

COMPARAÇÃO DENTRE ESTIMATIVAS DE PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS NA BACIA DO RIO POTIRIBU

*Christopher Freire Souza*¹; *André Mito Dornelles*²; *Laura Albuquerque Acioli*³ & *Gustavo Merten*⁴

RESUMO - A erosão mostra-se como problema grave para administração pública, principalmente, pelo aumento progressivo da quantidade de áreas atingidas, quer pela deficiência do sistema de drenagem em controlar águas pluviais a descargas similares à drenagem natural, pelo uso desordenado do solo ou pela condição de fragilidade dos solos envolvidos nos processos erosivos. Os métodos mais comumente empregados para estimar a produção de sedimentos são comparados neste estudo, apresentando resultados com diferença de 41 vezes em magnitude, o que evidencia a necessidade de elaboração de técnicas mais precisas. A bacia do rio Potiribu (RS) foi estudada em virtude da quantidade de dados disponíveis, o que não foi suficiente para que as diferentes técnicas aplicadas apresentassem resultados similares.

ABSTRACT – Soil erosion has been pointed out as a big trouble to public administration, mainly, due to progressive increase on the amount of impacted areas, caused by the incapacity of stormwater drainage systems in controlling it within natural features, disordered soil use or by the soil fragility. The methods with greater application to predict sediment yield are compared herein, presenting differences rounding 41 times in magnitude, which evidences the necessity of evaluation more accurate techniques. Potiribu stream watershed was studied due to its amount of data collected, which were not able to bring the results to a common value.

Palavras-chave: USLE; Protocolo ANA; Curva de permanência

¹ Doutorando do PPGRHSA do Instituto de Pesquisas Hidráulicas – IPH / UFRGS. E-Mail: cfsouza@ppgiph.ufrgs.br

² Mestrando do PPGRHSA do Instituto de Pesquisas Hidráulicas – IPH / UFRGS. E-Mail: andred@ceee.com.br

³ Doutoranda do PPGRHSA do Instituto de Pesquisas Hidráulicas – IPH / UFRGS. E-Mail: laura@ppgiph.ufrgs.br

⁴ Professor do Instituto de Pesquisas Hidráulicas - IPH / UFRGS. E-mail: merten@iph.ufrgs.br

INTRODUÇÃO

A associação da degradação das bacias hidrográficas, principalmente pela ação antrópica (alteração do uso do solo), aos fenômenos climáticos naturais resulta na perda de solo (sedimento) em quantidades maiores que as produzidas em centenas de anos em condições de equilíbrio natural (Simões & Coiado, 2001). O aumento da taxa de sedimento transportado para os corpos d'água (rios e reservatórios) prejudica a qualidade das águas superficiais, além de servir como veículos a outros poluentes, que se encontram adsorvidos a estes. Quando se atinge a insuficiência dos corpos receptores em transportar sedimentos, estes se depositam em canais de irrigação, rios, estuários, reservatórios, portos, reduzindo sua capacidade hidráulica.

Características de quantidade e qualidade dos sedimentos transportados aos rios, além de informar sobre as características e/ou estado da bacia hidrográfica, apresentam grande relevância para a manutenção de ecossistemas, planejamento e aproveitamento dos recursos hídricos de uma região, seja para análise de viabilidade de intervenção antrópica para abastecimento ou irrigação, ou para dimensionamento de obras hidráulicas. O conhecimento das características dos sedimentos gerados em cada bacia hidrográfica e transportados pelos corpos d'água se apresenta, portanto, como meta pertinente ao desenvolvimento adequado de políticas de gestão de recursos hídricos.

Este trabalho apresenta uma breve comparação entre diferentes métodos de estimativa de produção de sedimentos que necessitem de poucos dados.

OBJETIVOS

O presente trabalho apresenta como objetivo comparar estimativas de produção de sedimentos por métodos simples e que se baseiam nas características regionais, i.e. método da Equação Universal de Perda de Solo (USLE), e na medição sedimentométrica direta apoiados na determinação de curva-chave de sedimentos, i.e. o protocolo da ANEEL (Carvalho *et al.*, 2000a) e o método da curva de permanência apresentado por Carvalho (1994).

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A estimativa de produção de sedimentos em bacias hidrográficas é efetuada mediante emprego de modelos, podendo estes ser classificados quanto à sua estrutura e escala (De Paiva, 2001a). Quanto à estrutura, classificam-se os modelos em empíricos, os quais relacionam concentração e vazão, ou conceituais (semi-conceituais, pois normalmente apresentam algum empirismo em sua formulação)

equacionando os processos de transformação e transporte de poluentes na bacia vertente. Quanto à escala, os modelos podem ser classificados em globais, i.e., consideram a bacia vertente como uma unidade homogênea em toda a sua superfície e desconsideram os processos de transformação e transporte, ou distribuídos, quando consideram heterogeneidades do clima, solo, vegetação, relevo e ocupação da bacia vertente.

Modelos Empíricos

Os modelos empíricos são assim designados por não serem fundamentos na física dos processos, mas em formulações baseadas, principalmente, na regressão de algumas variáveis medidas (concentração de sólidos suspensos, turbidez, vazão) conduzindo à estimativa da variável desejada (descarga sólida). Trata-se, normalmente, de modelos de aplicação simples, mas com características peculiares por ter um horizonte de aplicação vinculado às características das variáveis utilizadas no ajuste dos modelos.

Dentre os modelos empíricos utilizados para estimativa de produção de sedimentos mais comumente empregados encontram-se métodos associados à determinação da curva-chave de sedimentos incluindo a utilização de dados de vazão média (incentivado pelo protocolo da ANEEL; Carvalho *et al.*, 2000) e o método da curva de permanência (Carvalho, 1994). No entanto, estes métodos apresentam limitação por normalmente subestimar o valor de descarga sólida (Ferguson, 1986 *apud* Phillips *et al.*, 1999) sendo o grau de subestimação relacionado ao grau de dispersão dos pares de dados na curva-chave. Asselman (2000) mostrou que estimativas de fluxo de longo prazo de sedimentos baseados em curva-chave obtida pela transformação logarítmica de dados e regressão obtida pelos mínimos quadrados subestimaram o fluxo de sedimentos em valores que variaram entre 10 a 50%.

Protocolo da ANEEL (Carvalho et al., 2000a)

O protocolo da ANEEL para estimativa de produção de sedimentos sugere a determinação, por Regressão Linear, de uma curva ajustada (curva-chave de sedimentos) a todos os pares de valores de Q_{ss} e Q . De posse da equação da curva e da vazão média de longo período, determina-se a descarga líquida média anual.

Método da curva de permanência (Carvalho, 1994)

Por este método, os resultados da curva de permanência são agrupados em classes de frequência de ocorrência, as quais têm seus valores médios de produção de sedimentos, provenientes da

transformação por curva-chave, multiplicados pela frequência que representam. A estimativa de produção de sedimentos para a bacia é obtida da soma destes resultados.

