

TAINÁ BRAÚLIO HENNIG

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS
NA BACIA HIDROGRÁFICA DO LAJEADO SÃO JOSÉ**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado como requisito
para obtenção de grau de Bacharel em Engenharia Ambiental da
Universidade Federal da Fronteira Sul.

Orientadora: Profa Aline de Almeida Mota

Este trabalho de conclusão de curso foi defendido e
aprovado pela banca em: 01 / 12 / 2016

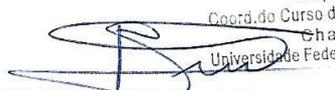
BANCA EXAMINADORA



Profa Me. Aline de Almeida Mota - UFFS



Profa Dra Deise Regina Lazzarotto - UFFS



Prof. Dr. Fernando Grison - UFFS

FERNANDO GRISON
Siape 1869102
Coord. do Curso de Engenharia Ambiental
Chapecó-SC
Universidade Federal da Fronteira Sul-UFFS

Avaliação do potencial de produção de sedimentos na bacia hidrográfica do Lajeado São José

Tainá Braúlio Hennig¹, Aline de Almeida Mota¹ (Orientadora)

¹Universidade Federal da Fronteira Sul, Chapecó, SC, Brasil

E-mails: hennigtain@gmail.com, aline.mota@uffs.edu.br

RESUMO

Um dos fenômenos mais recorrentes e prejudiciais aos solos é a erosão, que pode dar origem a sérios problemas, tanto de cunho ambiental como agrícola e econômico por meio de alterações severas dos sistemas hídricos, abrangendo seu ecossistema, além do assoreamento de cursos d'água. Um dos métodos empíricos de investigação bem como de análise ao que compete a erosão é a *USLE* (*Universal Soil Loss Equation*). Tal método permite estimar a erosão sob diversas condições de chuva, tipos de solo, topografia e uso e cobertura do solo. Este estudo teve como objetivo avaliar o potencial atual de produção de sedimentos da bacia hidrográfica do Lajeado São José, principal manancial de abastecimento de Chapecó-SC, e a influência em um horizonte de 30 anos de alterações no uso do solo da bacia permitidas pelas diretrizes do Plano Diretor do Município de Chapecó na produção de sedimento por meio da aplicação da *USLE*. A produção potencial de sedimentos para as condições de uso e cobertura do solo atuais variou, na área da bacia, entre 0 e 30,2 t.ha⁻¹.mês⁻¹, apresentando uma taxa erosiva de 3,88 t.ha⁻¹.ano⁻¹ utilizando o método de obtenção de *C* a partir do *NDVI*, enquanto pelo método de *C* tabelado, a produção de sedimentos variou entre 0 e 26,6 t.ha⁻¹.mês⁻¹ apresentando uma média de 2,41 t.ha⁻¹.ano⁻¹. Considerando a tendência de urbanização da bacia, a previsão é que daqui 30 anos a taxa chegue a 2,26 t.ha⁻¹.ano⁻¹. Isto se deve ao fato de que atualmente o principal uso do solo da bacia é agrícola, e no processo de urbanização seria substituído por área urbana.

Palavras-chave: USLE; erosão; hidrossedimentologia; uso do solo.

ABSTRACT

One of the most recurrent and harmful phenomena to the soils is erosion, which can cause serious environmental, agricultural and economic problems by means of severe alterations of the water systems. One of the empirical methods of investigation as well as analysis of erosion is the *USLE* (*Universal Soil Loss Equation*). By applying this method, the erosion can be estimated under different rainfall, soil types, topography and land use conditions. The objective of this study was to evaluate the current sediment yield potential of the Lajeado São José basin, the main source of water supply for Chapecó-SC, and the influence of 30-year changes in basin soil use that are allowed by the guidelines of the Master Plan of the Municipality of Chapecó in the production of sediment through the application of *USLE*. The potential production of sediments for the present conditions of soil use varied in the area of the basin between 0 and 30.2 t.ha⁻¹.month⁻¹, presenting an erosive rate of 3.88 t.ha⁻¹.year⁻¹ using the method of obtaining *C* from the *NDVI*, while by the method of *C* from literature, the production of sediments varied between 0 and 26.6 t.ha⁻¹.month⁻¹ presenting a mean of 2,41 t.ha⁻¹.year⁻¹. Considering the trend of urbanization of the basin, the forecast is that in 30 years the rate will reach 2.26 t.ha⁻¹.year⁻¹. This is due to the fact that currently the main land use of the basin is agricultural, and in the process of urbanization would be replaced by urban area.

Keywords: USLE; erosion; hydro-sedimentology; soil use.

INTRODUÇÃO

O ciclo hidrossedimentológico acontece na fase terrestre do ciclo hidrológico, e consiste nas dinâmicas que relacionam os sedimentos e a água. Tucci (1993) afirma que o ciclo hidrossedimentológico é totalmente dependente do ciclo hidrológico, uma vez que neste são envolvidos os processos de erosão, transporte e deposição das partículas de solo que estão presentes na superfície da bacia hidrográfica. Considerando a dinâmica do ciclo hidrossedimentológico, tem-se como evidência que a maior parte das partículas de solo é desprendida na área da cabeceira da bacia, uma vez que estes locais são compostos, geralmente, por encostas mais declivosas. Este ciclo acontece naturalmente no âmbito das bacias hidrográficas, porém, pode ser acelerado por conta de ações antrópicas, obtendo-se por consequência o aumento na produção de sedimentos.

Sabendo dos danos causados por processos erosivos em atividades econômicas que envolvem a agricultura, meio ambiente e também a infraestrutura e drenagem no meio urbano é possível relacionar tal fenômeno com perdas de ordem financeira, material e ambiental.

A erosão tem sido amplamente estudada em virtude de suas consequências, mas os problemas de cunho ambiental relacionados à erosão, o transporte e a deposição de sedimentos é que tem alavancado o desenvolvimento de estudos na área. Do ponto de vista ambiental, Carvalho (2008) cita diversos impactos negativos que ocorrem por conta da presença de sedimentos nos ecossistemas aquáticos, como a piora da qualidade da água, já que os sedimentos podem atuar como portadores de uma série de poluentes, a diminuição de atividades relacionadas à fotossíntese, já que ocorre aumento significativo na turbidez do corpo d'água, além das alterações que

acontecem na biota aquática. Ainda podem ocorrer processos de assoreamento, fazendo com que se tenha uma diminuição da vida útil de reservatórios artificiais.

O assoreamento pode estar intimamente associado a prejuízos econômicos, pois aumenta potencialmente o risco da ocorrência de enchentes, o impedimento da navegação e o entupimento em canais de drenagem de águas pluviais decorrente da deposição de sedimentos (CARVALHO, 2008).

Neste contexto, Bellinaso e Paiva (2007) refletem que no que tange a gestão de recursos hídricos, é fundamental conhecer a produção de sedimentos em bacias hidrográficas.

Existem diversas maneiras de estimar a produção de sedimentos: modelos empíricos, os quais utilizam relações matemáticas que são baseadas em observações como a *MUSLE* (*Modified Universal Soil Loss Equation*) proposta por Williams (1975), por exemplo; ou modelos conceituais, que são baseados em processos físicos observados, os quais procuram descrever todas as etapas que envolvem o fenômeno estudado e que são mais complexos, haja vista a necessidade de maior quantidade e qualidade de dados de entrada, como o modelo *SWAT* (*Soil and Water Assessment Tool*) proposto por Arnold et al. (1998) e *AGNPS* (*Agricultural Non-point Source Pollution Model*) proposto por Young et al. (1989), por exemplo (MERRIT et al., 2003). Os modelos conceituais podem ser extremamente caros e difíceis de executar.

A *USLE* (*Universal Soil Loess Equation*) que determina a erosão, é um dos modelos empíricos mais aceitos por pesquisadores, além de mais utilizado, apresentando aplicabilidade avançada em diversas partes do mundo (BARBOSA et al., 2015; GALDINO et al., 2004; SILVA, 2008; VIEIRA, 2008).

Sabe-se da elevada complexidade dos processos que ocorrem em uma bacia hidrográfica, para tanto, mediante adequado manejo de recursos naturais, a compreensão destes processos torna-se imprescindível. Esta é uma das mais importantes justificativas utilizadas por pesquisadores que apresentam interesse cada vez maior por modelos de quantificação de perdas do solo por erosão (REICHARDT e TIMM, 2004).

O principal manancial de abastecimento do município de Chapecó-SC é a bacia hidrográfica do Lajeado São José. Em 1990, já havia preocupações quanto à produção de sedimentos nesta bacia, motivando o trabalho de Bassi (1990). Porém, os fatores que influenciam a erosão estão em constante alteração, especialmente quando se trata de bacias que tem parte de seu território urbanizado, e por este motivo é necessário atualizar as estimativas da produção de sedimentos.

O Plano Diretor do município (Lei complementar nº 541, de 26 de novembro de 2014, CHAPECÓ, 2014) foi aprovado recentemente, porém ainda não se sabe quais serão ao certo os impactos que estas diretrizes de ordenamento do uso da terra terão especificamente na produção de sedimentos.

Diante disto, teve-se por objetivo avaliar o potencial atual de produção de sedimentos na bacia hidrográfica do Lajeado São José e a influência de

alterações no uso do solo da bacia permitidas pelas diretrizes do Plano Diretor do Município de Chapecó na produção de sedimento por meio da aplicação da *USLE*.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

Inserida na região hidrográfica do rio Uruguai, com uma área de 76,32 km² e perímetro de 64,56 km, a bacia hidrográfica do Lajeado São José está localizada nos municípios de Chapecó-SC e Cordilheira Alta-SC, região oeste de Santa Catarina (Fig. 1).

