos observados em campos e simulados pela MUSLE com coeficientes originais.

Evento	Y observado (toneladas)	Y estimado (toneladas)	Erro (%)
6	139,870	610,873	337
9	2,889	33,719	1067
10	5,142	57,536	1019
11	15,926	73,083	359

Já a estimativa da produção de sedimentos dada pela equação MUSLE com seus coeficientes calibrados, exibido pela figura 11, mostra um cenário bastante diferente. Fica evidente a proximidade dos dados simulados com os dados medidos em campo onde o máximo erro atingido através da comparação com o terço de dados que não integrou a calibração do modelo foi de 58%. Entretanto, apesar da proximidade verificada entre os valores estimados e monitorados, cabe salientar que o modelo subestimou 80% dos dados utilizados para a validação da equação.

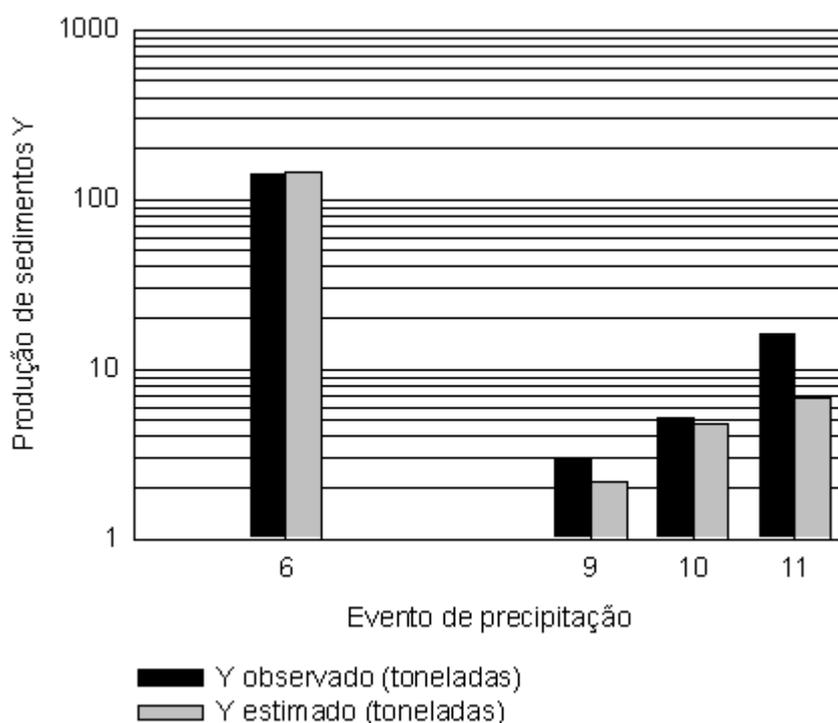


Figura 11. Aporte de sedimentos observados em campo e estimados pela MUSLE com seus coeficientes calibrados.

Tabela 5 – Aporte de sedimentos observados em campo e simulados pela MUSLE com coeficientes calibrados.

Evento	Y observado (toneladas)	Y estimado (toneladas)	Erro (%)
6	139,870	143,661	2,71
9	2,889	2,187	24,32
10	5,142	4,732	7,97
11	15,926	6,685	58,02

4.2.3.2 Análise do coeficiente de Nash-Sutcliffe

Ao avaliar o coeficiente de Nash determinado para o modelo MUSLE com seus coeficientes originais fica clara a inconsistência das informações geradas. O índice de eficiência de Nash atingido pelo modelo foi inferior ao valor mínimo (0,36) para que o mesmo seja considerado aceitável, conforme a tabela abaixo. Desta forma, levando em conta que os dados monitorados foram obtidos através de práticas corretas e de acordo com as metodologias recomendadas, é possível inferir que o modelo MUSLE com coeficientes não calibrados não gera resultados confiáveis para a bacia do Arroio do Ouro.

Tabela 6 – Coeficiente Nash-Sutcliffe para MUSLE sem coeficientes calibrados para a bacia do Arroio do Ouro.

Evento	(Y observado – Y estimado)²	(Y estimado – Y médio observado)²
6	221844,2479	324804,8021
9	950,4482	52,3927
10	2745,1620	274,8801
11	3266,9160	1032,0995
Σ	228806,7742	326164,1744
NS		0,298

Já o coeficiente de Nash, exibido na tabela abaixo, obtido para o modelo com coeficientes calibrados situa-se na faixa extremamente próxima à da unidade, o que garante a veracidade das informações obtidas e demonstra uma grande confiabilidade para a utilização dos mesmos.