Medições Sedimentométricas no Brasil

Como ambos os métodos ora apresentados dependem da qualidade das medições sedimentométricas realizadas, a caracterização destas mostra-se interessante para melhor compreensão das potenciais limitações das estimativas realizadas.

As medições sedimentométricas visam a determinação da descarga sólida total transportada pelo curso d'água, definida (De Paiva, 2001b) como a soma da descarga sólida transportada por arrasto de fundo (Q_{sf}) com a descarga sólida em suspensão (Q_{ss}). A descarga sólida em suspensão (Q_{ss}) é composta pela descarga de material em suspensão proveniente do leito do rio (Q_{sl}) e pela descarga de material em suspensão proveniente da bacia hidrográfica (Q_{sd}).

No Brasil, no entanto, apenas medições de concentração de sólidos suspensos são realizadas (quatro vezes por ano), possibilitando a determinação da descarga de sedimentos em suspensão (Q_{ss}), por intermédio da multiplicação das concentrações de sedimentos (C_s) do dia pela vazão líquida (Q).

Modelos Conceituais

Segundo De Paiva (2001a), a maior parte dos modelos globais para a estimativa de produção de sedimentos em pequenas bacias tem origem na Equação Universal da Perda de Solo (USLE). A variante mais empregada da USLE é a Equação Universal Modificada da Perda de Solo (MUSLE), que se presta a avaliações de eventos, em detrimento às estimativas médias de períodos longos (meses ou anos) realizadas pela USLE.

A USLE (Wischmeier & Smith, 1978 *apud* De Paiva, 2001a) é um modelo destinado a calcular a perda de solo proveniente da erosão laminar e por sulcos, não prevendo deposição nem computando produção de sedimento por ravina e erosão das margens e fundo de canal.

A USLE é constituída por fatores naturais (erosividade das chuvas, erodibilidade dos solos, geometria da encosta afetada) que não podem ser modificados facilmente, e por fatores influenciados diretamente pelo homem (uso, manejo e práticas conservacionistas). Esta equação foi testada inicialmente para parcelas experimentais de 72,6 ft (22 m) com declividade de 9%, sendo sugerida para estudos em solos com textura média, comprimento de até 1000 ft (304,8 m) e declividades entre 0,5% e 50%. Embora seja uma equação empírica tem grande aceitação e emprego por ter sido obtida a partir de 10000 medições para as mais diversas condições de chuva e solos.

$$A = R.K.L.S.C.P \quad (\text{Equação 1})$$

Onde: A = perda de solo por unidade de área e tempo, em ton/ha.ano; R = fator de erosividade da chuva, que expressa a erosão potencial, ou poder erosivo da precipitação média anual da região (MJ.mm/(ha.h.ano)); K = fator de erodibilidade do solo, que representa a capacidade do solo de sofrer erosão por uma determinada chuva (ton.h/(MJ.mm)); L = fator topográfico que expressa o comprimento do declive; S = fator topográfico que expressa a declividade do terreno ou grau do declive; C = fator que expressa uso e manejo do solo e cultura; P = fator que expressa a prática conservacionista do solo.

Erosividade da chuva (R)

O fator R expressa a capacidade da chuva de causar erosão em uma área sem proteção. Uma das maneiras de expressá-la é através do índice EI30, que é o produto da energia cinética total da chuva pela intensidade máxima (mm/h), calculada para uma duração de 30 minutos. Porém, como os registros pluviográficos são escassos ou inexistentes em alguns países, incluindo o Brasil, diversos autores tentaram correlacionar o índice de erosão com fatores climáticos. Esses fatores são, por outro lado, de fácil medição e não requerem registros de intensidade de chuva.

Um dos métodos mais utilizados é o coeficiente proposto por Fournier, o qual determina a relação entre o quadrado da altura de chuva mensal (mm) e a altura de chuva anual (mm) (Zachar, 1982 *apud* Silva *et al.*, 2003). Lombardi Neto e Moldenhauer (1992 *apud* Silva *et al.*, 2003), com base neste coeficiente, ajustaram uma equação para determinação da erosividade considerando características brasileiras de precipitação, dada por:

$$EI = 89,823 \cdot \frac{P_m^2}{P_a} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde: EI = média mensal do índice de erosão (MJ.mm/(h.ha)); p_m = precipitação média mensal (mm); P_a = precipitação média anual (mm).

O valor anual da erosividade (R) é obtido somando-se os valores de erosividade mensal(EI).

Erodibilidade do solo (K)

O fator (K) de Erodibilidade do solo representa a suscetibilidade do solo em ser erodido e é dado pelas características intrínsecas do mesmo. Um dos caminhos para determinação deste fator é o nomograma de Wischmeier & Smith (1978 *apud* De Paiva, 2001a), construído a partir da expressão:

$$K = \frac{2,1 \cdot M^{1,14} \cdot 10^{-4} \cdot (12 - a) + 3,25 \cdot (b - 2) + 2,5 \cdot (c - 3)}{100} \quad (\text{Equação 3})$$

Onde: K = índice de erodibilidade do solo; a = percentagem de matéria orgânica; b = código para estrutura do solo (b=1 p/ estrutura granular muito fina; b = 2 p/ estrutura granular fina; b = 3 p/

estrutura granular, média ou grossa; b = 4 p/ estrutura em blocos, laminar ou massiva); c = código para classe de permeabilidade do solo (c = 1 p/ permeabilidade rápida; c = 2 p/ permeabilidade moderada a rápida; c = 3 p/ permeabilidade moderada; c = 4 p/ permeabilidade lenta a moderada; c = 5 p/ permeabilidade lenta; c = 6 p/ permeabilidade muito lenta) e; M = parâmetro que representa a textura do solo, dado por:

$$M = (\%silte + \%areia\ muito\ fina) \cdot (100 - \%argila)$$

Os valores obtidos pela (Equação 3) devem ser multiplicados por um fator de correção igual a 0,1317, para se obter os resultados em unidades de [(ton.ha.h)/(MJ.mm.ha)] (Cassol, 2000).

Carvalho (1994) divide os valores de K em classes de interpretação, descritas na Tabela 1.

Tabela 1. Classes de interpretação dos valores de K.

Intervalos de valores de K (ton.ha.h.MJ⁻¹.ha⁻¹.mm⁻¹)	Classes de interpretação
K < 0,0198	Erodibilidade baixa
0,0198 < K < 0,040	Erodibilidade média
K > 0,040	Erodibilidade alta

Fator Topográfico (LS)

Os fatores L e S são apresentados em conjunto e denominados “Fator Topográfico” (Equação 4). Comprimento do declive (L) representa a relação de perdas entre um declive de comprimento qualquer e um declive de 22 m de comprimento do mesmo solo, mesmas características de chuva, mesmo grau de inclinação e sob mesmas condições de manejo (De Paiva, 2001a). Grau do declive (S) é a relação de perdas de solo entre um declive qualquer e um declive de 9%, para as mesmas condições.

$$LS = \left(\frac{\lambda}{22}\right)^m \cdot (65,41 \cdot \text{sen}^2\theta + 4,56 \cdot \text{sen}\theta + 0,065) \quad (\text{Equação 4})$$

Onde: λ = comprimento do declive; θ = ângulo do declive; m = fator que depende da declividade do terreno.

