

## Avaliação de Metodologia de Estimativa de Produção de Sedimentos em uma Pequena Bacia Rural de Encosta

Raquel Maldaner Paranhos

PPGEC/HDS-CT/UFSM

raquelmp@pop.com.br

João Batista Dias de Paiva

HDS-CT/UFSM

paiva@ct.ufsm.br

Recebido: 27/04/05 – revisado: 12/09/05 – aceito: 03/03/08

---

### RESUMO

A erosão dos solos, por via hídrica, e conseqüentemente a produção de sedimentos tem sido objeto de preocupação crescente em todas as situações relativas a gestão do uso do solo e da água. O objetivo principal deste trabalho é analisar a metodologia de propagação de Williams (1975) associada ao modelo chuva vazão IPH II aplicada à bacia hidrográfica Menino Deus II localizada em Santa Maria – RS. A aplicação desta metodologia objetiva à determinação do coeficiente de propagação de sedimentos B, para a bacia em estudo. Para tanto se determinou a curva chave de vazão e de sedimentos da bacia em estudo. Realizando-se o monitoramento traçou-se as curvas chaves de sedimentos, obtendo-se relações consideradas satisfatórias para estas curvas, sendo o coeficiente de regressão de 99.8% para os dados médios do amostrador ANA, 98.9% para os dados médios do amostrador AND e para o amostrador AMS1 na subida 94% e na descida 85.7%, possibilitando a estimativa da vazão sólida de sedimentos. A metodologia de propagação de Williams (1975) se adaptou bem a bacia em estudo. Encontrou-se uma relação entre o volume de escoamento  $x$  vazão de pico e o coeficiente de propagação B, o que permite que para um evento qualquer se obtenha o coeficiente. Aplicando-se esta equação a outros eventos obteve-se bons resultados, com um coeficiente de correlação entre a produção medida e a calculada de 92%. Isto indica que a equação fornece resultados satisfatórios na obtenção do coeficiente de propagação B para a bacia hidrográfica Menino Deus II.

**Palavras-chave:** Produção de sedimentos, metodologia de propagação de Williams (1975)

---

### INTRODUÇÃO

A erosão dos solos, por via hídrica, e conseqüentemente a produção de sedimentos tem sido objeto de preocupação crescente em todas as situações relativas a gestão do uso do solo e da água. O solo é um recurso natural praticamente não renovável pelo que, a necessidade de avaliar a sua perda e degradação é tanto mais premente quanto mais intensa e generalizada é sua ocupação.

Williams (1975) propôs um modelo que é baseado na propagação de sedimentos em bacias hidrográficas. Este modelo consiste na divisão da bacia em sub-bacias, nas quais a produção de sedimentos é estimada pela Equação Universal de Perdas de Solo Modificada – MUSLE, para um evento isolado de precipitação. Williams (1975) em seu trabalho encontrou valores do coeficiente de propa-

gação variando entre 4,4 e 8,7, tendo como valor médio 6,1.

Paiva et al (1995) utilizaram a metodologia de propagação de Williams (1975) associado ao modelo IPH II, aplicando-a a bacia do riacho Logradouro, afluente do Rio São Francisco com uma área de 88,5 km<sup>2</sup>, com coeficiente de propagação igual a 10. Obtiveram resultados considerados satisfatórios.

### OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo principal analisar a metodologia de propagação de sedimentos de Williams (1975) associada ao modelo chuva vazão IPH II aplicada à bacia hidrográfica Menino Deus II localizada em Santa Maria – RS. A aplicação desta metodologia objetivou a determinação do

coeficiente de propagação de sedimentos B, para a bacia em estudo, o que permitiu a previsão de sedimentos por evento de chuva. Para tanto se determinou a curva chave de vazão e de sedimentos da bacia em estudo.