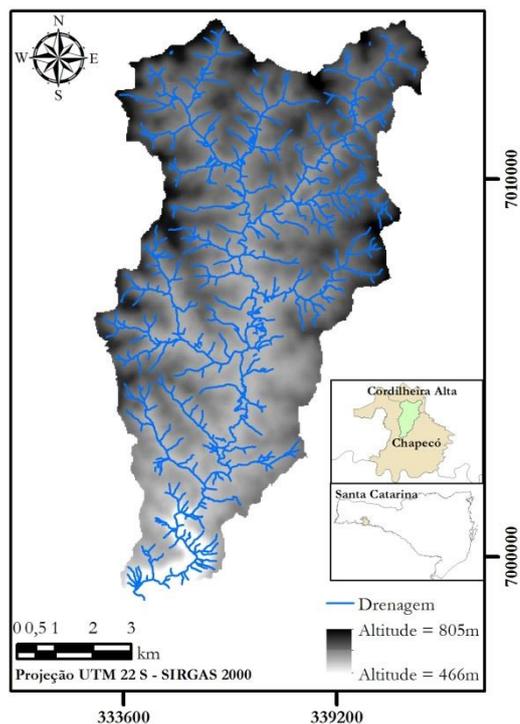


Figura 1 – Localização da bacia hidrográfica do Lajeado São José, drenagem e Modelo Digital de Elevação.

A bacia hidrográfica do Lajeado São José possui formato alongado no sentido Norte-Sul e está inserida entre as altitudes de 466 e 805 m (Fig. 1). A densidade de drenagem é de 2,89 km.km⁻². Com a utilização do método de Strahler, pode-se constatar que a bacia hidrográfica do Lajeado São José é de ordem 4, sendo a escala da base cartográfica 1:50.000. O índice de compacidade da bacia é de 2,08, e fator de forma 0,09.

A principal característica geológica da bacia hidrográfica é o derrame de lavas básicas da formação Serra Geral. O relevo é marcado por ser montanhoso, com morros e montanhas, e também suave-ondulado, composto por tabuleiros, chapadas e superfícies aplainadas (SANTA CATARINA, 1991).

O clima da bacia hidrográfica é classificado como superúmido, sendo influenciado pelas massas de ar frias provenientes da Antártida pelo regime de chuvas e também pelos ventos provenientes do sudeste. A temperatura média anual é de aproximadamente 19 °C. A precipitação anual é de aproximadamente 2200 mm, com uma umidade relativa anual de aproximadamente 80% (SANTA CATARINA, 1991).

Produção de sedimentos por processos erosivos

A produção de sedimentos da bacia hidrográfica do Lajeado São José foi determinada por meio da aplicação de uma modelagem matemática voltada ao fator ambiental: a *USLE* (Eq. 1), equação esta proposta por Wischmeier e Smith (1978).

$$USLE = R.K.LS.C.P \quad (1)$$

Onde: *USLE* = estimativa da perda de solo ($t.ha^{-1}$); *R* = fator de erosividade da chuva ($MJ.mm.ha^{-1}.h^{-1}$); *K* = fator de erodibilidade do solo ($t.ha.h.ha^{-1}.MJ^{-1}.mm^{-1}$); *LS* = fator topográfico (adimensional); *C* = fator de cobertura, uso e manejo do solo (adimensional); *P* = fator de práticas contra a erosão (adimensional).

O cálculo da *USLE* foi realizado por meio do uso de um SIG (Sistema de Informações Geográficas), o software ArcGis 10.3.1. No entanto, para a aplicação deste cálculo era necessário determinar cada uma das variáveis da Equação 1. Para isso, cada um dos fatores foi estudado de forma individual para que suas definições pudessem ser compreendidas sem equívocos. Compreendendo o sentido e a importância de cada um dos fatores, procedeu-se com a busca pela melhor metodologia para a determinação de cada um deles, de modo que os resultados fossem obtidos em forma de mapas.

Após a elaboração dos mapas que carregavam os resultados para cada uma das variáveis da Equação 1, a produção de sedimentos foi calculada por meio da multiplicação deles utilizando a ferramenta “*Raster calculator*” do ArcGis 10.3.1, (Figura 2).



Figura 2 – Fluxograma indicativo de multiplicação de mapas.

Fator R

O fator *R* é dado como o índice de erosão provocado pela precipitação. Expressa a capacidade que a chuva apresenta para causar erosão em uma área desprotegida, ou seja, sem cobertura vegetal. Pode ser definido como o produto da energia cinética apresentada por uma precipitação pela intensidade máxima que pode apresentar, em um tempo de 30 minutos (CARVALHO, 2008; HUDSON, 1973; RIGHETTO, 1998).

Para a determinação deste fator foram utilizadas séries de dados referentes a cinco estações pluviométricas localizadas ao redor da bacia hidrográfica do Lajeado São José (Tab. 1 e Fig. 3). Todas as estações foram instaladas recentemente, e realizam medições em intervalos de 10 minutos. A estação que possui maior período de acompanhamento é a estação da UFFS (Universidade Federal da Fronteira Sul), que no momento da coleta de dados apresentava quinze meses de monitoramento.

Tabela 1 - Estações pluviométricas das quais os dados foram retirados.

Código	-	420420201A	420420202A	421420102A	421750101A
Instituição	UFFS	CEMADEN	CEMADEN	CEMADEN	CEMADEN
Nome	UFFS	Prefeitura	Vila Real	Quilombo	Seara
Altitude (m)	610	724	706	390	525
Longitude*	330896,96	340316,63	340536,94	329088,625	370302,60
Latitude*	6999242,74	7000091,20	7004931,85	7042709,52	6996157,17
Comp. da série de dados (meses)	14	12	12	12	12
Período de monit.	13/03/2015	18/08/2015	18/08/2015	18/08/2015	18/08/2015
	a	a	a	a	a
	08/05/2016	07/08/2016	07/08/2016	30/08/2016	30/08/2016
Total precipitado (mm)	2603,20	2148,00	2331,80	2377,60	2780,00

* Coordenadas em SIRGAS 2000, projeção UTM, Fuso 22S.

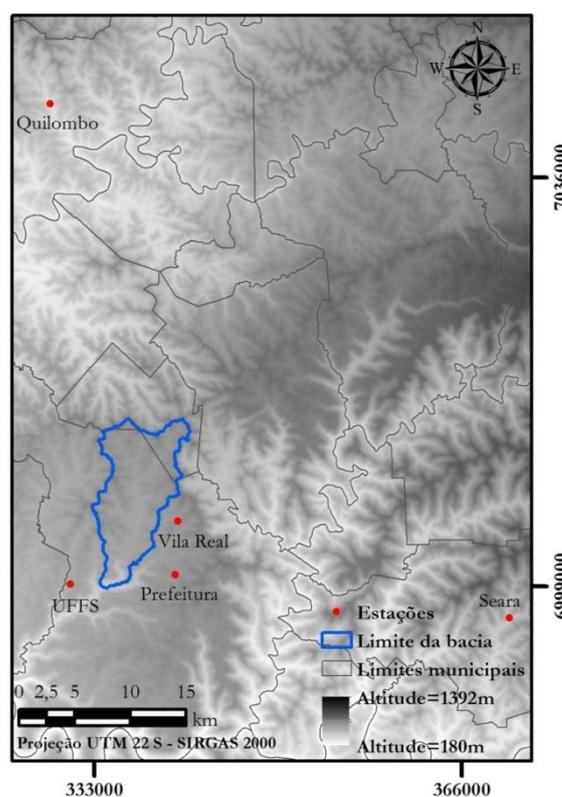


Figura 3 – Localização das estações pluviométricas.

Os valores de erosividade variam com os meses, dependendo da ocorrência de precipitações com maiores intensidades. A média mensal é de 13 dias com ocorrência de chuva, porém, existe certa variabilidade ao longo do ano. De acordo com a Figura 4, nas estações de Quilombo e Seara foram registrados mais dias com chuva, 199 e 173 no período, respectivamente.

Os meses com maior volume de precipitações registrados foram novembro e dezembro de 2015. De forma individual, todas as estações apresentaram maior volume de precipitação em alguns dos meses citados, exceto a estação de Quilombo, em que o mês com maior precipitação foi em outubro.

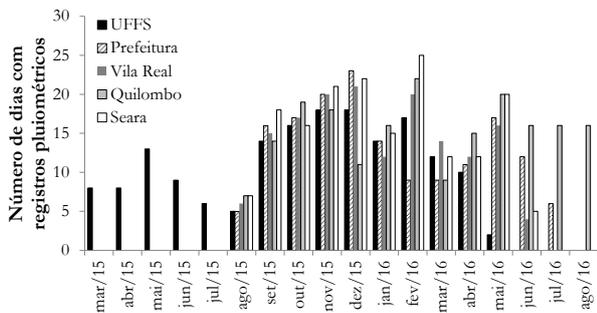


Figura 4 – Número de dias com registros de ocorrência de pluviosidade para cada mês em cada uma das estações pluviométricas.

O índice R foi determinado para todas as chuvas erosivas – todo evento de chuva que ocasione lâmina d'água igual ou superior a 10,0 mm, ou com lâmina maior ou igual a 6,0 mm com duração inferior a 15 minutos (WISCHMEIER, 1959). As chuvas erosivas foram determinadas por meio de programação computacional.

Após a identificação das chuvas erosivas, a energia cinética unitária destas foi determinada. A energia e_1 pôde ser estimada mediante duas situações: quando $i \leq 76 \text{ mm.h}^{-1}$ (Equação 2) e quando $i > 76 \text{ mm.h}^{-1}$ (Equação 3) (FOSTER et al., 1981).

$$e_1 = 0,119 + 0,0873 \cdot \log_{10}(i) \quad (2)$$

$$e_1 = 0,283 \quad (3)$$

Onde: e_1 = energia cinética unitária ($\text{MJ.ha}^{-1}.\text{mm}^{-1}$).

Posteriormente, utilizou-se da Equação 4 para a determinação da energia E .

$$E = e_1 \cdot a \quad (4)$$

Onde: E = energia de determinado evento de chuva (MJ.ha^{-1}); e_1 = energia cinética unitária ($\text{MJ.ha}^{-1}.\text{mm}^{-1}$); a = altura total precipitada (mm).