O fator topográfico LS é de difícil obtenção quando se trabalha com grandes áreas (como bacias hidrográficas). Para tanto softwares que efetuam o cálculo do fator LS para toda uma região são utilizados, sendo empregado aqui o USLE-2D (Desmet & Goovers, 1996), o qual determina o fator LS através do Modelo Numérico do Terreno (MNT) em Sistema Geográfico de Informações (SIG).

Uso e manejo do solo (C)

O Fator C representa a razão entre as perdas de solo que ocorrem quando o solo recebe uma dada cobertura e manejo, e as perdas que ocorrem quando este mesmo solo está descoberto. O valor de C também possui difícil determinação, pois variados são os fatores que o influenciam. Dentre eles, pode-se citar: (a) Tipo de cobertura vegetal: restevas e plantas de hábito prostrado, ou plantas de copada e de

porte ereto; (b) Método de preparo do solo: plantio direto, reduzido ou convencional; (c) Cultivo contínuo ou rotação de culturas; (d) Distribuição anual da erosividade.

Práticas conservacionistas (P)

O fator de práticas conservacionistas representa a relação entre a de perda de solo esperada com determinada prática conservacionista e a obtida quando a cultura é plantada no sentido do declive (morro abaixo). Práticas comuns são o plantio em contorno, terraceamento e alternância de capinas.

“Taxa de entrega de sedimentos” (Sediment Delivery Ratio)

Para se obter a produção de sedimentos que aporta o corpo d’água, o valor da erosão bruta, encontrado através da USLE, deve ser multiplicado pelo fator SDR (*Sediment Delivery Ratio*), representando a “taxa de entrega de sedimentos”.

Dentre as formas de determinação do SDR, tem-se a (Equação 5), sugerida por Vanoni (1975) e a (Equação 6) que é dependente da declividade do canal (Williams & Berndt, 1972):

$$SDR1 = 0,42 \cdot A^{-0,125} \quad \text{(Equação 5)}$$

Onde A é dado em milhas quadradas.

$$SDR2 = 0,627 \cdot SLP^{0,403} \quad \text{(Equação 6)}$$

Onde SLP é a declividade do canal principal.

Aplicações no Brasil

Existem diferentes metodologias que podem ser utilizadas para determinação de descarga sólida em rios a partir da curva-chave (Phillips *et al.*, 1999). No Brasil é muito utilizada a curva-chave de sedimentos associada à curva de permanência das vazões (Carvalho, 1994) ou a utilização de vazões médias mensais (Carvalho *et al.*, 2000b) sendo ambos os procedimentos utilizados para determinação de descarga sólida de longo prazo. Na Tabela 2, observa-se os valores de produção de sedimentos para alguns rios brasileiros.

Tabela 2. Produção de sedimentos em rios brasileiros (Walling, 1988).

Rio	PS (ton/(km ² ano))
Solimões	470
Amazonas	106
Tocantins	29
Cuiabá	246
Uruguai	34
Jacuí	54
Vacacaí	296

Galdino et al. (2004) fizeram aplicação da equação universal para determinação da potencial erosão laminar hídrica na Bacia do Alto Taquari (28450,6 km²) chegando a valores próximos a 555,6 t/(ha.ano).

ÁREA EM ESTUDO

A região estudada localiza-se ao noroeste do Estado do Rio Grande do Sul na posição central do derrame basáltico sul-americano (Figura 1). O Rio Potiribu é um contribuinte da margem esquerda do Rio Ijuí, este último sendo afluente de margem esquerda do Rio Uruguai. Assim ele faz parte da bacia hidrográfica do Rio da Prata. A bacia estende-se para leste e sudeste, onde a cidade de Cruz Alta marca seu limite extremo.

A escolha desta bacia se deve às características da série de dados, considerada longa e consistente, com dados pluviométricos e fluviométricos de vazão e concentração de sedimentos disponíveis no banco de dados do Sistema de Informações Hidrológicas (HIDROWEB) da Agência Nacional de Águas – ANA (2005).

A região se caracteriza por intensa atividade agrícola, incluindo o cultivo de soja, trigo e aveia, sendo composto predominantemente por Latossolo e Terra Roxa. Considerou-se como exutório da bacia em estudo o posto fluviométrico da CPRM (quadrado verde), cujo nome é Ponte Nova do Potiribu e código 75185000. A área dessa bacia é de 610,1 km², e o comprimento do rio principal é de 65,57 km. As cotas máxima e mínima da bacia são, respectivamente, 518 m e 296,5 m.

Na Figura 1, pode-se observar a localização do Rio Potiribu, o contorno de sua bacia hidrográfica, bem como as estações pluviométricas (círculos vermelhos) mais próximas (Figura 1).

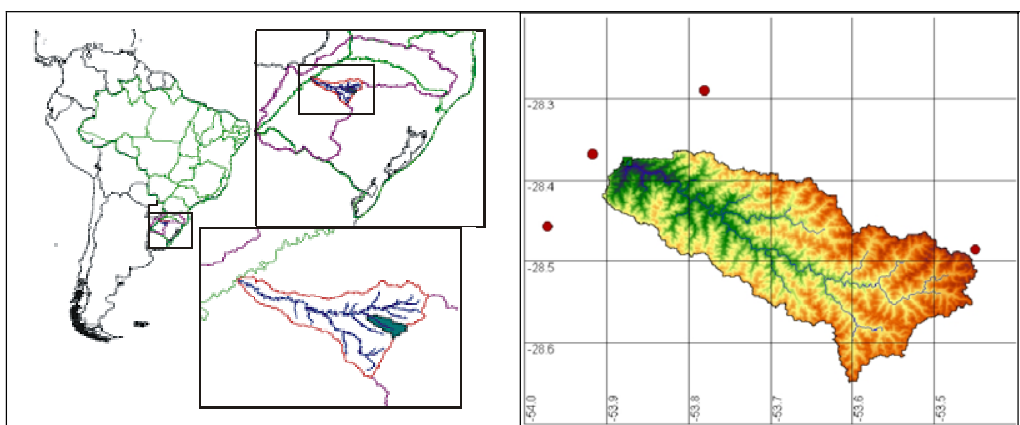


Figura 1. Bacia do Rio Potiribu.

METODOLOGIA

Estimativa pela Equação Universal de Perda de Solo - USLE

A estimativa se realiza com base na USLE (Equação 1) para determinação da erosão bruta, seguida da aplicação da “taxa de entrega de sedimentos” (*sediment delivery ratio*).

Erosividade da chuva (R)

Neste trabalho, a determinação da erosividade foi realizada para cada posto fluviométrico segundo a (Equação 2) desenvolvida por Lombardi Neto e Moldenhauer (1992 *apud* Silva *et al*, 2003), sendo interpolada de duas formas visando a comparação: método dos polígonos de Thiessen e inverso das distâncias dos pontos calculados.