Figura 1 – a) Linígrafo eletrônico instalado no exutório da bacia hidrográfica Menino Deus II; b) estação pluviométrica Campestre do Menino Deus

## CARACTERIZAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA

A bacia em estudo possui área de 5,03 km<sup>2</sup>, comprimento do rio principal de 4,3 km, e declividade média de 28,92%, com diferença de cota entre a nascente e o exutório de 313 m. É uma das sub-bacias contribuintes ao reservatório do Vacacaí-Mirim, representando 18,5% da área de contribuição do reservatório. Este reservatório é responsável por 40% do abastecimento público da cidade de Santa Maria, Rio Grande do Sul. Nesta bacia foi operada uma estação fluviográfica e sedimentométrica, no bairro Campestre do Menino Deus sob as coordenadas 29°39'28,3" Latitude Sul e 53°47'19,4" Longitude Oeste, onde encontra-se em funcionamento um linígrafo eletrônico com data-logger. Na área da bacia há uma estação pluviométrica - Campestre do Menino Deus - provida de um pluviômetro

eletrônico com data-logger (figura 1a), que registra continuamente a intensidade da precipitação.

## METODOLOGIA

A bacia em estudo foi dividida em 9 sub-bacias (figura 2), de acordo com a topografia.

A Equação Universal da Perda de Solo Modificada (MUSLE), conforme Williams e Berndt (1977) é um modelo para a previsão da produção de sedimentos em eventos individuais de precipitação. O cálculo da perda de solo para cada sub-bacia e para toda a bacia foi feito através deste modelo, dado pela equação:

$$Y = R_w \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad (1)$$

onde: Y é a produção de sedimentos para um evento isolado em toneladas; R<sub>w</sub> é o fator de escoamento; K é o fator de erodibilidade do solo em thMJ<sup>-1</sup>mm<sup>-1</sup>; C é o fator de uso e manejo do solo; P é o fator de práticas conservacionistas; LS é o fator conjunto de comprimento de rampa e grau de declividade

O fator R<sub>w</sub> avalia o potencial erosivo do escoamento superficial, sendo calculado pela seguinte equação:

$$R_w = 89,6 \cdot (Q_s \cdot qp)^{0,56} \quad (2)$$

onde: Q<sub>s</sub> é o volume escoado superficialmente em m<sup>3</sup> e qp é a vazão de pico do escoamento superficial em m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>.

Os valores de Q<sub>s</sub> e qp foram estimados, para cada sub-bacia, pelo modelo de precipitação-vazão IPH II. Este modelo é composto de três algoritmos básicos: perdas por evaporação e interceptação, separação do escoamento, propagação do escoamento superficial e subterrâneo. O algoritmo de separação do escoamento é baseado na equação de Horton, a propagação do escoamento superficial utiliza o método de Clark e o escoamento subterrâneo o modelo do reservatório linear simples (Paiva, 2001). O tempo de concentração (T<sub>c</sub>) das sub-bacias foi estimado pela equação do SCS, conforme Lencastre e Franco (1984) :

$$T_c = \frac{T_p}{0,6} \quad (3)$$

$$T_p = \frac{2,6 \cdot L^{0,6} \cdot \left(\frac{I_0}{5,08} + 1\right)^{0,7}}{1900 \cdot \sqrt{S}} \quad (4)$$

Sendo

$$I_0 = \frac{5080}{N} - 50,8 \quad (5)$$

onde:  $T_p$  é o tempo de pico (horas);  $L$  é o comprimento do rio principal (m);  $I_0$  são as perdas iniciais da chuva em mm;  $S$  é a declividade da bacia em % e  $N$  = número da curva do SCS. Inicialmente determinou-se o tempo de concentração da bacia pelo hidrograma de cheia. Tendo o tempo de concentração da bacia determinou-se  $I_0$  e  $N$ . Depois de determinados os valores de  $I_0$ , as declividades e o comprimento dos rios, foram calculados os tempos de concentração de cada sub-bacia.

A suscetibilidade do solo a erosão foi avaliada pelo fator  $K$ , em função da distribuição granulométrica, da porcentagem de matéria orgânica, da estrutura e da permeabilidade do solo (os tipos de solo existentes na bacia em estudo foram obtidos do Mapa de solos da Bacia Hidrográfica do Rio Vacacaí Mirim e estão apresentados na tabela 1 (Azolim Mutti 1987/88)). Este fator foi calculado pela equação de Wischmeier e Smith, dada por:

$$K = [2,1 \cdot 10^{-4} \cdot M^{1,14} \cdot (12 - ka) + 3,24 \cdot (kb - 2) + 2,5 \cdot (kc - 3) \cdot 0,001313] \quad (6)$$

$$M = (\% \text{silte} + \% \text{areia muito fina}) \cdot (100 - \% \text{argila}) \quad (7)$$

onde:  $ka$  é a porcentagem de matéria orgânica;  $kb$  é o coeficiente relativo à estrutura do solo e  $kc$  é a classe de permeabilidade.