Tabela 7 – Coeficiente Nash-Sutcliffe para MUSLE com coeficientes calibrados para a bacia do Arroio do Ouro.

Evento	(Y observado – Y estimado)²	(Y estimado – Y médio observado)²
6	14,3731	10548,1594
9	0,4936	1503,1296
10	0,1681	1312,2357
11	85,3952	1174,5418
Σ	100,4301	14538,0665
NS		0,993

4 Conclusão

O modelo MUSLE aplicado à bacia do Arroio do Ouro, sem a calibração de seus parâmetros a e b , superestima a produção de sedimentos;

O modelo MUSLE representa a produção de sedimentos da bacia hidrográfica do Arroio do Ouro mediante a utilização de características determinadas na própria bacia e a calibração de seus coeficientes;

A calibração dos coeficientes a e b da equação MUSLE tornou-a capaz de representar adequadamente o aporte de sedimentos na bacia do Arroio do Ouro, com índice de eficiência NS igual a 0,99;

A utilização de ferramentas de análise geoespacial (SIG) juntamente ao modelo matemático MUSLE permite a construção de predições de perda de solos consistentes.

5 Referências Bibliográficas

- AVANZI, Júnior César. **Modelagem do escoamento superficial e erosão hídrica em uma microbacia hidrográfica na região dos Tabuleiros Costeiros**. 2005. 68 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal Lavras, Lavras, Minas Gerais, 2005.
- AVANZI, J. C.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; MELLO, C. R. de; FONSECA, S. Calibração e aplicação do modelo MUSLE em uma microbacia hidrográfica nos Tabuleiros Costeiros brasileiros. **Revista brasileira engenharia agrícola e ambiental**, Campina Grande, v. 12, n. 6, p. 563-569, 2008.
- BARROS, Cláudia Alessandra Peixoto de. **Comportamento hidrossedimentológico de uma bacia hidrográfica rural utilizando técnicas de monitoramento e modelagem**. 2012. 179 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.
- BARTELS, Guilherme Kruger. **Monitoramento hidrossedimentológico numa bacia hidrográfica do Escudo Sul-Rio-Grandense**. 2015. 87 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2015.
- BARTELS, G. K. Comunicação pessoal com o autor. UFPel, Pelotas, 2015a.
- BERTONI, J. & LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 7.ed. São Paulo: Ícone, 2010. 355 p.
- BESKOW, S.; MELLO, C. R.; NORTON, L. D.; CURI, N.; VIOLA, M. R.; AVANZI, J. C. Soil erosion prediction in the Grande River Basin, Brazil using distributed modeling. **Catena**, n. 79, p. 49-59, 2009.
- BRITO, J. L. S.; LIMA, S. do C.; SHIKI, S.; MOREIRA, M. R. Uso do geoprocessamento na estimativa de perda de solos por erosão laminar em Iraí do Minas – MG. In: IX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. **Anais...** Santos: INPE, 1998. p. 501-512.
- BÜHLMANN, E.; WOLFGRAMM, B.; MASELLI, D.; HURNI, H.; SANGINOV, S.R.; LINIGER, H. P. Geographic information system–based decision support for soil conservation planning in Tajikistan. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 65, n. 3/4, p. 151-159, 2010.
- CARVALHO, N. de O.; FILIZOLA JR., N. P.; SANTOS, P. M. C.; LIMA, J. E. F. W. **Guia de Práticas Sedimentométricas**. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica, Superintendência de Estudos e Informações Hidrológicas, 2000. 154 p.

CARVALHO, N. O. **Hidrossedimentologia prática**. Rio de Janeiro: CPRM / Eletrobrás, 1994. 372 p.

CEBECAUER, T. & HOFIERKA, J. The consequences of land-cover changes on soil erosion distribution in Slovakia. **Geomorphology**, v. 98, n. 3/4, p. 187-198, 2008.

CHAVES, H. M. L. Análise global de sensibilidade dos parâmetros da equação universal de perda de solo modificada (MUSLE). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, n. 15, p. 345-350, 1991.

CHAVES, H.M.L. Relações de aporte de sedimento e implicações de sua utilização no pagamento por serviço ambiental em bacias hidrográficas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 4, p. 1469-1477, 2010.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. São Paulo: Edgard Blucher, 1980.