Erodibilidade do solo (K)

Os dados de tipos de solo obtidos de mapas geológicos em escala 1:1.000.000 do Projeto RADAM Brasil (IBGE, 1986), foram aplicados à (Equação 3) de Wischmeier & Smith (1978 *apud* De Paiva, 2001a). Nestes mapas, mostram-se característicos da área em estudo os solos: TRe6 – Terra Roxa estruturada eutrófica; LEa1 – Latossolo Vermelho Escuro álico; LEHa – Latossolo Vermelho Escuro húmico álico; LRd1 – Latossolo Roxo distrófico. Os parâmetros para o cálculo do índice de erodibilidade para cada tipo de solo são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Parâmetros dos solos da área em estudo.

Código	Descrição	ar	si	a	b	c	M
TRe6	Terra Roxa Estruturada eutrófica	49	47	1,9	3	2	2397
LEa1	Latossolo Vermelho Escuro álico	21	45	1	2	2	3555
LEHa	Latossolo Vermelho Escuro húmico álico	42	30	1,4	2	2	1740
LRd1	Latossolo Roxo Distrófico	62	31	1,2	3	2	1178

Legenda: ar = % de argila, si = % de silte e areia muito fina.

Fator Topográfico (LS)

O fator topográfico foi determinado com base no Modelo Numérico do Terreno (Figura 1) utilizando o conjunto de rotinas desenvolvidas por Riso (1993).

Uso e manejo do solo (C)

O uso do solo foi determinado através de classificação de imagens de satélite Landsat (University of Maryland, 2005), onde foi verificada a presença de seis tipos de cobertura (Florestas; Pastagens; Lavouras; Solo descoberto; Urbano e Água - reservatórios e rios). Os tipos de cobertura “solo descoberto”, “urbano” e “lavoura” foram considerados pertencentes a um único grupo (lavoura), em virtude da pequena parcela de área “urbana” e do interesse em diminuir o grau de confusão de classes

(possivelmente solos expostos na imagem não o sejam permanentemente, mas apenas em períodos de troca de safra). Esta escolha pode acarretar em incertezas (valores diferentes da realidade) minimizando ou majorando a produção de sedimentos. A verificação da realidade de campo não foi realizada, a qual seria interessante para maior precisão.

As imagens foram classificadas seguindo o método de classificação supervisionado, atribuindo-se um valor de C para cada tipo de cobertura considerada: C = 0,004, p/ florestas e C = 0,042, p/ pastagens. Para as áreas de lavoura foi considerada uma predominância da sucessão Trigo-Soja, sendo utilizados os valores da Tabela 4.

Tabela 4. Valores de C para os usos do solo

Lavoura	Sistema	Fator C
Trigo	Convencional	0,34
	Reduzido	0,06
	Direto	0,04
Soja	Convencional	0,52
	Reduzido	0,09
	Direto	0,06

Práticas conservacionistas (P)

Quanto à avaliação das práticas conservacionistas (P) utilizadas, adotou-se plantio morro abaixo, o que corresponde ao valor uniforme e igual a 1, em virtude da ausência de informações.

“Taxa de entrega de sedimentos” (Sediment Delivery Ratio)

Para determinação da SDR foram empregadas as equações de Vanoni (1975, (Equação 5)) e de Williams & Berndt (1972, (Equação 6)).

Medições Sedimentométricas

Como no Brasil só são realizadas medições de concentração de sólidos suspensos, apenas a Q_{ss} será determinada.

Protocolo da ANA/ANEEL

Na aplicação da metodologia proposta no protocolo da ANA, o emprego da curva-chave de sedimentos se realizou aos dados diários e aos dados mensais para posterior determinação da descarga líquida média anual, possibilitando a comparação.

Curva de Permanência

Neste estudo, três curvas de permanência foram testadas, uma com valores diários, outra com valores diários médios para cada mês (todos os meses) e a última com valores diários médios mensais por ano (por exemplo, apenas 12 doze meses).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Produção de Sedimentos – USLE

Erosividade(R)

Para a bacia hidrográfica estudada no trabalho, foram identificados cinco postos pluviométricos nos arredores da bacia. Em virtude de suas posições relativas à bacia hidrográfica (Figura 1), optou-se por utilizar os postos listados na Tabela 5, que também mostra o resumo dos dados e a erosividade calculada para cada posto.

Tabela 5. Resumo dos postos pluviográficos.

Código	Nome	Início	Fim	Comprimento	Consistido	Erosividade R (MJ.mm/(ha.h.ano))
02853002	Belissário	03/1963	12/1980	17 anos	Não	7172,2
02853003	Conceição	08/1959	12/2001	42 anos	Sim	7028,7
02853006	Ijuí	05/1943	12/1976	34 anos	Sim	6811,4
02853010	Passo Faxinal	10/1957	12/2001	41 anos*	Sim	7071,5

* falha nos anos 1990, 1991 e 1992.

Através dos valores de erosividade e com a localização geográfica dos postos, gerou-se a matriz com valores de erosividade para cada ponto da bacia hidrográfica, através do Método de Thiessen e através de interpolação considerando-se a inversa proporcionalidade com a distância. A figura com a matriz calculada pelo método dos polígonos de Thiessen pode ser vista na Figura 2. A Figura 3 mostra os resultados obtidos através da interpolação pela distância entre os postos.

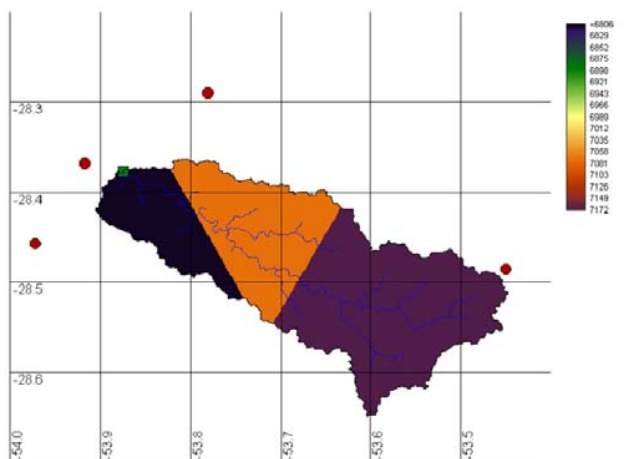


Figura 2. Erosividade pelo Método de Thiessen.

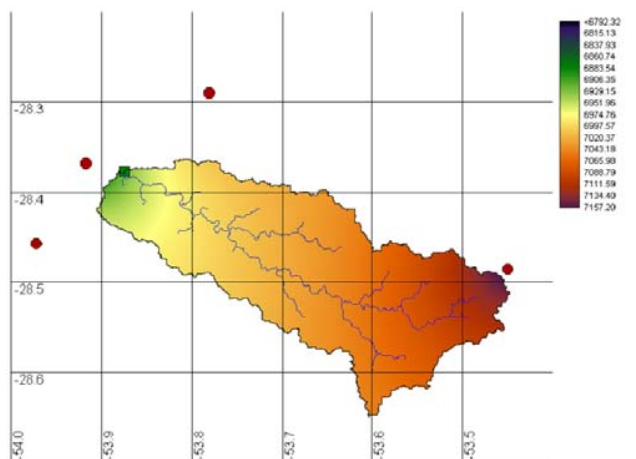


Figura 3. Erosividade interpolada pelo inverso da distância.