Por fim, a determinação de R foi efetuada por meio da Equação 5, proposta por Bertoni e Lombardi Neto (1985).

$$R = \sum_{j=1}^N (E \cdot I_{30})_j \quad (5)$$

Onde: E = energia de determinado evento de chuva (MJ.ha^{-1}); I_{30} = intensidade da chuva média de 30 minutos, e máxima ao longo da duração da chuva (mm.h^{-1}); j = evento pluviométrico em um período mensal; N = número de chuvas erosivas ocorridas no período.

Elaborou-se uma tabela de atributos com o nome de cada uma das estações, suas coordenadas geográficas e seus respectivos valores médios mensais de R . Posteriormente, este arquivo foi importado para o ArcGis 10.3.1, sendo gerado um arquivo de pontos em formato *shapefile*. Realizou-se a interpolação dos dados de R médio mensal por meio da ferramenta “IDW” fazendo com que, além dos pontos que representavam as estações, toda a área da bacia hidrográfica obtivesse um valor de R correspondente. O resultado da interpolação, e deste fator, foi obtido em forma de mapa em formato *raster*.

Fator K

De acordo com Righetto (1998), o fator K é a taxa de perda de solo por unidade de erosividade da chuva para um determinado local de referência. Elliot e Lal (1994) afirmam que K pode ser descrito como o conjunto de processos que regulam a recepção da chuva e também a resistência do solo mediante o desprendimento de partículas e o transporte subsequente. Desta forma, este fator consiste em uma medida capaz de traduzir a suscetibilidade do solo ao desprendimento e ao transporte de partículas, sendo esta influenciada por fatores como a textura do solo, a estrutura, a porcentagem de matéria orgânica e a permeabilidade do solo (ELLIOT e LAL, 1994; FOSTER et al., 1981; SONNEVELD e NEARING, 2003). Ickis e Riveira (1997) afirmam que pode-se dizer que K é um fator capaz de representar o grau de resistência natural do solo à erosão.

Wischmeier e Smith (1978) propõem um nomograma para a determinação de K , que pode ser expresso também pela Equação 6 (RENARD et al., 1997).

$$K = \frac{2,1 \cdot 10^{-4} (12 - OM) M^{1,14} + 3,25(s - 2) + 2,5(p - 3)}{100,7,59} \quad (6)$$

Onde: K = erodibilidade do solo ($\text{t.ha.h.ha}^{-1}.\text{MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}$); OM = porcentagem de matéria orgânica no solo (%); M = parâmetro referente à textura dado por $[(\% \text{ de silte} + \% \text{ de areia})]$; s = código da classe de estrutura, 1 (granular muito fina), 2 (granular fina), 3 (granular média ou grande) e 4 (de blocos, laminar ou maciça); p = código da classe de permeabilidade, 1 (rápida), 2 (moderada a rápida), 3 (moderada), 4 (lenta a moderada), 5 (lenta) e 6 (muito lenta).

Utilizou-se o levantamento de solos do estado de Santa Catarina (EMBRAPA, 2004) para obter a informação da textura de cada solo que compõe a bacia hidrográfica. Em seguida, com o auxílio da pirâmide textural da Embrapa (2014), foi possível determinar as frações de areia, silte e argila para cada um dos solos existentes na bacia hidrográfica. Estas frações foram utilizadas na determinação de M . Como algumas unidades de mapeamento são compostas por mais de um tipo de solo, nestes casos utilizou-se a média de M dos tipos de solo constituintes de determinada unidade de mapeamento para obter um só valor de M para cada uma delas.

A caracterização quanto à estrutura do solo foi obtida no boletim de solos desenvolvido pela Embrapa (2004). Essas informações foram interpretadas conforme a Tabela 2 no intuito de se adotar um valor de s para cada tipo de solo. O valor final de s de cada unidade de mapeamento foi calculado por meio de média aritmética.

Para determinar a classe de permeabilidade p para cada unidade de mapeamento, estimou-se a condutividade hidráulica saturada para cada um dos tipos de solo existentes na bacia utilizando o software *Rosetta Lite Version 1.1* que foi proposto por Schaap et al. (2001), sendo que, neste caso, os dados de entrada foram as porcentagens de areia, silte e argila já obtidas anteriormente. Em seguida verificou-se em qual classe de permeabilidade dentre as definidas pela USDA (*U.S. Department of Agriculture*) se encaixavam os valores de condutividade hidráulica saturada (USDA, 2010). Não foi necessário adotar média, pois em todos os casos de unidades de mapeamento constituídas

por mais de um tipo de solo, todos se enquadraram na mesma classe de permeabilidade.

Tabela 2 – Tipo de solo, estrutura de acordo com o boletim de solos desenvolvido pela Embrapa (2004), o intervalo cabível para a descrição, e valor de s adotado.

SOLO	Estrutura conforme o boletim de solos	Intervalo adotado	Valor de s adotado
Cambissolo Háptico	fraca a moderada pequena e média	2 e 3	2,5
Neossolo Litólico	moderada pequena muito pequena granular	1 e 2	1,5
Nitossolo Vermelho	moderada pequena média granular	2 e 3	2,5
Latossolo Vermelho	forte pequena e muito pequena granular	1 e 2	1,5
Latossolo Bruno	fraca pequena média granular e em blocos subangulares	2 e 3	2,5

A porcentagem de matéria orgânica é um atributo que apresenta alta vulnerabilidade espacial. No levantamento de solos não se dispõe de dados médios para esse atributo para cada tipo de solo. Apesar de alguns trabalhos terem determinado essa característica em laboratório, verificou-se que o solo está submetido à manejos muito específicos em cada situação (PEIXOTO et al., 2002; VERLENGIA e GARGANTINI, 1968). Diante do exposto, adotou-se OM igual a 2% para todas as unidades de mapeamento por ser um valor médio no intervalo possível (0 a 4%). Verificou-se que a sensibilidade do cálculo de K ao parâmetro OM pode chegar a no máximo 15%, porém ao se adotar o mesmo valor para todas as unidades de mapeamento minimizou-se uma possível falsa interferência no cálculo final de perda de solo.

Tendo-se os valores para OM , M , s , e p , foi possível calcular K para cada uma das unidades de mapeamento (Eq. 6). Assim, para gerar o resultado deste fator, utilizou-se do mesmo mapa fornecido pela Embrapa e apenas adicionou-se uma nova coluna na tabela de atributos. Posteriormente, convertendo o formato do arquivo para *raster*, selecionou-se o atributo K para compor o arquivo gerado.

Fator LS

O fator LS , conhecido como fator topográfico, traduz a influência do relevo sob os processos erosivos e de sedimentação. Para a determinação deste fator são necessários dados, que forneçam altitude mínima, média e máxima, a declividade do terreno, e também o comprimento da vertente (PINET e SOURIAU, 1988; SUMMERFIELD e HULTON, 1994).

O fator L consiste na distância existente entre o local de origem do fluxo superficial – ponto de maior altitude - até o local de menor declive ou o local onde a rede de fluxo se acopla a um rio, locais estes onde ocorre a deposição de sedimentos. De acordo com Mitasova et al. (1995), quanto maior L , maior a perda de solo, já que quanto maior a distância entre o ponto de maior e menor altitude, maior o arraste de água sobre o solo, e maior a quantidade de sedimentos gerada.

O fator de inclinação da encosta S é um parâmetro que também considera, de forma indireta, o

efeito do deflúvio superficial do solo (RIGHETTO, 1998). Sendo o ângulo de inclinação da encosta θ , a declividade do terreno igual a $\text{sen}(\theta)$ é considerada na $USLE$ por meio de uma equação empírica, que é denominada fator de inclinação da encosta S (WISCHMEIER e SMITH 1978).

Wischmeier e Smith (1978) propõem a Equação 7 para a determinação do fator LS :

$$LS = \left(\frac{x}{22,1} \right)^m \cdot (65,41 \cdot s^2 + 4,59 \cdot s + 0,065) \quad (7)$$

Onde: x = comprimento da encosta (m); m = expoente função da declividade predominante (igual a 0,5 quando a declividade é maior ou igual a 5%; 0,4 quando a declividade está entre 3,5 e 4,5%; 0,3 quando a declividade está entre 1,0 e 3,0%; e 0,2 para declividade predominantemente menor que 1%); s = declividade do terreno.

Tombus et al. (2012) afirmam que é possível obter um valor aproximado de x aplicando a Equação a seguir:

$$x = \text{Flow accumulation} \cdot \text{tamanho do pixel} \quad (8)$$

Onde: x = comprimento da encosta (m); sendo $Flow\ Accumulation$ adimensional, obtido por meio de ferramentas de geoprocessamento, e o tamanho do pixel informação referente à resolução do arquivo matricial utilizado (m).

Para gerar o “*Flow accumulation*”, inicialmente, utilizou-se o Modelo Digital de Elevação (MDE) da bacia hidrográfica do Lajeado São José, que foi obtido no site da Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (Epagri/Ciram) na resolução de 30m, de forma gratuita. Utilizou-se a ferramenta “*Fill*”, que é utilizada para preencher as imperfeições existentes no *raster*, removendo possíveis depressões. Estas depressões são o resultado de possíveis erros a serem cometidos durante a geração do “*Flow direction*”. Posteriormente, com o auxílio da ferramenta “*Flow direction*”, determinou-se a direção de fluxo de forma automática, atribuindo valores específicos para cada direção de fluxo na grade de dados. Depois, com o auxílio da “*Flow accumulation*”, foi calculada a quantidade de células que drenam para determinada célula de análise.

Para a determinação do $\text{sen}(\text{slope})$, utilizando-se do MDE, prosseguiu-se com a utilização da ferramenta “*slope*”, gerando um mapa de declividades da bacia hidrográfica em graus. Depois, com o auxílio da “*Raster calculator*” calculou-se o seno do “*slope*” que foi gerado anteriormente.