COLLISCHONN, Walter. **Simulação hidrológica de grandes bacias**. 2001. 194 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

CORREA, E. A. & SANJOS PINTO, S. A. F. Avaliação do potencial natural de erosão da bacia hidrográfica do córrego Monjolo Grande (Ipeúna-SP). **Revista Geonorte**, v.2, n.4, p.1356-1367, 2012.

CUNHA, N. G.; SILVEIRA, R. J. da C.; SEVERO, C. R. S. **Estudo dos solos do município de Morro Redondo**. Pelotas: EMBRAPA-CPATC, Ed. UFPel, 1996. 28 p.

DESMET, P. J. & GOVERS, G. A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. **Journal of Soil and Water Conservation**, v.51, n. 5, p. 427-433, 1996.

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

DUTRA, K. R.; TEIXEIRA, E. C.; MENDONÇA, A. S. F. Determinação da Estimativa de Perda de Solo por Erosão Superficial em Bacia Hidrográfica Utilizando Sistema de Informações Geográficas – SIG. In: 19º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. **Anais...** Foz do Iguaçu, 1997. v. 25, p. 2031-2046.

ERDOGAN, E. H.; ERPUL, G.; BAYRAMIN, I. Use of USLE/GIS methodology for predicting soil loss in a semiarid agricultural Watershed. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 131, n. 1/3, p. 153-161, 2007.

FARINASSO, M.; JÚNIOR, O. A. C.; GUIMARÃES, R. F.; GOMES, R. A. T.; RAMOS, V. M. Avaliação qualitativa do potencial de erosão laminar em grandes áreas por meio da EUPS - Equação Universal de Perdas de Solos utilizando novas metodologias em SIG para os cálculos dos seus fatores na região do Alto Parnaíba – PI-MA. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 7, n. 2, p. 73-85, 2006.

FERNANDES, Luís Daniel Fachada. **Transporte de Poluentes em Estuários**. 2001. 41 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia do Ambiente) - Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa/Portugal, 2001.

FREIRE, O.; GODOY, M. C. T. F.; CARVALHO, W. A. Erodibilidade de alguns solos do oeste do Estado de São Paulo. **Revista de Geografia**, v. 1, n. 11, p. 77-87, 1992.

GREEN, W.H. & AMPT, G. A. Studies of soil physics – 1: the flow of air and water through soils. **Journal of Agricultural Science**, v. 4, n. 1, p. 1-24, 1911.

GUIMARÃES, José Carlos Ribeiro. **Medidas de concentração de sedimentos e turbidez na bacia hidrográfica do lajeado grande, São Martinho da Serra (RS)**. 2010. 109 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.

IBGE: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Produção agrícola municipal. Lavoura permanente. Morro Redondo/RS. 2013. Disponível em: <http://www.cidades.ibge.gov.br/xtras/temas.php?lang=&codmun=431245&idtema=137&search=rio-grande-do-sul|morro-redondo|producao-agricola-municipal-lavoura-temporaria-2013>. Acesso em 05 março de 2015.

JAMES, L. D. & BURGESS, S. J. Selection, calibration and testing of hydrologic models. In: HAAN, C. T., JOHNSON, H. P.; BRAKENSIEK, D. L. **Hydrologic modelling of small watersheds**. St. Joseph: ASAE, 1982. p. 437-472.

JOHNSON, C. W.; GORDON, N. D.; HANSON, C. L. Northwest rangeland sediment yield analysis by the MUSLE. **Transaction of the ASAE**, v.8, n.6, 1985. p.1889-1895.

KINELL, P. I. A. Erodibility and erosivity. In: LAL, R., **Encyclopedia of Soil Science**. 2.ed. Washington: Soil and Water Conservation Society, 1994. p. 653-656.

KING, K. W.; ARNOLD, J. G.; WILLIAMS, J. R.; SRINIVASAN, R. **Soil and Water Assessment Tool-SWAT**. Texas: USDA, 1996. 450 p.

MACHADO, C. G. Caracterização química dos agregados e sedimentos superficiais na zona de máxima turbidez no complexo estuarino de Paranaguá (CEP). **Boletim Paranaense de Geociências**, v. 64-65, p. 40-47, 2011.

MERRITT, W. S.; LETCHER, R. A.; JAKEMAN, A. J. A review of erosion and sediment transport models. **Environmental Modelling & Software**, v. 18, p. 761-799, 2003.