Erodibilidade do Solo (K)

O valor de K, para os solos da área do estudo, foi calculado pela (Equação 3), e classificado de acordo com a Tabela 6. A Tabela 7 apresenta o resumo dos dados de erodibilidade e a área de

ocorrência de cada tipo de solo na bacia. A Figura 4 mostra o mapa de erodibilidade do solo. Através do mapa, pode-se observar que há uma predominância do solo tipo LRd1, cuja área de ocorrência é de 393,3 km², cobrindo 64% da área da bacia. Nota-se que o solo LEa1 teve sua ocorrência restrita à área de cabeceira da bacia, cobrindo uma área de 24,4 km². Já o solo LEa1 está presente próximo ao exutório da bacia, com uma área de 0,62 km². O solo tipo LEHa ocorreu predominantemente nas áreas de encosta da bacia, em uma área de 191,9 km².

A erodibilidade média da bacia, ponderada pela área de ocorrência de cada tipo de solo, foi de $K = 0,0109$ [(ton.ha.h)/(MJ.mm.ha)], caracterizando-a como de baixa erodibilidade.

Tabela 6. Valores de $K[(\text{ton.ha.h})/(\text{MJ.mm.ha})]$.

Código	K	Classe
TRe6	0,02085	Erodibilidade média
LEa1	0,03062	Erodibilidade média
LEHa	0,01126	Erodibilidade baixa
LRd1	0,01043	Erodibilidade baixa

Tabela 7. Resumo dos dados de erodibilidade da bacia.

Tipo	Área (km ²)	K
LRd1	393,3	0,0095
LEHa	191,9	0,0113
TRe6	0,6	0,0209
LEa1	24,4	0,0306

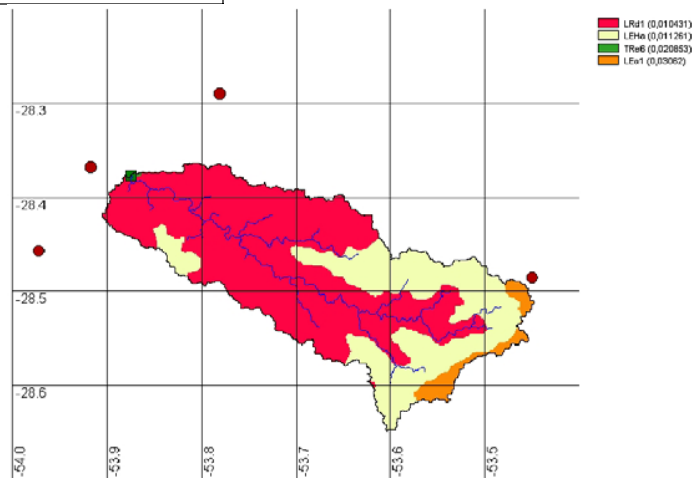


Figura 4. Mapa de erodibilidade do solo.

Fator Topográfico (LS)

Por intermédio do MNT (Figura 1), um valor de LS foi calculado para cada célula da bacia. Em seguida, esse mapa foi classificado em intervalos de LS sendo apresentado na Figura 5. Como se pode observar, a maior parte dos valores de LS variam entre 0 e 5, conferindo à bacia características favoráveis à agricultura.

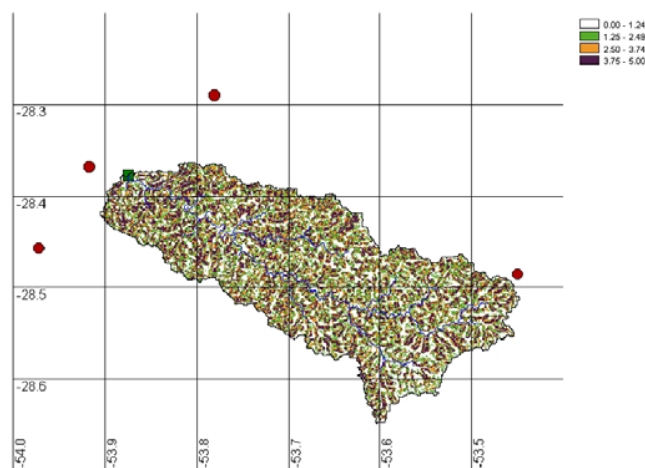


Figura 5. Matriz do fator (LS) da sub-bacia.

Uso e manejo do solo (C)

As áreas de cobertura de cada um dos usos do solo considerados estão mostradas na Tabela 8, enquanto que na Figura 6, tem-se a imagem de satélite classificada de acordo com os tipos de cobertura apresentados.

Tabela 8. Área de ocorrência dos tipos de cobertura do solo.

Uso do solo	Área de ocorrência (km ²)
Florestas	127,78
Pastagem	226,49
Lavoura	254,69
Água	1,17

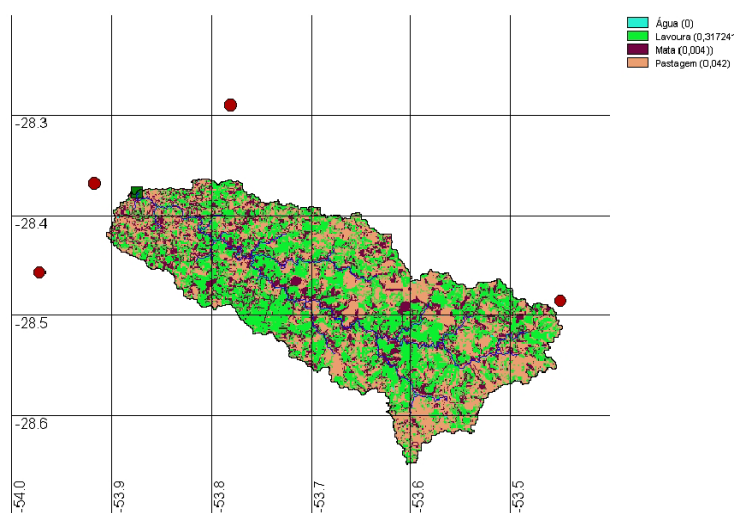


Figura 6. Classificação do uso do solo da bacia.

Verifica-se a predominância da lavoura sobre os demais tipos de uso do solo, o que pode estar relacionado à atribuição de uso “lavoura” onde existia uso “urbano”. As florestas ocupam uma área de aproximadamente 21% da área da bacia.