Tendo-se o mapa do “*Flow accumulation*” e o mapa do $\text{sen}(\text{slope})$, a Equação 9 pode ser aplicada, e o fator LS determinado.

$$LS = \left(\frac{\text{Flow accumulation} \cdot \text{tamanho do pixel}}{22,1} \right)^m \cdot (65,41 \cdot [\text{sen}(\text{slope})]^2 + 4,59 \cdot \text{sen}(\text{slope}) + 0,065) \quad (9)$$

Fator CP

O fator de cobertura, uso e manejo do solo, C , é definido pela relação de perda de solo entre o solo alterado

por práticas de cultura e o solo exposto, de acordo com Righetto (1998) e Renard et al. (1997).

Por muito tempo, os valores de C eram adotados por meio de tabelas pré-existentes em que cada classe de uso do solo apresentava um valor. Porém, atualmente, considera-se mais precisa a determinação de C por meio do $NDVI$ (*Normalized Difference Vegetation Index*). De acordo com o INSA (Instituto Nacional do Semiárido), o $NDVI$ permite além do mapeamento da vegetação, a medição da sua quantidade e condição, consistindo basicamente em um valor numérico que varia entre -1 - quando tem-se vegetação sem folhas -, e +1 - quando tem-se vegetação com folhas -, sendo este calculado utilizando-se de porções de energia eletromagnéticas que são refletidas pela vegetação nas bandas do vermelho e do infravermelho.

De acordo com Tucker (1979) o $NDVI$ pode ser determinado pela Equação 10.

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{Red}}{\rho_{NIR} + \rho_{Red}} \quad (10)$$

Onde: $NDVI$ = assume valores de -1 a +1 com valores mais altos atribuídos a áreas com maior cobertura vegetal; ρ_{NIR} = refletância espectral de superfície na faixa do infravermelho; ρ_{Red} = superfície de refletância espectral na banda do vermelho.

O $NDVI$ foi calculado por meio do software ArcGis 10.3.1, a partir das bandas 4 e 5, sendo estas correspondentes a banda do infravermelho e vermelho, respectivamente, das imagens do satélite LANDSAT 8, sensor OLI, disponíveis gratuitamente no site do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais). Foram selecionadas as imagens com melhor visibilidade capturadas a cada 2 meses no ano de 2015, sendo que suas datas específicas foram: 20/03/2015; 07/05/2015; 26/07/2015; 28/09/2015; 14/10/2015; e 17/12/2015. O intuito de se adotar esse intervalo temporal foi calcular um $NDVI$ mensal médio representativo para a bacia.

A Equação 10 foi aplicada para cada uma das imagens de satélite por meio de álgebra de mapas gerando um $NDVI$ para cada uma delas. Posteriormente, com a mesma ferramenta, encontrou-se uma média dos mapas de $NDVI$ s, objetivando ter uma média mensal deste valor.

O cálculo de C foi realizado por meio da aplicação da equação proposta por van der Knijff, Jones e Montanarella (2001), com a mesma ferramenta (Eq. 11).

$$C = \frac{-NDVI + 1}{2} \quad (11)$$

O resultado consolidou-se em um mapa em formato *raster*.

Um mapa atual do fator C foi também gerado, este por meio da atribuição de valores (Tab. 3) para cada uso do solo observado em um mapa de uso do solo gerado. O mapa de uso do solo foi elaborado no software Spring 5.3, por meio da classificação automática supervisionada da imagem do satélite LANDSAT 8, sensor OLI, obtida gratuitamente no site do INPE. A data de captura da imagem utilizada foi 07 de abril de 2016. Para a realização da classificação supervisionada, utilizou-se de amostras de treinamento, que foram adquiridas pela análise

da composição colorida e pela leitura de pixels, sobretudo em áreas que demonstravam características marcantes referentes a cada classe de uso do solo. Objetivando um bom resultado no mapa de uso do solo, a quantidade de amostras coletadas foi a maior possível. Posteriormente, utilizando-se do algoritmo de máxima verossimilhança no software, a imagem pode ser classificada conforme o seu uso, gerando um mapa temático com 5 classes de interesse: agricultura, composta por áreas com algum tipo de cultura como o plantio de vegetação exótica, milho, soja, trigo, entre outros; vegetação, que são as áreas compostas por vegetação nativa; mancha urbana, que são as áreas compostas por edificações e pavimentações; solo exposto, são as áreas que não apresentam qualquer tipo de cobertura; e cursos d'água, que são as áreas onde existem corpos hídricos.

Na tabela de atributos do mapa de uso do solo acrescentou-se uma coluna correspondente aos valores de C (Tab. 3). Posteriormente, convertendo o formato do arquivo para *raster*, selecionou-se o atributo C para compor o arquivo gerado.

Tabela 3 – Classes de uso do solo e valor de C adotado para cada uma.

Classe de uso do solo	Valor de C	Referência
Agricultura	0,290	BERTONI e LOMBARDI NETO (1985)
Vegetação	0,010	BERTONI e LOMBARDI NETO (1985)
Mancha urbana	0,200	MORGAN (1995)
Solo exposto	0,404	BERTONI e LOMBARDI NETO (1985)
Cursos d'água	0,000	BERTONI e LOMBARDI NETO (1985)

O fator P corresponde a valores para práticas contra erosão em função do manejo do solo, de acordo com Righetto (1998). A este atribuiu-se valor 1, considerando que não existe a adoção de práticas conservacionistas na área da bacia hidrográfica do Lajeado São José, que seria a situação mais pessimista possível. O objetivo disso é estimar a perda de solo potencial da bacia.

Estimativa da produção de sedimentos para 30 anos

Debastiani (2015) estimou o aumento da porcentagem de área urbana no perímetro urbano da bacia do Lajeado São José para o intervalo de 1986 a 2014. Com base nos dados do trabalho mencionado, estimou-se uma tendência de aumento anual da área urbana de 1,8%.

Tendo-se a tendência de aumento da mancha urbana na bacia hidrográfica do Lajeado São José, realizou-se a projeção do aumento da área em 30 anos. Posteriormente, tendo-se o tamanho previsto da área urbana na bacia, com o auxílio da ferramenta “*Buffer*” no ArcGis 10.3.1, gerou-se o polígono da área urbana com o tamanho projetado tendo como base o mapa de uso do solo gerado para 2016. Visando a redução de possíveis erros mediante a sobreposição do “*Buffer*”, utilizou-se da ferramenta “*Dissolve*”, que promoveu uma agregação em todo o polígono transformando-o em um só.

Depois, com o auxílio da “*Erase*” realizou-se a subtração entre o mapa de uso do solo atual e o “*Buffer*” desenvolvido para a mancha urbana futura, obtendo-se como resultado um mapa que compunha todas as classes de uso do solo da bacia, exceto a mancha urbana.

Considerando que, em 30 anos a única classe a ter aumento de área seria a correspondente a mancha urbana,

por meio da ferramenta “Union” procedeu-se com a união do “Buffer” e do mapa obtido por meio da “Erase”, obtendo-se o mapa de uso do solo para 2046.

Na tabela de atributos do mapa de uso do solo projetado para 30 anos acrescentou-se uma coluna correspondente aos valores de C (Tab. 3), assim como fez-se para o mapa de uso atual. Posteriormente, convertendo o formato do arquivo para *raster*, selecionou-se o atributo C para compor o arquivo gerado.

Sabendo que os fatores R , K , e LS dificilmente serão alterados com o passar dos anos, calculou-se a nova $USLE$ para a bacia hidrográfica do Lajeado São José com os mesmos mapas gerados anteriormente.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Fator R

O maior valor de R médio mensal foi obtido na estação de Seara, chegando a 595,416 MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹, enquanto o menor é da estação de Quilombo, chegando a 370,488 MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹. A estação do Vila Real apresentou um R de 589,002 MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹, a da Prefeitura 486,046 MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹ e a da UFFS 450,831 MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹.

Apesar de estarem relativamente próximas, pode-se observar que os maiores valores de R não acontecem nos mesmos meses em todas as estações. Na estação da UFFS o maior R foi obtido no mês de novembro, na da Prefeitura no mês de março, na estação do Vila Real em fevereiro, na estação de Quilombo em outubro e na estação de Seara em março (Fig. 5).

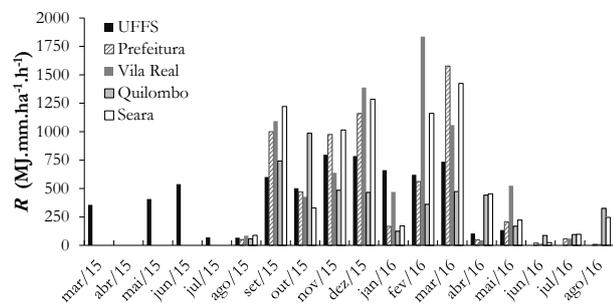


Figura 5 – Valores de R para cada uma das estações pluviométricas.

Nenhum mês da série de dados apresentou precipitação zero, apesar de, para algumas estações, a erosividade ser nula, já que o início do monitoramento ocorreu mais tarde.

A Figura 6 apresenta o resultado para o fator R na bacia hidrográfica do Lajeado São José. De acordo com o mapa, os valores de erosividade mensal variam entre 0 e 578,216 MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹, e o valor médio do fator para a área da bacia hidrográfica é de 533,023 MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹.

Os maiores valores de R ocorrem na porção leste da bacia hidrográfica, área esta composta, em sua maior parte, pela unidade de mapeamento de solos 7 - Nitossolo Vermelho e Cambissolo Háptico, coincidindo ainda com a porção mais urbanizada da bacia hidrográfica.

Observou-se uma redução da erosividade na porção sul da bacia hidrográfica, esta pode estar

possivelmente relacionada com a altimetria da bacia, já que justamente neste local tem-se os menores valores de altitude.