MINELLA, J. P. G. & MERTEN, G. H. Monitoramento de bacias hidrográficas para identificar fontes de sedimentos em suspensão. **Ciência Rural**, v. 41, n. 3, p. 424-432, 2011.

MINELLA, J. P. G.; MERTEN, G. H.; REICHERT, J. M.; CASSOL, E. A. Processos e modelagem da erosão: da parcela à bacia hidrográfica. In:____. PRADO, R. B.; TURETTA, A. P. D.; ANDRADE, A. G. **Manejo e conservação do solo e da água no contexto das mudanças ambientais**. 1.ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2010. p. 105-122

MINELLA, J. P. G.; WALLING, D. E.; MERTEN, G. H. Combining sediment source tracing techniques with traditional monitoring to assess the impact of improved land management on catchment sediment yields. **Journal of Hydrology**, v. 348, p. 546-563, 2008.

MIQUELONI, D. P.; BUENO, C. R. P.; FERRAUDO, A. S. Análise espacial dos fatores da equação universal de perda de solo em área de nascentes. **Pesquisa agropecuária brasileira**. v. 47, n. 9, p. 1358-1367, 2012.

NASH, J. E. & SUTCLIFFE, I. V. River Flow Forecasting Throigh Conceptual Models. **Journal of Hydrology**, v. 10, n. 3, p. 282-290, 1970.

NEARING, M. A.; FOSTER, G. R.; LANE, L. J.; FINKNER, S. C. A process-based soil erosion model for USDA-water erosion prediction project technology. **Transactions of the ASAE**. v. 32, n. 5, p. 1587-1593, 1989.

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.

OLIVEIRA, Anna Hoffmann. **Erosão hídrica e seus componentes na sub-bacia hidrográfica do horto florestal terra dura, Eldorado do Sul (RS)**. 2011. 179 f. Tese (Doutorado em Ciência de Solo) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.

PARSONS, A. J.; WAINWRIGHT, J.; BRAZIER, R. E.; POWELL, D. M. Is sediment delivery a fallacy?. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 31, n. 10, p. 1325-1328, 2006.

PATRICHE, C. V.; CAPATANA, V. C.; STOICA, D. L. Aspects regarding soil erosion spatial modeling using the USLE / RUSLE within GIS. **Geographia Technica**, v. 2, n. 2, p. 87-97, 2006.

PEREIRA, J. C. D.; PAES, F. S.; SILVA, F. G. B.; DUPAS, F. A. Determinação Preliminar de Variáveis para Aplicação da Equação Universal da Perda de Solo

(EUPS). In: XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. **Anais...** Campo Grande: ABRH, 2009.

PORTO, M. F. A.; PORTO, R. L. L. Gestão de bacias hidrográficas. **Estudos Avançados**, v. 22, n. 63, p. 43-60, 2008.

PRUSKI, F. F. Prejuízos decorrentes da erosão hídrica e tolerância de perdas de solo. In:_____. PRUSKI, F. F. **Conservação do solo e da água**. Viçosa: Editora UFV, 2006. p. 24-39

RENARD, K. G.; FOSTER, G. R.; WEESIES, G. A.; MCCOOL, D. K.; YODER, D. C. Predicting Soil Erosion By Water: a guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE). **Agriculture Handbook n. 703**: USDA, 1997. 384 p.

RODRIGUES, Miriam Fernanda. **Monitoramento e modelagem dos processos hidrossedimentológicos em bacias hidrográficas florestais no sul do Brasil**. 2011. 209 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.

RODRÍGUEZ-BLANCO, M. L.; TABOADA-CASTRO, M. M.; TABOADA-CASTRO, M. T. Sources and sediment yield from a rural catchment in humid temperate environment, northwest Spain. **Earth surface processes and Landforms**, v. 35, n. 3, p. 272-277, 2010.

ROLOFF, G. & DENARDIN, J. E. Estimativa simplificada da erodibilidade do solo. In: X Reunião Brasileira de Manejo e Conservação do Solo e da Água. **Anais...** Florianópolis: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1994. p.146-147.

SADEGHI, S. H.; MIZUYAMA, T.; VANGAH, B. G. Conformity of MUSLE estimates and erosion plot data for stormwise sediment yield estimation. **Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences**, v. 18, n. 1, p. 117-128, 2007.

SANTOS, Cícero Gomes dos. **Erosão hídrica e taxa de entrega de sedimentos na bacia hidrográfica semiárida do riacho Exu, PE**. 2013. 109 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2013.