O fator de uso e manejo do solo,  $C$ , é a relação esperada entre as perdas de solo de um terreno cultivado em dadas condições e as perdas correspondentes de um terreno mantido continuamente descoberto. Os seus valores podem ser obtidos através da combinação das variáveis de cobertura e manejo apresentados em tabelas, que podem ser obtidas em Lencastre e Franco (1984).

O fator de práticas conservacionistas,  $P$ , é a relação entre as perdas de solo com determinada prática conservacionista e aquela que ocorre quando a cultura está plantada no sentido do declive (morro abaixo). As práticas conservacionistas mais comuns para as culturas anuais são o plantio em contorno,

plantio em faixas de contorno, terraceamento e alternância de capinas (Wischmeier e Smith, 1978).

O valor do fator  $LS$ , conjunto de comprimento de rampa e grau de declividade, foi obtido pela equação de Williams e Berndt (1977), dada por:

$$LS = \left(\frac{L}{22,1}\right)^m \cdot (0,065 + 0,0454 \cdot S + 0,0065 \cdot S^2) \quad (8)$$

onde:  $m = 0,2$  para  $S < 0,5$ ;  $m = 0,3$  para  $0,5 \leq S < 3,5$ ;  $m = 0,5$  para  $S \geq 3,5$ ;  $S$  é a declividade da rampa em %;  $L$  é o comprimento da rampa em metros, que representa a distância entre o início do escoamento superficial e a mudança de inclinação do terreno, ou outra causa de interrupção do escoamento da lâmina de água superficial, medida segundo o máximo declive (Wischmeier e Smith, 1978). O valor do comprimento de rampa, foi calculado como sendo  $\frac{1}{4}$  da largura do retângulo equivalente. A largura do retângulo equivalente é dada pela equação apresentada por Paiva et al. (1995):

$$le = \frac{Per}{2} - L_c \quad (9)$$

onde:  $Per$  é o perímetro da bacia e  $L_c$  é o comprimento do retângulo equivalente, dado pela equação:

$$L_c = 0,89 \cdot K_c \cdot \sqrt{A} \cdot \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{K_c}\right)^2}\right] \quad (10)$$

sendo:  $A$  a área da bacia e  $K_c$  o coeficiente de compacidade, dado pela equação:

$$K_c = 0,28 \cdot \frac{P}{A} \quad (11)$$

onde:  $P$  perímetro em km e  $A$  área da bacia em  $km^2$ .

Tendo-se definido todos os parâmetros da MUSLE, seleciona-se os eventos para o cálculo da perda de solo em cada sub-bacia. De posse destes dados, procedeu-se à propagação das perdas até a saída da bacia, utilizando-se a equação de propagação proposta por Williams (1975), dada por:

$$Y = \sum_{i=1}^n Y_i \cdot e^{-BT_i \cdot \sqrt{D50_i}} \quad (12)$$

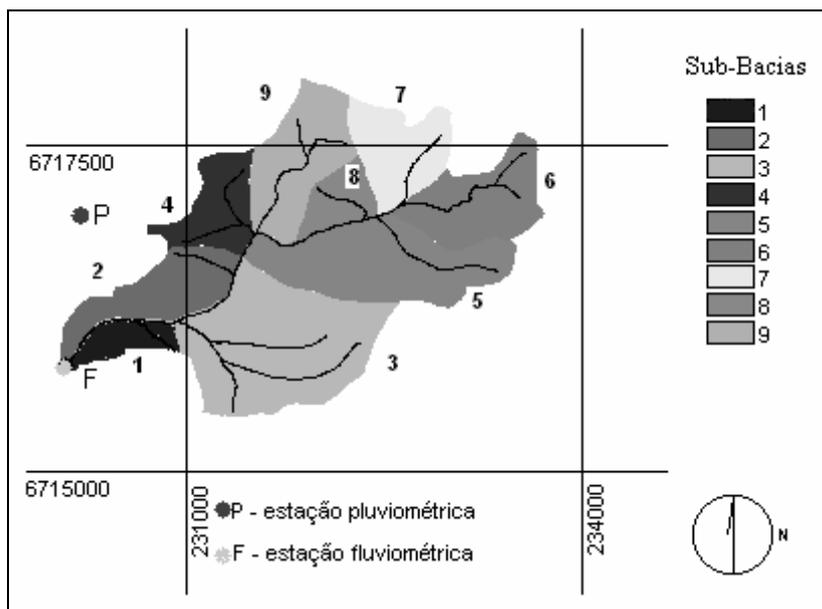


Figura 2 - Sub-bacias da bacia hidrográfica Menino Deus II.

na qual: Y é a produção de sedimentos da bacia em toneladas;  $Y_i$  é a produção de sedimentos obtida pela MUSLE para cada sub-bacia i em toneladas;  $D_{50i}$  é o diâmetro representativo do solo na sub-bacia considerada (obtido através da determinação da curva granulométrica representativa da textura do solo);  $T_i$  é o tempo de percurso da sub-bacia até a saída da bacia em horas, calculado dividindo-se o comprimento do percurso, que o sedimento deve percorrer, pela velocidade, estimada em função da declividade do rio principal neste trecho (Genovez, 2001) ; B é o coeficiente de condução.

Com o objetivo de obter o valor de B por evento para a bacia, calculou-se a perda de solo de cada sub-bacia,  $Y_i$ , utilizando-se a MUSLE e o modelo IPH II e posteriormente estes valores foram levados para a equação 12, na qual considerou-se o valor de Y igual ao valor medido na estação, em cada evento considerado, calculando-se B.

## RESULTADOS

Para a definição da curva chave para toda a faixa de níveis de água observados, foi feita a extrapolação da curva chave de vazão para cotas maiores que 1,0 metro, devido à dificuldade de se obter estas medidas. Também foi necessário realizar extrapolação para cotas inferiores a 0,29 metros, pois como o material do leito é de pedregulho não foi possível realizar medidas com cotas inferiores.

Com os dados medidos de vazão e os resultados da extrapolação foram obtidas as seguintes equações para a curva chave de vazão na estação:

- cotas < 0,7624m

$$Q = 5,63 \cdot \text{cota}^{4,00} \quad R^2 = 0,97 \quad (13)$$

- cotas > 0,7624m

$$Q = 3,89 \cdot \text{cota}^{2,71} \quad R^2 = 0,99 \quad (14)$$

onde: Q - vazão em  $m^3/s$ ; cota - nível d'água em metros.

No período de agosto de 2001 a novembro de 2002 foram coletadas 152 amostras do material em suspensão da bacia hidrográfica Menino Deus II na estação fluviométrica indicada na figura 2.

Estas amostras foram analisadas no Laboratório de Sedimentologia - Departamento de Hidráulica e Saneamento - UFSM, pelo método de filtração. De posse destas análises construiu-se para cada amostrador uma curva chave de sedimentos, sendo que para o amostrador AMS1 plotou-se duas curvas: uma para a subida da onda da cheia e outra para a descida (figuras 03 e 04).

Para os amostradores ANA e AND calculou-se os valores médios para cada cota e traçou-se a curva chave. Apresenta-se a seguir gráficos com todos os dados medidos em campo (figura 05 e 07, respectivamente) e em seguida os dados médios

com os quais se traçou a curva chave para estes amostradores, que estão apresentadas nas figuras 06 e 08, respectivamente. Os amostradores ANA e AND possuem valores de descarga sólida maiores que o AMS1. Um dos fatores que podem levar a esta situação é o fato destes amostradores serem superficiais, além de estarem posicionados nas margens. Enquanto o AMS1 representa a integração na profundidade e na largura da sessão desejada.

Os parâmetros de entrada no modelo IPH II,  $R_{max}$ , que representa a capacidade do reservatório de perdas iniciais,  $I_0$  e  $I_b$ , que representam as capacidades inicial e mínima de infiltração do solo,  $h$ , representa um parâmetro da equação de infiltração de Horton,  $k_{sub}$  e  $k_{sup}$  são parâmetros de propagação do escoamento subterrâneo e superficial foram calibrados Meller et al., (2002). Os valores encontrados foram:  $R_{max} = 10,78\text{mm}$ ,  $I_0 = 9,51\text{mm}/\Delta t$ ,  $I_b = 3,77\text{mm}/\Delta t$ ,  $h = 0,98\text{mm}/\Delta t$ ,  $k_s = 5,36\Delta t$ ,  $k_{sub} = 2,78\Delta t$ . A discretização dos dados de precipitação foi de 10 minutos ( $\Delta t$ ).