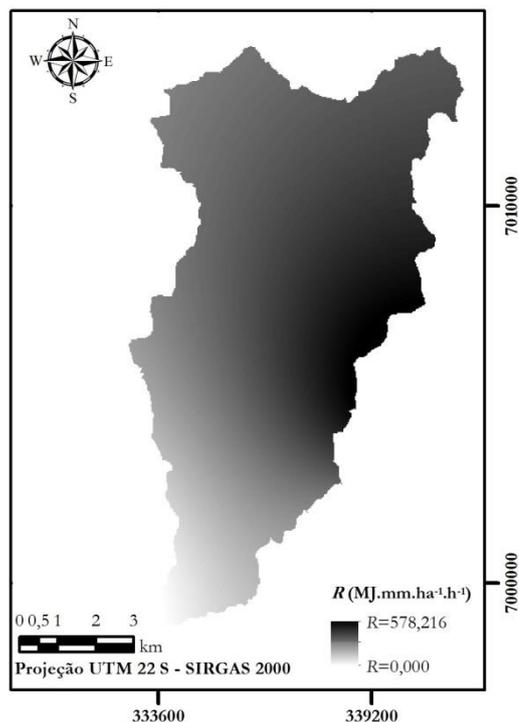


Figura 6 – Erosividade da bacia hidrográfica do Lajeado São José.

Schick et al. (2014) determinaram a erosividade em Lages-SC, no ano de 2012, chegando a um valor mensal médio de 270,08 MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹. Os autores ainda determinaram um R médio mensal entre os anos de 1989 e 2012, encontrando um valor de erosividade média mensal igual a 419,42 MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹. Em Urussanga, também em Santa Catarina, a erosividade média mensal foi determinada em 614,63 MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹ (VALVASSORI e BACK, 2014).

Waltrick et al. (2015) determinou o fator R para 114 locais do estado do Paraná, encontrando como média mensal 750,00 MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹.

Gómez (2012), ao calcular o valor de erosividade a partir de 2156 estações pluviométricas distribuídas no território brasileiro, encontrou um R médio mensal de 1250,00 MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹, variando este entre 166,67 MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹ e 2333,33 MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹.

Diante do exposto, pode-se verificar que os resultados encontrados para o fator R são bastante coerentes, já que no estado de Santa Catarina, Paraná e até mesmo no Brasil, os valores para este fator apresentam-se bastante próximos.

Fator K

O mapa de classificação de solos utilizado no processo de determinação do fator K apresenta oito unidades de mapeamento inseridas na bacia de estudo, sendo que 2 das unidades são compostas por 3 diferentes tipos de solos, outras 2 das unidades por 2 diferentes tipos de solo, e 4 das unidades restantes por somente um tipo de solo (Tab. 4).

A diferença existente entre o somatório das áreas de cada unidade de mapeamento e a área total da bacia hidrográfica se dá em virtude da existência de áreas urbanizadas e corpos d'água, sendo estas correspondentes a 0,035 ha e 33,599 ha, respectivamente (Tab. 4).

Os tipos de solo predominantes na bacia hidrográfica são Nitossolo Vermelho e Latossolo Bruno. E as unidades de mapeamento predominantes são a unidade

Tabela 4 – Unidades de mapeamento com seus tipos de solo, textura e respectivas profundidades.

Unidade de mapeamento	1	2	3	4	5	6	7	8
Área (ha)	991,573	166,540	212,293	40,492	3167,610	2204,430	549,121	266,692
Solo 1	Cambissolo Háplico	Cambissolo Háplico	Nitossolo Vermelho	Nitossolo Vermelho	Nitossolo Vermelho	Latossolo Bruno	Nitossolo Vermelho	Cambissolo Háplico
Textura	Argilosa	Argilosa	Muito argilosa	Muito argilosa	Muito argilosa	Muito argilosa	Muito argilosa	Argilosa
% areia	26,25	26,25	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	26,25
% silte	26,25	26,25	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	26,25
% argila	47,50	47,50	80,00	80,00	80,00	80,00	80,00	47,50
Profundidade (cm)	60-150	60-150	> 150	> 150	> 150	> 150	> 150	60-150
Solo 2	Neossolo Litólico	Neossolo Litólico	-	-	-	-	Cambissolo Háplico	Neossolo Litólico
Textura	Média	Argilosa	-	-	-	-	Argilosa	Média
% areia	45,00	26,25	-	-	-	-	26,25	45,00
% silte	37,50	26,25	-	-	-	-	26,25	37,50
% argila	17,50	47,50	-	-	-	-	47,50	17,50
Profundidade (cm)	< 60	< 60	-	-	-	-	60-150	< 60
Solo 3	Nitossolo Vermelho	-	-	-	-	-	-	Nitossolo Vermelho
Textura	Muito argilosa	-	-	-	-	-	-	Muito argilosa
% areia	10,00	-	-	-	-	-	-	10,00
% silte	10,00	-	-	-	-	-	-	10,00
% argila	80,00	-	-	-	-	-	-	80,00
Profundidade (cm)	> 150	-	-	-	-	-	-	> 150

Tabela 5 – Valores de M , classe de estrutura, condutividade hidráulica saturada, e K para cada unidade de mapeamento.

UN. DE MAP.	M	s	Condutividade hidráulica saturada (in.h^{-1})	K ($\text{t.h.MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}$)
1	1557,292	2,167	0,2	0,01607
2	1378,125	2,000	0,2	0,01378
3	200,000	2,500	0,3	0,00660
4	200,000	2,500	0,3	0,00660
5	200,000	1,500	0,3	0,00231
6	200,000	2,500	0,3	0,00660
7	789,063	2,500	0,2	0,01099
8	1557,292	2,167	0,2	0,01607

As unidades de mapeamento 1 e 8, ambas compostas por 3 tipos distintos de solo, que apresentam os maiores valores de erodibilidade – $0,016 \text{ t.h.a.h.ha}^{-1}.\text{MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}$ - recobrem 16,5% da superfície da bacia hidrográfica.

Os maiores valores de erodibilidade são observados justamente nas porções onde o fator topográfico também o é, o que configura maior suscetibilidade do solo com relação a relevos mais acidentados.

Galdino et al. (2004) encontraram valores de erodibilidade entre $0,001 \text{ t.h.a.h.ha}^{-1}.\text{MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}$ e $0,005 \text{ t.h.a.h.ha}^{-1}.\text{MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}$ para a bacia hidrográfica do Alto Taquari, localizada no Mato Grosso do Sul.

5 e 6, com K igual a $0,002 \text{ t.h.MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}$ e $0,007 \text{ t.h.a.h.ha}^{-1}.\text{MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}$, respectivamente.

Como pode-se verificar, os valores de erodibilidade dos solos variam pouco, entre 0 e $0,016 \text{ t.h.MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}$, sendo o valor médio de K igual a $0,009 \text{ t.h.MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}$ (Tab.5 e Fig. 7).

Gómez (2012) encontrou valores de K para todo o território brasileiro, obtendo valores médios entre $0,0060 \text{ t.h.a.h.ha}^{-1}.\text{MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}$ e $0,00439 \text{ t.h.a.h.ha}^{-1}.\text{MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}$.

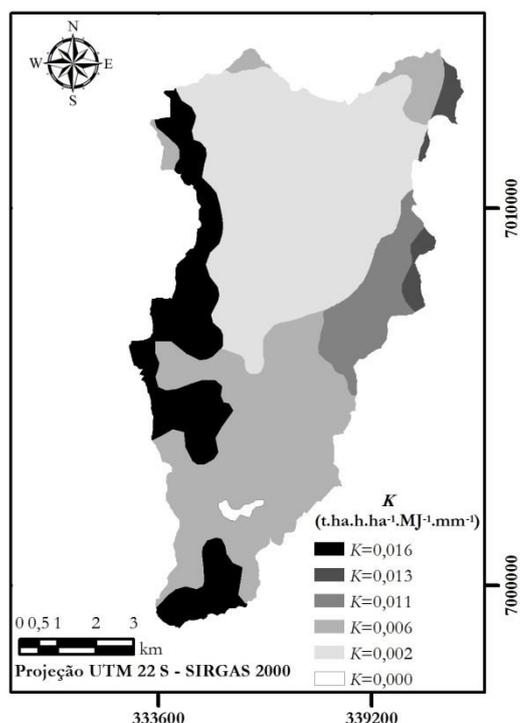


Figura 7 – Erodibilidade da bacia hidrográfica do lajeado São José.

Fator LS

Os valores do fator topográfico na bacia hidrográfica do Lajeado São José variam entre 0 e 11,719, sendo que o valor médio para a área é de 0,236 (Fig. 8). Mediante os valores de LS obtidos, observou-se a predominância de valor zero. Este fato contribui na redução de taxas de escoamento superficial, fazendo com que a erosão laminar seja desfavorecida. Nestes casos o relevo não é promotor da aceleração, mas sim amenizador dos processos erosivos.

As vertentes consideradas mais declivosas estão localizadas de forma predominante na porção oeste da bacia hidrográfica, região com maior altimetria. Neste caso a participação do relevo influencia no aumento da aceleração da perda de solo em função do aumento de LS .

Galdino et al. (2004) encontrou a faixa de variação do fator LS para a bacia hidrográfica do Alto Taquari, sendo esta compreendida entre 0,01 e 166,00.

Silva (2008) determinou o fator topográfico para o município de Sorocaba, e encontrou uma variação do fator entre 0 e 100.

Diante do exposto, apesar de serem inferiores, os valores de LS encontrados neste trabalho apresentam-se como coerentes.

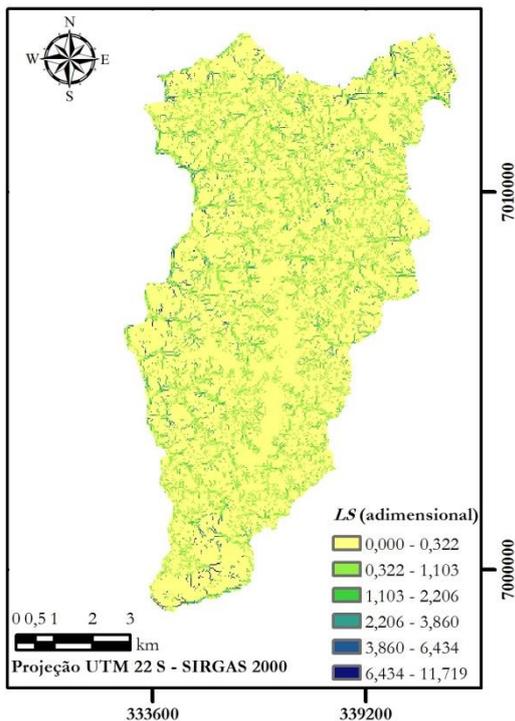


Figura 8 – Fator topográfico da bacia hidrográfica do lajeado São José.