A carga de sedimentos calculada pela USLE é uma taxa média anual, resultante das atividades ocorridas na bacia no período dos dados de precipitação. Por isso, o tipo de cobertura de todo esse período deve ser considerado no cálculo do coeficiente de uso do solo (C). Foi considerado que a forma de plantio na região teve predominância do plantio convencional no período de 1944 a 1983. De 1984 a 1995, considerou-se uma alteração para a forma de plantio reduzido. A partir de 1996 até 2001,

considerou-se o plantio direto como forma dominante de manejo. Dessa forma, foi feita uma média dos coeficientes de uso do solo, com a média aritmética dos coeficientes de Trigo e Soja (ver Tabela 9), e a média ponderada desse resultado, em função do tempo de plantio. Na mesma tabela observa-se os valores médios de C para os respectivos períodos.

Tabela 9. Período de ocorrência do manejo do solo e respectivos valores de C.

Plantio	Período	Cultura	Fator C	C Médio
Convencional	1944 – 1983	Trigo	0,34	0,43
		Soja	0,52	
Reduzido	1984 – 1995	Trigo	0,06	0,075
		Soja	0,09	
Direto	1996 – 2001	Trigo	0,04	0,05
		Soja	0,06	

O valor médio ponderado para C no período é de 0,317.

Resultados Finais

A erosão bruta para cada ponto da bacia é calculada pela multiplicação dos valores dos coeficientes, sendo a Figura 7 a matriz final da erosão bruta, dividida em classes. A erosão total da bacia foi calculada por média ponderada dos valores de erosão de cada classe com sua respectiva área de ocorrência. Esses cálculos foram efetuados considerando-se a erosividade interpolada pelo método de Thiessen, gerando uma erosão de 34,89 ton/ha.ano, e pelo inverso da distância, 34,69 ton/ha.ano. Como os valores pelos dois métodos de interpolação produziram resultados bastante aproximados (diferença de menos de 0,6%) empregou-se o valor de 34,8 ton/(ha.ano) na determinação da produção de sedimentos.

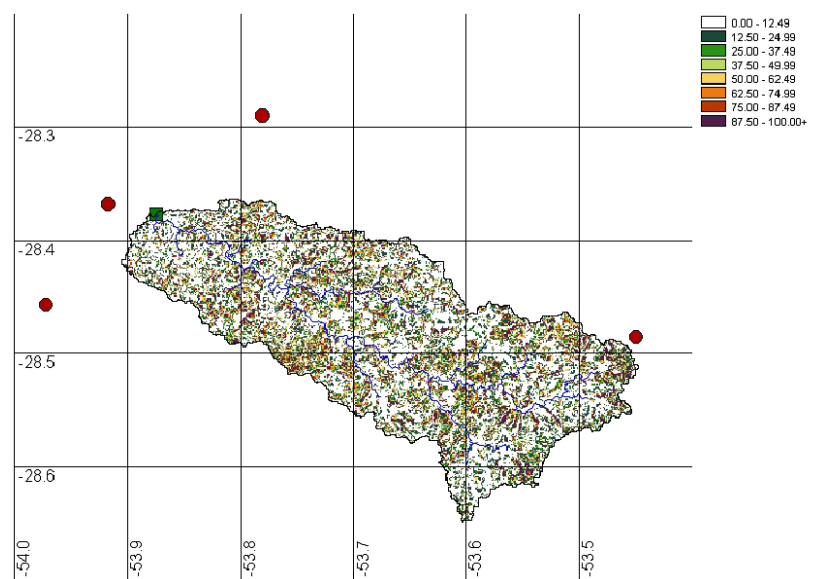


Figura 7. Matriz da erosão bruta na bacia.

Seguindo a (Equação 5), sugerida por Vanoni (1975) para determinação da taxa de entrega de sedimentos, obtém-se um valor de 0,2122. A (Equação 6), de (Williams & Berndt's, 1972), conduz a um valor de 0,063 de SDR. A diferença entre os valores se deve, possivelmente, à declividade encontrada no canal principal da bacia, que é de 0,34%. A produção total de sedimentos resultante destes fatores é de (SDR1) 7,4 ton/(ha.ano) ou 740 ton/(km².ano), enquanto pela fórmula baseada na declividade é de (SDR2) 2,2 ton/(ha.ano) ou 220 ton/(km².ano).

Medições Sedimentométricas

Protocolo da ANEEL (Carvalho et al., 2000a)

Em função da grande dispersão dos dados, a curva-chave de sedimentos apresentou um coeficiente de determinação (R²), que costumeiramente é utilizado para avaliar o ajuste da curva aos dados, razoável (0,097) para o ajuste de curvas-chave de sedimentos. Os pontos medidos e a curva ajustada por regressão podem ser vistos na Figura 8.

Os valores diários médios foram utilizados para calcular a descarga sólida média, sendo apresentados na Figura 9 a vazão média mensal e sua correspondente descarga. A Tabela 10 apresenta as descargas estimadas pela transformação dos valores de vazão por curva-chave para os diferentes intervalos de tempo estudados.

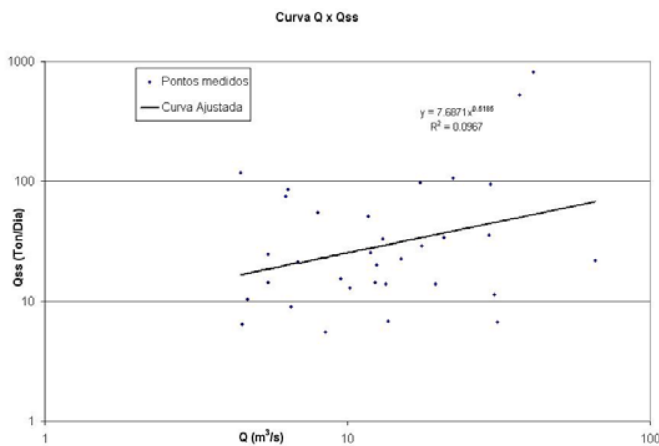


Figura 8. Curva Q x Qss ajustada por Regressão Linear.

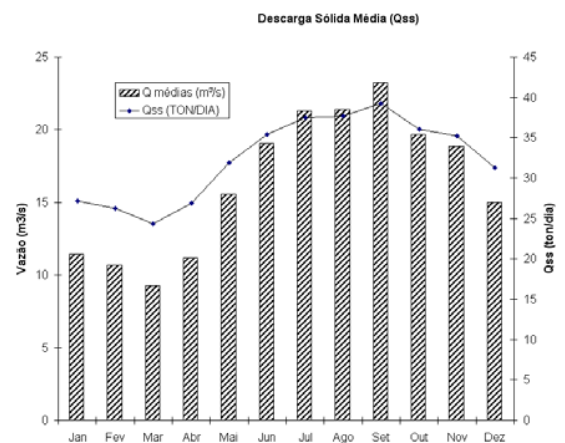


Figura 9. Descarga Sólida Média

Tabela 10. Descarga sólida estimada por intervalo de tempo.

Intervalo de tempo	dia	mês	período integral
Descarga sólida (ton/(km ² .ano))	17,91	19,40	19,62

A discrepância apresentada pelos valores obtidos com base nos dados diários se deve à não-linearidade da equação da curva-chave, o que inviabiliza o princípio da superposição dos efeitos, i.e., apresenta resultados diferentes a depender da ordem das operações (média-transformação (Q-Qss) ou

transformação-média). Possivelmente a estimativa por intervalos mais discretos produza resultados mais próximos do real, em virtude da perda de informação ao se transformar a vazão média em detrimento aos valores observados de vazão.