SANTOS, J. C. N.; ANDRADE, E. M. de; MEDEIROS, P. H. A.; NETO, J. R. A.; PALÁCIO, H. A. Q. de; RODRIGUES, R. do 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.

SANTOS, L. L. Modelos Hidráulicos-Hidrológicos: Conceitos e Aplicações. **Revista Brasileira de Geografia Física**. Recife/PE, v. 2, n. 3, 2009.

SCHULTZ, G. B.; SIEFERT, C. A. C.; SANTOS, I. Avaliação do ArcMusle para estimativa da produção de sedimentos na bacia hidrográfica do Alto Rio Negro, Região Sul Brasileira. **Boletim de Geografia**, Maringá, v. 31, n. 2, p. 131-141, 2013.

SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL - SEMA. Disponível em: < <http://www.sema.rs.gov.br/>>. Acesso em: 10 mar. 2015.

SILVA, C. R. da; 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**, Viçosa, v. 35, n. 4, 2011.

SILVA, Celina Rubiano da. **Calibração e validação da equação universal de perda de solos modificada (MUSLE) utilizando dados hidrossedimentológicos na bacia do Ribeirão Pipiripau (DF)** 2010. 34 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Brasília, Brasília, Distrito Federal, 2010.

SILVA, Luciana Ferreira da. **A construção de um índice de sustentabilidade ambiental agrícola (ISA): uma proposta metodológica**. 2007. 214 f. Tese (Doutorado em Economia Aplicada) - Universidade Federal de Campinas, Campinas, 2007.

SILVA, V. C. da; Estimativa da erosão atual da bacia do rio Paracatu (MG / GO / DF). **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 34, n. 3, p. 147-159, 2004.

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

TOMAZONI, J. C. & GUIMARÃES, E. A sistematização dos fatores da EUPS em SIG para quantificação da erosão laminar na bacia do Rio Jirau. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 57, n. 3, p. 235-244, 2005.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um latossolo roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, n. 4, p. 573-581, 1998.

TUCCI, C. & COLLISCHONN, W. Drenagem urbana e Controle de Erosão In: VI Simpósio nacional de controle da erosão. **Anais...** Presidente Prudente, 1998.

TUCCI, C. E. M. & MENDES, C. A. **Avaliação ambiental integrada de bacia hidrográfica**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2006. 302 p.

TUCCI, C. E. M. Água no Meio Urbano. In: REBOUÇAS, A. da C.; Braga, B.; Tundisi, J. G. **Águas doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação**. 3ed. São Paulo: Escrituras, 2006. p. 399-432.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia, Ciência e Aplicação**. 4.ed. Porto Alegre: Ed. UFRGS/ABRH, 2009. 943 p.

USDA (United States Department of Agriculture). **Urban hydrology for small watersheds**. Technical Release 55. 2.ed. Washington: USDA, 1986. cap. 2-1.

VALLADARES, G. S.; GOMES, A. S.; TORRESAN, F. E.; RODRIGUES, C. A. G.; GREGO, C. R. Modelo multicritério aditivo na geração de mapas de suscetibilidade à erosão em área rural. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n. 9, p. 1376-1383, 2012.

VITTE, A. C. & MELLO, J. P. Considerações sobre a erodibilidade dos solos e a erosividade das chuvas e suas consequências na morfogênese das vertentes: um balanço bibliográfico. **Climatologia e Estudos da Paisagem**, v. 2, n. 2, p. 107-133, 2007.

WALLING, D. E. The sediment delivery problem. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 65, p. 209-237, 1983.

WILLIAMS, J. R. Sediment-yield prediction with Universal Equation using runoff energy factor. In: **Present and prospective technology for predicting sediment yield and sources**. Oxford: USDA, 1975. p. 244-252

WISCHMEIER, W. H. A rainfall erosion index for a Universal Soil-Loss Equation. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 23, n. 3, p. 246-249, 1959.

WISCHMEIER, W. H. & SMITH, D. D. Rainfall Energy and its Relationships to Soil Loss. **American Geophysical Union**, Washington, v. 39, n. 2, p. 285-291, 1958.

WISCHMEIER, W. H. & SMITH, D. D. **Predicting rainfall erosion losses: guide to conservation planning**. Washington: United States Department of Agriculture, 1978. 58 p.

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, n. 5, p. 189-193, 1971.

ZACHAR, D. **Soil erosion: Developments in soil science**. New York: Elsevier Scientific, 1982. 547 p.