Fator CP

Atualmente, o principal uso da bacia hidrográfica do Lajeado São José é agrícola, ocupando cerca de 43,87% da área da bacia (Fig. 9 e Tab. 6).

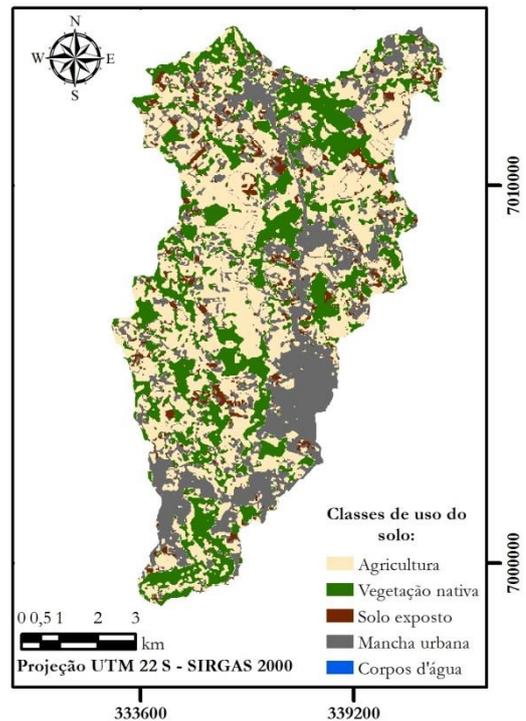


Figura 9 – Mapa de uso do solo atual da bacia hidrográfica do Lajeado São José.

Tabela 6 – Classes de uso do solo, área de ocupação em hectares e em porcentagem com relação à área total da bacia hidrográfica.

Classe de uso do solo	Área atual	
	(ha)	(%)
Agricultura	3348,659	43,87
Vegetação	1955,337	25,62
Mancha urbana	1945,703	25,49
Solo exposto	380,630	4,99
Cursos d'água	2,116	0,03

No fator CP , os valores estimados a partir do índice de $NDVI$ variaram entre 0 e 0,586. O valor médio do fator para toda a área da bacia hidrográfica é de 0,352 (Fig. 10).

Mediante análise espacial, foi possível observar que os maiores valores de C foram obtidos justamente nas porções de área compostas por urbanização. Essa é uma das principais diferenças entre os 2 métodos aplicados para obtenção do fator C , pois quanto são utilizados valores tabelados, os usos de solo exposto e a agricultura é que apresentam os maiores valores de C .

De acordo com Righetto (1998), para solo exposto, que não possui qualquer tipo de proteção contra a erosão, o valor de C deve ser 1, em contrapartida, para solo que possui vegetação nativa densa, o valor de C deve ser 0,01. Grande parte da área da bacia hidrográfica é ocupada por atividades de agricultura e de urbanização, obtendo ainda fragmentos de vegetação nativa, por este motivo, pode-se afirmar que existe, de certa forma, proteção contra erosão, e em virtude disso o valor de C não chega a 1 na bacia hidrográfica do Lajeado São José.

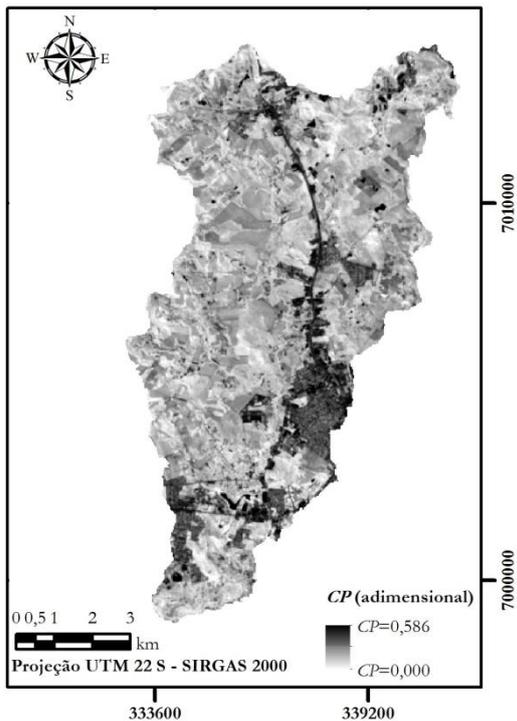


Figura 10 – Fator fator de cobertura, uso e manejo do solo da bacia hidrográfica do lajeado São José utilizando *NDVI* como base para cálculo.

Estimativa de perda de solo

Na estimativa utilizando o *C* obtido a partir do *NDVI* o potencial de produção de sedimentos da bacia hidrográfica variou entre 0 e 30,166 t.ha⁻¹.mês⁻¹, sendo que a taxa média é de 3,88 t.ha⁻¹.ano⁻¹ (Fig. 11), enquanto na estimativa utilizando os valores de *C* tabelados, o potencial de produção variou entre 0 e 26,652 t.ha⁻¹.mês⁻¹, sendo a taxa média de produção de sedimentos igual a 2,41 t.ha⁻¹.ano⁻¹ (Fig. 12). Sendo assim, a estimativa com valores de *C* tabelados é aproximadamente 38% menor do que aquela obtida a partir do *NDVI*. Isso evidencia a importância de se estimar o parâmetro *C* adotando o melhor método possível. Apesar de o cálculo a partir do *NDVI* resultar em uma estimativa mais pessimista, tem uma falha que é a previsão de maiores taxas de produção de sedimento na área urbana.

Vale destacar que a *USLE* possui capacidade de estimar a perda de solo causada por erosões do tipo laminar, e não leva em conta o processo de deposição, de acordo com Wischmeier e Smith (1978). Logo, os valores obtidos neste trabalho referem-se à produção de sedimentos não considerando-se a ocorrência do fenômeno de deposição de sedimentos.

As maiores taxas de perda de solo foram observadas nas áreas mais próximas ao divisor de águas, consequentemente, as áreas com maior altimetria e encostas mais declivosas. Diante do exposto, pode-se afirmar que apesar de a *USLE* estimar apenas a erosão, todos os resultados obtidos confirmam a teoria do ciclo hidrossedimentológico, que prevê que áreas de cabeceira são aquelas onde ocorre a maior parte da erosão na bacia hidrográfica. Além disso, observando-se espacialmente, as áreas com maiores taxas de perda de solo coincidem com

as áreas que apresentam maiores valores de *K* e de *LS*, o que implica em dizer que, quanto maiores os valores de erodibilidade e fator topográfico, maior a perda de solo.

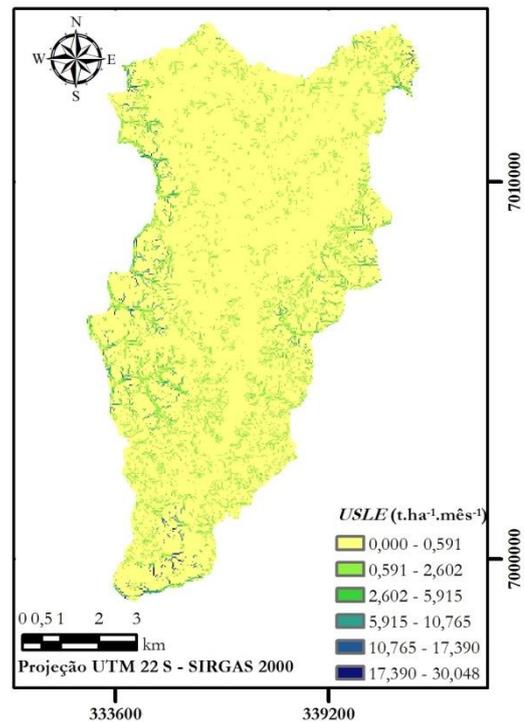


Figura 11 – *USLE* para a bacia hidrográfica do lajeado São José utilizando o *C* determinado a partir do *NDVI*.

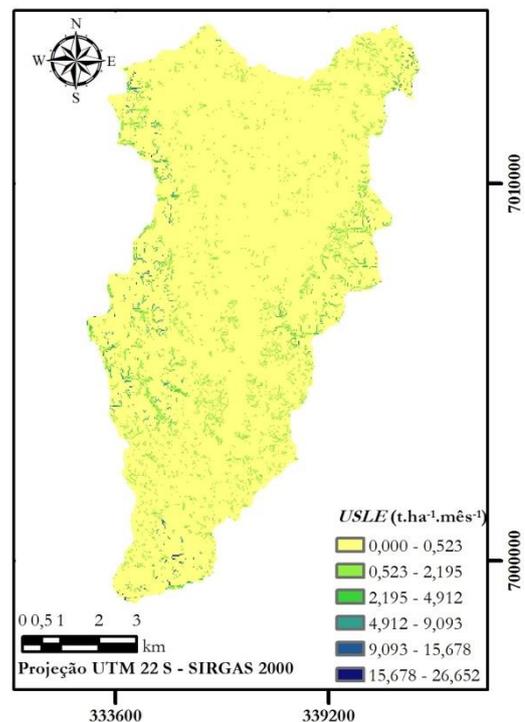


Figura 12 – Taxa atual de potencial de produção de sedimento da bacia hidrográfica do lajeado São José utilizando os valores de *C* tabelados.

Verificando a Tabela 7, pode-se constatar que a taxa de produção de sedimentos pode variar bastante, sendo esta dependente do uso principal do solo, e também do tamanho da área de estudo. Para tanto, considerando

que a maior parte dos solos da bacia hidrográfica do Lajeado São José são utilizados para fins de agricultura, constata-se que os valores encontrados neste trabalho são bastante coerentes.