Cabe salientar que a determinação de curvas-chave de sedimentos, *per se*, agrega incertezas que não serão postas em avaliação por não ser foco deste estudo. A quantidade (4 por ano) e distribuição de coletas de dados de concentração (Figura 10, Figura 11) é responsável principal pela determinação de curva-chave de má qualidade, influenciando na qualidade da estimativa de sedimentos. Observe que, nos meses de Julho e Outubro, os quais apresentam maior suscetibilidade à erosão por deflúvio superficial (vazão média) e precipitação, respectivamente, não foi realizada uma única medição de concentração de sedimentos. As medições de concentração se limitaram a 9 na faixa superior de vazão diária (20% superiores), 19 na faixa intermediária e 5 na inferior (20% inferiores).

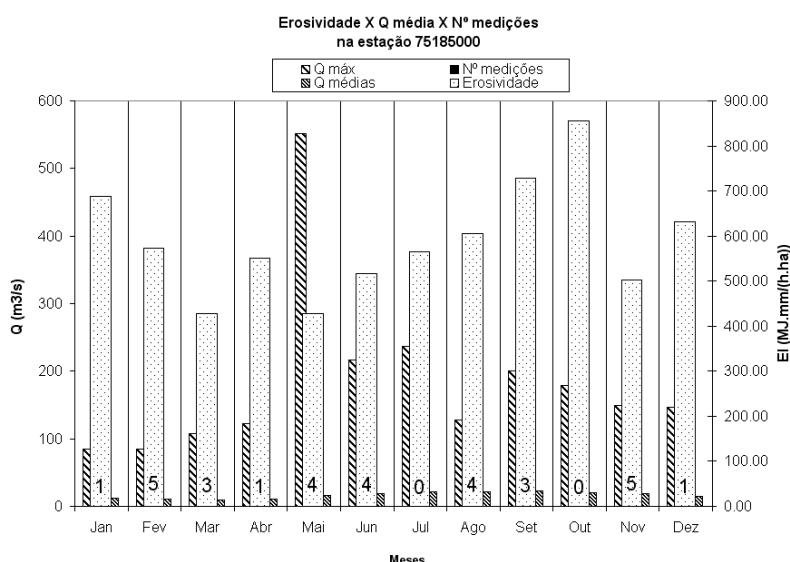


Figura 10. Comparação do número de medições por mês com a suscetibilidade à erosão

Curva de Permanência

A Tabela 11 apresenta a estimativa da produção de sedimentos pelo método da curva de permanência para os diferentes intervalos de tempo e ordens de operação da transformação vazão-descarga sólida e média.

Tabela 11. Estimativa da produção de sedimentos pela curva de permanência

Ordem das operações / Int. de tempo	Dia	Mês	Mês/ano
Transformação (Q-Qss)-Média	17,95	18,44	17,82
Média-Transformação (Q-Qss)	19,70	19,61	18,76

A existência de valores diferentes segue a explicação realizada no item anterior. Como também previamente explanado, a estimativa para valores diários com a transformação da vazão em descarga

antecedendo o cálculo do valor médio passa a ser escolhido para futura comparação com demais estimativas.

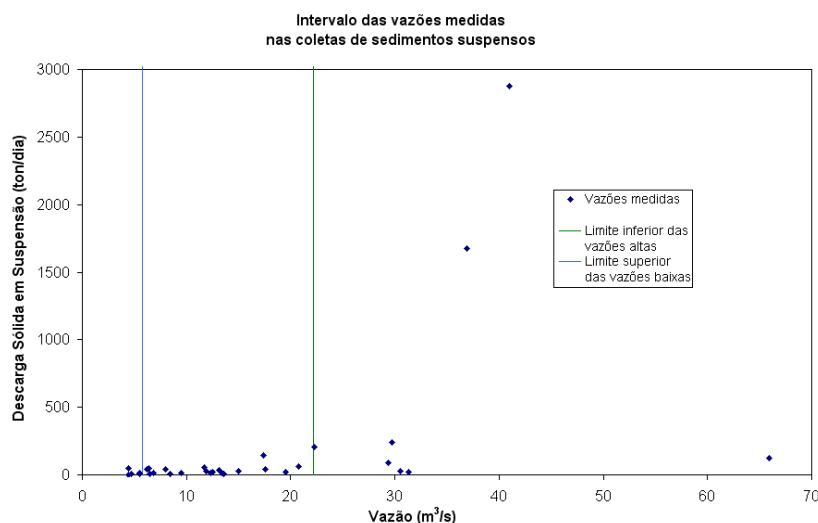


Figura 11. Distribuição das coletas de sedimentos relativas às vazões medidas

Comparação dos resultados

A Tabela 12 mostra os valores de produção de sedimentos obtidos pelos métodos da Equação Universal, pelo protocolo da ANEEL (Carvalho *et al.*, 2000a) e pelo método das curvas de permanência.

Tabela 12. Estimativa da produção de sedimentos pelos diferentes métodos.

Os (ton/(Km ² .ano))			
USLE (SDR1)	USLE (SDR2)	ANA (dia)	Curva Perm.(dia)
740	220	17,91	17,95

Os resultados obtidos apresentam a dimensão do erro quando da estimativa da produção de sedimentos, até por não se ter conhecimento da produção de sedimentos real. A incerteza dos cálculos fica evidenciada pela diferença entre valores obtidos por um mesmo método (USLE), alterando-se apenas a fórmula da taxa de entrega de sedimentos (SDR) em função de características diferentes da bacia (área e declividade). Mesmo com a obtenção de valores muito próximos, quando da estimativa pelo protocolo da ANEEL (Carvalho *et al.*, 2000a) e por curvas de permanência, não se consegue afirmar que a produção tenha sido próxima a estes valores com grande certeza.

Há que ser consideradas, além da concepção da curva-chave e da (in)disponibilidade de dados sedimentométricos, as limitações existentes na aplicação de cada método (Tabela 13), as quais podem fornecer indícios quanto à causa da diferença entre valores obtidos. A ausência de medições

sedimentométricas da descarga de fundo e proveniente do leito não parecem comprometer a comparação, uma vez que a equação universal não considera esses processos.

Tabela 13. Potenciais causadores de distorção nas estimativas.

Método	Característica	Aplicação
USLE	Necessita de dados de longo período	Precipitação – tamanho mínimo 18 anos (44-76, 58-01, 60-01, 63-80) Cobertura do solo – 58 anos (44-01)
	Não computa produção de sedimentos por ravina e erosão de margens e fundo de canal	Não considerada – produção nula
	Bacia com comprimento máximo de 304 m	Rio principal – 65,574 km
	Declividades entre 0,5% e 5%	Decliv. aprox. – 0,34%
Protocolo da ANEEL	Dados de sedimento transportado por descarga de fundo obtidos da literatura	Não computada – considerada nula
Curva de permanência	Dados de descarga sólida proveniente do leito do leito calculados como percentagem dos dados de descarga sólida em suspensão	Não computada – considerada nula

Comparando-se esses valores com os obtidos em outros estudos com aplicação no país (Tabela 2), verifica-se que os valores encontrados pela USLE são superiores aos apresentados na tabela, principalmente o valor proveniente da taxa de entrega de sedimentos dependente da área da bacia.