A partir da digitalização das curvas de nível das cartas topográficas, foi obtido o modelo digital do terreno, que forneceu as características físicas das sub-bacias e bacia inteira, conforme apresentado na tabela 2.

Os tempos de concentração de cada sub-bacia calculados e adotados estão apresentados na tabela 3. Foram adotados valores múltiplos de 10, tempo em que foi discretizada a precipitação para a entrada no modelo IPH II. Na tabela 4 estão apresentadas as porcentagens dos usos de solo de toda a bacia e de cada sub-bacia.

A fim de se determinar os parâmetros que fornecem os valores do fator  $K$ , foi feito uso do Mapa de Solos da Bacia Hidrográfica do Rio Vacacaí Mirim (Azolim e Mutti, 1987/88). Na tabela 1 são apresentados os clones de solo com os respectivos parâmetros utilizados para o cálculo do fator de erodibilidade para os diferentes tipos de solo.

Na tabela 5 são apresentados as sub-bacias com os respectivos valores médios do fator  $K$  e  $D_{50}$  para cada sub-bacia.

O fator de uso e manejo de solo,  $C$ , foi estipulado pelo levantamento de uso do solo publicado em Dill (2002), onde encontramos: para florestas  $C = 0,001$ ; pastagens  $C = 0,022$ ; agricultura  $C = 0,11$ . Com o mapa de uso de solo da bacia, obteve-se um  $C$  com média ponderada para cada sub-bacia.

Na determinação do fator de práticas conservacionistas,  $P$ , considerou-se a prática de cordões de vegetação permanente, que tem valor igual a 0,2,

conforme tabelas apresentadas em Bertoni e Lombardi Neto (1985).

Os valores encontrados nos cálculos do fator  $LS$  estão apresentados na tabela 6.

Os parâmetros da MUSLE, considerando a bacia inteira foram:  $LS = 19,24$ ;  $K = 0,0338$ ;  $C = 0,0166$ ;  $P = 0,20$ . O hidrograma dos eventos considerados neste trabalho foram obtidos dos registros na estação fluviográfica instalada no bairro Campestre do Menino Deus.

Para a avaliação da produção de sedimentos utilizou-se o amostrador AMS1. Nos eventos dos dias 31/08/01, 05/12/01, 30/07/02, 07/10/2002, os dados do sedimentograma foram todos obtidos em campo. Para os eventos dos dias 26/09/01, 20/12/01, 21/02/02, 26/03/02 e 17/06/02 parte dos dados de sedimentos foram obtidos em campo e parte determinados pela curva chave de sedimentos para este equipamento (AMS1).

A seguir serão apresentados os hidrogramas, hietogramas e sedimentogramas de dois eventos (figuras 09 e 10). Através dos sedimentogramas obteve-se a produção de sedimentos de cada evento. Com os hidrogramas de descarga líquida calculou-se o volume de escoamento superficial da área total da bacia.

Visando obter o valor de  $B$  por evento para a bacia, calculou-se a perda de solo para cada sub-bacia,  $Y_i$ , utilizando-se a MUSLE, e posteriormente estes valores foram levados a equação 12, na qual considerou-se o valor de  $Y$  igual ao valor medido no exutório da bacia. Assim, por processo iterativo, variou-se o valor de  $B$  até que o somatório da produção de sedimentos produzido por cada sub-bacia e propagado até o exutório fosse igual ao medido no evento.

Os valores de  $Q_s$ ,  $q_p$ ,  $Y_i$  (produção de sedimentos da sub-bacia),  $B$  e  $Y_t$  (quantidade de sedimento da sub-bacia propagado até o exutório da bacia, obtido pela equação 12) por evento estão apresentados, para os dois eventos, nas tabelas 07 e 08.