Bassi (1990) estimou a produção de sedimentos na bacia hidrográfica do Lajeado São José a partir de correlações entre a turbidez e a concentração de sedimentos em suspensão, e também de dados de turbidez e vazão diários entre abril de 1988 e outubro de 1989, totalizando 28000 toneladas. Isto, corresponde a uma taxa de produção de sedimentos de $2,46 \text{ t.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$. O método usado por Bassi (1990) determina a produção de sedimentos, ou seja, a quantidade de sedimentos que chegam ao exutório da bacia hidrográfica, diferente do método utilizado neste trabalho, que estima a erosão, ou seja, a quantidade de partículas de solo desprendidas/geradas em toda a área da bacia hidrográfica, e não somente o que sai pelo exutório. Esta pode ser a principal justificativa pela diferença existente entre o valor encontrado por Bassi (1990), e o valor encontrado neste trabalho a partir da utilização dos valores de *C* definidos pelo *NDVI*. Contudo, o fato de floresta nativa ter sido substituída por outros usos também pode ter contribuído no aumento desta taxa.

Tabela 7 – Taxas de perda de solo para suas respectivas áreas de estudo e principais usos do solo.

LOCAL	UF	ÁREA (ha)	USO PRINCIPAL DO SOLO	TAXA DE PERDA DE SOLO ESTIMADA ($\text{t.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$)	REFERÊNCIA
Município de Paraíso das Águas	MS	503500	Campo sujo, pastagem e agricultura	0 a 1307,32	BARBOSA et al. (2015)
Fazenda Candin	SP	1500	Patagem	0,39 a 42	SILVA et al. (2010)
Bacia hidrográfica do Alto Taquari	MS	2845060	Agricultura	0 a 200	GALDINO et al. (2004)
Bacia hidrográfica do Ribeirão Maringá	PR	9037	Agricultura	0 a 20	SANTOS, MORAIS (2012)
Bacia hidrográfica do Córrego Arapuca	PR	169	Agricultura	0 a 30	PETSCH, MONTEIRO (2011)
Sub-bacia hidrográfica do Rio	SC	5256	Agricultura	0 a 16	VIEIRA (2008)
Microbacia do Ceveiro	SP	1990	Cultura de cana-de-açúcar	$4,5.10^{-9}$ a $107,2.10^{-9}$	WEILL, SPAROVEK (2008)
Bacia hidrográfica do Mogi-Guaçu	SP	1136094	Cultura de cana-de-açúcar	0 a $1,487.10^{-6}$	WEILL, ROCHA, LAMPARELLI (2001)
Bacia hidrográfica do Rio São José	CE	4100	Vegetação rasteira	0 a 200	COSTA et al. (2013)
Município de Sorocaba	SP	44900	Urbanização	400 a 1600	SILVA (2008)

Estimativa da produção de sedimentos para 30 anos

Verificando-se a Figura 13 e a Tabela 8, pode-se constatar que seguindo a tendência estatística das

estimativas de Debastiani (2015), a área urbana terá um aumento de 18,43% em 30 anos.

Tabela 8 – Classes de uso do solo, área de ocupação em hectares e em porcentagem com relação a área total da bacia hidrográfica.

Classe de uso do solo	Área em 2046	
	(ha)	(%)
Agricultura	2356,008	30,87
Vegetação	1754,574	22,99
Mancha urbana	3352,350	43,92
Solo exposto	169,016	2,21
Cursos d'água	0,469	0,01

Mediante os resultados, a produção de sedimentos na bacia hidrográfica em 30 anos irá variar entre 0 e $26,652 \text{ t.ha}^{-1}.\text{mês}^{-1}$, sendo que a taxa de perda de solo chegará a $2,263 \text{ t.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ (Fig. 14).

Comparando este resultado com a produção atual de sedimentos na bacia hidrográfica, pode-se observar um declínio. Isto se deve ao fato de que a bacia hidrográfica do Lajeado São José tem como principal uso do solo a agricultura, que de acordo com a projeção realizada, terá uma redução de aproximadamente 13% em sua área.

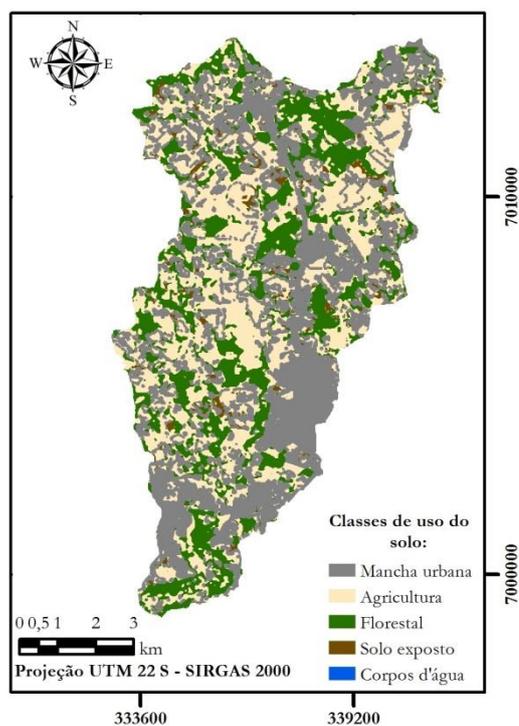


Figura 13 – Mapa de uso do solo para 2046 da bacia hidrográfica do Lajeado São José.

Contudo, a redução da taxa de produção de sedimentos não pode ser vista como positiva para o desenvolvimento da bacia hidrográfica. Com o aumento da área urbana a qualidade da água do Lajeado São José sofrerá modificações, já que os sedimentos podem atuar como portadores de uma série de poluentes que existem nestas áreas (CARVALHO, 2008). A elevada concentração de poluentes agregados aos sedimentos pode ser prejudicial, principalmente, porque eles podem ser portadores de elementos como metais pesados, hidrocarbonetos, agrotóxicos e patógenos, concordam Collischonn e Tucci (1998).

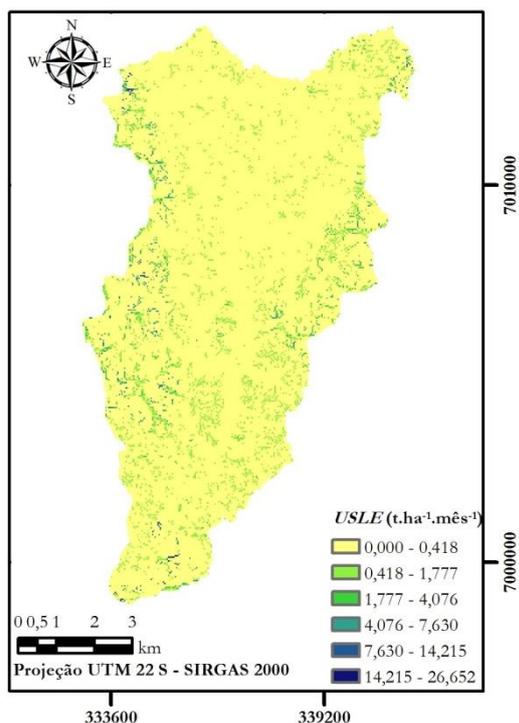


Figura 14 – USLE para a bacia hidrográfica do Lajeado São José em 30 anos.

CONCLUSÕES

Quando devidamente aplicados, os modelos empíricos de previsão de erosão podem ser considerados ferramentas adequadas para o estudo e análise de todos os fatores que interferem nos processos erosivos e também para auxílio em tomadas de decisões sobre a gestão do uso do solo. Apesar de apresentar certas limitações, a USLE permite não só a determinação da erosão do cenário atual como também possibilita a simulação de cenários futuros.

Os dados de entrada utilizados neste trabalho foram obtidos gratuitamente, e em virtude disso podem não apresentar elevada precisão. Este estudo demonstrou que as perdas de solo na bacia hidrográfica do Lajeado São José atualmente variam entre 0 e 30,166 t.ha⁻¹.mês⁻¹, apresentando uma média de 3,88 t.ha⁻¹.ano⁻¹ pelo método de estimativa utilizando *C* a partir do NDVI, enquanto pelo método utilizando *C* tabelado as perdas variam entre 0 e 26,652 t.ha⁻¹.mês⁻¹, apresentando uma média de 2,41 t.ha⁻¹.ano⁻¹.

Com vistas para a compreensão de processos erosivos, mediante a realização deste trabalho pode-se verificar que a dinâmica erosiva sofre influência principalmente por parte dos fatores *K* e *LS*. Então, nas áreas onde tem-se ocorrência de valores mais altos desses fatores deve-se preservar a vegetação nativa e evitar o uso do solo para agricultura ou realizá-la com a adoção de práticas conservacionistas. No caso da bacia do Lajeado São José, estas áreas se concentram próximas ao divisor.

Considerando-se a projeção da perda de solo para 30 anos, pode-se afirmar que esta chegará a uma taxa de chegará em 2,263 t.ha⁻¹.ano⁻¹. Este declínio se deve ao fato de que a bacia hidrográfica do Lajeado São José tem como principal uso do solo a agricultura. Apesar de a taxa de produção de sedimentos reduzir, este fato não pode ser

visto como uma melhora para o desenvolvimento da bacia hidrográfica.

Neste sentido, os resultados deste estudo apresentam-se de grande relevância, pois podem ser utilizados como ferramenta para a gestão de recursos hídricos e planejamento do uso e manejo dos solos da região.

Diante do exposto, ressalta-se a importância do emprego de práticas conservacionistas na bacia hidrográfica, pois somente por meio destas é que a taxa de produção de sedimentos da bacia hidrográfica pode ser reduzida ou mantida sem que fatores ambientais da bacia sejam afetados.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter tido a oportunidade de desenvolver este trabalho tão gratificante; à minha família e meu namorado por todo apoio prestado nos momentos de dificuldade; ao meu amigo Régis Feyh pelo auxílio prestado na programação dos dados de precipitação; e a professora Aline de Almeida Mota por toda paciência durante a realização do trabalho e por acreditar na minha capacidade para desenvolver esta pesquisa. A todos, muito obrigada!