CONCLUSÃO

A determinação com exatidão das características quantitativas e qualitativas dos sedimentos que aportam rios e reservatórios e demais sistemas hídricos mostra-se como grande desafio para o desenvolvimento de infra-estrutura eficiente de recursos hídricos, com mínimo de incertezas no dimensionamento de obras hidráulicas e com mínimo dano ao meio ambiente e para o desenvolvimento adequado de políticas de preservação de ecossistemas.

Este trabalho objetivou a comparação de estimativas de produção de sedimentos por técnicas simples, incluindo a disposta no protocolo da ANEEL, o método da curva de permanência e a Equação Universal de Perda de Solos (USLE).

Os resultados apontaram a necessidade de maiores estudos para o desenvolvimento de técnicas e que apresentem resultados mais confiáveis, tendo em vista a incerteza presente na utilização de curva-chave de sedimentos com poucos dados mal-distribuídos. Isto porque os métodos fundados em medições sedimentométricas apresentaram resultados (protocolo da ANA 17,91 ton/(km².ano) e curva de permanência 17,95 ton/(km².ano)) 41 vezes inferior ao obtido pela USLE com a taxa de entrega em função da área da bacia (740 ton/(km².ano)) e, 12 vezes inferior ao obtido pela U SLE com a taxa de

entrega em função da delividade da bacia (220 ton/(km².ano)). Cabe ressaltar que deixaram de ser consideradas as descargas sólidas de fundo e provenientes do leito, para o método do protocolo da ANA e da curva de permanência, bem como, a erosão proveniente de ravinas e margens e fundo de canais, que possivelmente apresentariam diferenças pequenas quando somadas às obtidas.

A grande variabilidade dos valores de produção média de sedimentos mostra que o emprego dos métodos aplicados neste estudo não deve ser tomado como fornecedor de boas estimativas, mas, como fornecer de indícios da quantidade de sedimento produzida.

AGRADECIMENTO

Os autores agradecem ao CNPq/CT-HIDRO pela concessão de bolsa de doutorado.

BIBLIOGRAFIA

- ANA. (2005). *Hidroweb*. Disponível em: <http://hidroweb.ana.gov.br/>. Acesso em 15 set. 2005.
- ASSELMAN, N.E.M.. (2000). “*Fitting and interpretation of sediment rating curves*”. *Journal of Hydrology*. 234, pp.228-248.
- CARVALHO, N.O., (1994). *Hidrossedimentologia Prática*. Rio de Janeiro: CPRM, 1994.
- CARVALHO, N.O.; Filizola Júnior, N.P.; dos Santos, P.M.C.; Lima, J.E.F.W.. (2000a). *Guia de Avaliação de Assoreamento de Reservatórios*. Brasília: ANEEL, 2000. 132 p.
- CARVALHO, N.O.; Filizola Júnior, N.P.; dos Santos, P.M.C.; Lima, J.E.F.W.. (2000b). *Guia de Práticas Sedimentométricas*. Brasília: ANEEL, 2000. 154 p.
- CASSOL, E. A., (2000). *Predição e Erosão Hídrica do Solo*. Notas de Aula da disciplina AGR 03318/UFRGS. Texto não publicado. 2000.
- DE PAIVA, E.M.C.D.. (2001a). “*Métodos de Estimativa da Produção de Sedimentos em Pequenas Bacias Hidrográficas*”, in: *Hidrologia Aplicada à Gestão de Pequenas Bacias Hidrográficas*. Org. por De PAIVA, J.B.D.; De PAIVA, E.M.C.D., Porto Alegre: ABRH. pp. 365-394.
- DE PAIVA, J.B.D.. (2001b). *Métodos de Cálculo do Transporte de Sedimentos em Rios*, in: *Hidrologia Aplicada à Gestão de Pequenas Bacias Hidrográficas*, Org. por De PAIVA, J.B.D.; De PAIVA, E.M.C.D.. Porto Alegre: ABRH, 2001. pp. 365-394.
- DESMET, P.J.J.; GOOVERS, G. (1996). “*A GIS procedure for automatically calculating LS factor on topographically complex landscape units*”. *Journal of Soil and Water Conservation*. Des Moines, 51 (5): 427-433, 1996.
- GALDINO, S.; Vieira, L.M.;Padovani, C.R.; Soriano, B.M.A.; Risso, A.; Melo, E.C.; De Almeida Junior, N.. (2004). “*Erosão potencial laminar hídrica na bacia do alto Taquari*”. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.9,n.2. Abr/jun 2004, pp. 125-133.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (1986). *Levantamento de Recursos Naturais*, vol. 33. Folha SH 22 Porto Alegre e parte das Folhas SH 21 Uruguaiana e SI 22 Lagoa Mirim. Rio de Janeiro: IBGE, 1986.

- PHILLIPS, J.M.; WEBB, B.W.; WALLING, D.E.; LEEKS, G.J.L. (1999). “*Estimating the suspended loads of river in LOIS study area using infrequent samples*” Hydrological Processes 13, pp. 1035-1050.
- RISSO, A. (1993). *Obtenção e manipulação dos parâmetros da equação universal da perda de solos através de técnicas de geoprocessamento*. Porto Alegre, UFRGS, 162p. Dissertação de mestrado.
- SILVA, A.M.; SCHULZ, H.E.; CAMARGO, P.B., (2003). *Erosão e Hidrossedimentologia em Bacias Hidrográficas*. São Carlos: RiMa, 2003.
- SIMÕES, S.J.C.; Coiado; E.M. (2001). *Métodos de Estimativa da Produção de Sedimentos em Pequenas Bacias Hidrográficas*, in: *Hidrologia Aplicada à Gestão de Pequenas Bacias Hidrográficas*. Org. por De PAIVA, J.B.D.; De PAIVA, E.M.C.D., Porto Alegre: ABRH, 2001. p. 365-394.
- UNIVERSITY of Maryland. Global Land Cover Facility. (2005). *Imagens de Satélite Landsat*. Disponível on-line em: <<http://glcfapp.umiacs.umd.edu:8080/esdi/index.jsp>>
- VANONI, V.A.. (1975). *Sedimentation Engineering*. ASCE.
- WALLING, D.E.. (1988). *Measuring sediment yield from river basin*, in: Lal, R.. Soil erosion research methods. Ed. Soil and Water Conservation Society. Ankeny, Iowa. 39-80 p.
- WILLIAMS, J.R.; Berndt, H.D.. (1972). “*Sediment Yield Computed with Universal Equation*”. Journal of Hydraulic Engineering, 1972. v.98, n.12, Pp.2087-2098.