REFERÊNCIAS

- ARNOLD, J. G. R.; et al. Large area hydrologic modeling and assessment. Part 1: Model development. *Water Resources Association*. v. 34. n. 1. 1998. p. 73-89.
- BARBOSA, A. F. et al. Aplicação da Equação Universal de Perda do Solo (USLE) em Softwares Livres e Gratuitos. *Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ*. v. 38, n. 1. 2015. p.170-179.
- BASSI, L. *Estimativa da produção de Sedimentos na Bacia Hidrográfica do Lajeado São José, Chapecó, Santa Catarina*. 1990. 87 p. Dissertação (Mestrado em Hidrologia Aplicada) - Universidade Federal de Santa Maria, Curso de Pós Graduação em Agronomia, Santa Maria, 1990.
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. *Conservação do Solo*. Piracicaba, SP: Editora Livrocetes, 1985. 392p.
- BELLINASSO, T. B.; PAIVA, J. B. D. Avaliação da Produção de Sedimentos em Eventos Chuvosos em uma Pequena Bacia Hidrográfica Semi-Urbana de Encosta. *RBRH — Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. v. 12, n.4, p. 169-181, 2007.
- CARVALHO, N. O. *Hidrossedimentologia prática*. 2ª ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2008. 599 p.
- CHAPECÓ. Lei complementar nº 541, de 26 de novembro de 2014. *Aprona o Plano Diretor de Chapecó - PDC*. Gabinete do Prefeito Municipal de Chapecó, Estado de Santa Catarina, em 26 de novembro de 2014.
- COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. *Drenagem urbana e controle de erosão*. In: VI Simpósio Nacional de Controle da Erosão. Presidente Prudente, 1998.
- COSTA, K. V. M. et al. *Estimativa de perda de solo distribuída em uma bacia hidrográfica de pequeno porte através de técnicas de*

- geoprocessamento. Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto-SBSR. Foz do Iguaçu. INPE. 2013. Disponível em:<<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2013/files/p0846.pdf>>. Acesso em: 04 nov. 2016.
- DEBASTIANI, M.L. *Estudo da evolução temporal do coeficiente de deflúvio no município de Chapecó-SC*. 2015. 21 f. Trabalho de conclusão de curso de graduação (Graduação em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal da Fronteira Sul, Chapecó, 2015.
- ELLIOT, W.; LAL, R. Erodibility and erosivity. *Soil Erosion Research Methods*. Soil and Water Conservation Society. e ed. p. 181-208. 1994.
- EMBRAPA. *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. 4. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2014.
- EMBRAPA. *Solos do Estado de Santa Catarina*. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, n. 46. Rio de Janeiro, 2004.
- FOSTER, G. R.; et al. Estimating Erosion and Sediment Yield on Field-Sized Areas. *Transactions of the ASAE*. 1981. v. 24, n. 5, p. 1253-1262.
- GALDINO, S., et al. Erosão Potencial Laminar Hídrica na Bacia do Alto Taquari. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. v.9, n.2. 2004. p.125-133.
- GÓMEZ, J. D. P. *Estimativa de erosão pela Equação Universal de Perda de Solo (USLE) e transferência de sedimentos para todo território Brasileiro*. São Paulo: Universidade de São Paulo - Escola Superior Agrícola de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2012. 90 p. (Dissertação de Mestrado).
- HUDSON, N. W. Soil conservation. 2ª ed. *Ithaca: Cornell University Press*. 1973. 320 p.
- ICKIS, J. C.; RIVEIRA, J. Cerro Cahui. *Journal of Business Research*. v. 38, n. 1, 1997. p. 555-566.
- MERRIT, W. S. A review of erosion and sediment transport models. *Environmental Modelling & Software*. v. 18. p. 761-199. 2003. Disponível em:<<http://www.fisicadosolo.ccr.ufsm.whoos.com.br/downloads/ Disciplinas/Modelagem/Merritt%202006.pdf>>. Acesso em: 11 nov. 2016.
- MITASOVA, H.; et al. Modeling topographic potential for erosion and deposition using GIS. *International Journal of Geographical Information Systems*. v. 10, n. 5, p. 629-641, 1995.
- MORGAN, R. P. C. *Soil Erosion and Conservation*. Longman Group Limited: 2 ed. Essex, UK. 1995.
- PEIXOTO, A. M.; et al. *Enciclopédia agrícola brasileira*. v.4. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2002.
- PETSCH, C.; MONTEIRO, J. B. *Estimativa de perda de solo na bacia do Córrego Arapuca (1980-2009), Engenheiro Beltrão – PR*. I Seminário Internacional dos Espaços da Fronteira. UNIOESTE. 2011. Disponível em:<<http://cac.php.unioeste.br/eventos/geofronteira/anais2011/Arquivos/Artigos/GESTAO/Artigo65.pdf>>. Acesso em: 04 nov. 2016.
- PINET, P.; SOURIAI, M. Continental erosion and large-scale relief. *Tectonics*. v.7, n.3, p. 563-582, 1988.
- REICHARDT, K.; TIMM, L. C. *Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações*. Barueri: Manole, 2004. 478 p.
- RENARD, K.G. et al. *Predicting soil erosion by water - a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*. United States Department of Agriculture (USDA). Washington, DC. Agricultural Handbook, 1997. n. 703. 407 p.
- RIGHETTO, A. M. *Hidrologia e recursos hídricos*. São Carlos: EESC/USP, 1998. 840 p.
- SANTA CATARINA. *Atlas escolar de Santa Catarina*. Secretaria de Estado e Coordenação Geral e Planejamento, Subsecretaria de Estudos Geográficos e Estatísticos. Rio de Janeiro, Aerofoto Cruzeiro, 1991.
- SANTOS, M. L.; MORAIS, E. S. Produção de sedimentos em bacia hidrográfica de pequena ordem: uso de modelos matemáticos, bacia do Ribeirão Maringá, Paraná - Brasil. *Revista Brasileira de Geomorfologia*. v.13, n.2, p. 139-150, 2012.
- SCHAAP, M.G. et al. ROSETTA: a computer program for estimating soil hydraulic properties with hierarchical pedotransfer functions. *J. Hydrol.*, v.251, n.3-4, p.163-176, 2001.
- SCHICK, J.; et al. Erosividade das chuvas de Lages, Santa Catarina. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. v. 38 p. 1890-1905, 2014.
- SILVA, A. M. Potencial natural de erosão no município de Sorocaba, São Paulo, Brasil. *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestrutura Civil*. v.8, n. 1. p. 5-13, 2008.
- SILVA, F. G. B. et al. 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.
- SONNEVELD, B.G.J.S.; NEARING, M.A. A nonparametric/parametric analysis of the Universal Soil Loss Equation. *Catena*. v. 52. p. 9– 21. 2003.
- SUMMERFIELD, M.A.; HULTON, N.J. Natural controls of fluvial denudation rates in major world drainage basins. *Journal of Geophysical Research*. Washington. v.99, n. B7, 1994. p. 13871-138831994.
- TOMBUS, F. E.; et al. *Assessment of soil erosion based on the method USLE, Corum Province example*. FIG working week, Knowing to manage the territory, protect the environment, evaluate the cultural heritage. Rome, Italy. 2012. p. 1-11.
- TUCCI, C. E. M. *Hidrologia: ciência e aplicação*. 2ed. Porto Alegre: ABRH, 1993. 943 p.
- TUCKER, C. J. Red and Photographic Infrared Linear Combinations for Monitoring Vegetation. *Remote Sensing Environment*. v. 8, n. 2, p. 127-150, 1979.

USDA. *From the Surface Down: An introduction to Soil Surveys for Agronomic Use*. 2 ed. Washington, 2010. Disponível em: <https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs142p2_053238.pdf>. Acesso em: 11 nov. 2016.

VALVASSORI, M. L.; BACK, A. J. Avaliação do potencial erosivo das chuvas em Urussanga, SC, no período de 1980 a 2012. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. v. 38, n. 3, p. 1011-1019, 2014.

van der KNIJFF, J.M.; JONES, R.J.A.; MONTANARELLA, L. *Soil Erosion Risk Assessment in Europe*. Ispra: European Soil Bureau. Joint Research Centre. 2000.

VERLENGIA, F.; GARGANTINI, H. Determinação de matéria orgânica em solos- estudo comparativo de métodos. *Bragantia*. Boletim científico d Instituto Agrônômico do Estado de São Paulo. v.27, n.3, 1968.

VIEIRA, V. F. Estimativa de perdas de solo por erosão hídrica em uma sub-bacia hidrográfica. *Geografia*. v.17, n.1, p. 73-81, 2008.

WALTRICK, P. C.; et al. Estimativa da erosividade de chuvas no estado do Paraná pelo método da pluviometria: atualização com dados de 1986 a 2008. *Revista Brasileira de Ciência do solo*. v. 39, n. 1, p. 256-267, 2015.

WEILL, M. A. M.; ROCHA, J. V.; LAMPARELLI, R. A. *Potencial natural de erosão e riscos de degradação na bacia hidrográfica do Rio Mogi-Guaçu (SP)*. VII Simpósio Nacional de Controle de Erosão. Goiânia, 2001. Disponível em: <http://www.labogef.iesa.ufg.br/links/simposio_erosao/articles/T033.pdf>. Acesso em: 04 nov. 2016.

WEILL, M. A. M.; SPAROVEK, G. Estudo da erosão na microbacia do Ceveiro (Piracicaba, SP). i - estimativa das taxas de perda de solo e estudo de sensibilidade dos fatores do modelo EUPS. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. v. 32, n. 2, p.801-814, 2008.

WILLIAMS, J. R. Sediment – yield prediction with universal equation using runoff energy factor. *Proceedings of the sedimentYield Workshop, USDA Sedimentation Laboratory, Oxford, Mississippi*. 1975.

WISCHMEIER, W. H. A rainfall erosion index for a universal soil-loss equation. *Soil Science Society of America Journal*. v.23, n.3. 1959. p.246-249.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. *Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning*. USDA, Agriculture Handbook n° 537 Dep. Agric. 1978.

YOUNG, R. A.; et al. AGNPS: Agricultural Non-Point Source pollution model: A large watershed analysis tool. USDA, *ARS Conservation Research Report*. 77 p. 1989.