Também se procedeu ao cálculo da produção de sedimentos pela MUSLE sem considerar a propagação, aplicando a equação a toda área da bacia, considerando as características de tipo e uso de solo em relação à área total. Os resultados mostraram que a metodologia de Williams fornece valores bem mais aproximados que a simples aplicação da MUSLE, sem considerar a propagação.

Somando-se os volumes escoados superficialmente pelas sub-bacias e comparando-se com o volume escoado durante o evento na bacia inteira observa-se que estes valores são bem aproximados,

**Tabela 1 - Tipos de solo da bacia e suas características**

Tipo de solo	Silte (%)	Areia G (%)	Areia MF (%)	Argila (%)	M	Ka	Kb	Kc	K
Re-C-Co	15	45	15	25	2250	3,5	2	2	0,0122
Re4	7	23	58	12	5720	3	1	2	0,0401
Tba-Rd	18	28	24	30	2940	3	3	2	0,0233
Cl	33	26	12	29	3195	3,5	2	2	0,0198

Legenda: Re4 - Neossolo Litólico Eutrófico chernossólico; Tba-Rd=associação Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico alissolico e Neossolo Litólico Eutrófico; Cl - Cambissolo; Re-C-Co-Neossolo Litólico Eutrófico chernossólico - Cambissolo - Colúvios. ka – porcentagem de matéria orgânica, kb é o coeficiente relativo à estrutura do solo e kc é a classe de permeabilidade.

**Tabela 2 – Características físicas da bacia e sub-bacias hidrográfica Menino Deus.**

Bacia/ sub-bacia	Área (km <sup>2</sup> )	Perímetro(km)	Declividade (%)
Toda bacia	5,03	14,87	28,92
1	0,19	2,55	9,22
2	0,48	4,56	28,82
3	1,25	6,06	31,39
4	0,35	3,57	31,35
5	0,93	6,17	29,78
6	0,56	4,44	27,25
7	0,46	3,78	26,89
8	0,21	2,55	45,91
9	0,60	4,32	24,53

**Tabela 3 - Tempos de concentração calculados e adotados para cada sub-bacia.**

Bacia/ sub-bacia	S (%)	L(m)	Tp(h)	Tc(min)	Tcadotado(min)
1	9,22	1085,32	0,24	23,55	20
2	28,82	1638,76	0,19	18,52	20
3	31,39	512,94	0,07	7,01	10
4	31,35	604,31	0,08	8,00	10
5	29,78	1109,51	0,13	13,34	10
6	27,25	468,69	0,07	7,00	10
7	26,89	680,05	0,09	9,49	10
8	45,91	1098,59	0,11	10,66	10
9	24,53	1108,42	0,15	14,68	10

Legenda: S - a declividade da bacia, L - o comprimento do rio principal, Tp – tempo de pico, Tc – tempo de concentração calculado e Tcadotado – tempo de concentração adotado.

**Tabela 4 – Porcentagens da área de agricultura, pastagem, floresta e urbanização para cada sub-bacia e para toda a área.**

Bacia/ sub-bacia	Área(km <sup>2</sup> )	Agricultura(%)	Pastagem(%)	Floresta(%)	Urbanização(%)
Toda bacia	5,03	8,55	24,45	63,81	3,19
1	0,19	18,28	16,83	60,05	4,84
2	0,48	2,93	17,21	74,46	4,40
3	1,25	11,80	25,89	58,98	3,33
4	0,35	8,36	7,09	82,08	2,47
5	0,93	14,94	20,98	61,92	2,16
6	0,56	2,26	5,75	87,32	4,68
7	0,46	0,00	36,88	61,93	1,18
8	0,21	2,14	12,39	85,47	0,00
9	0,60	4,63	56,55	35,54	3,28

**Tabela 5 - Porcentagem de área para cada tipo de solo presente na bacia hidrográfica Menino Deus II e fator de erodibilidade e D50 das sub-bacias.**

Bacia/ sub-bacia	Re-C-Co(%)	Re4(%)	Tba – Rd(%)	Cl(%)	K	Ti (horas)	D50 médio
Toda Bacia	9,54	74,85	14,71	0,90			
1	97,09	0,00	0,00	2,91	0,0126	0,14	0,1840
2	36,23	58,34	0,00	5,43	0,0289	0,56	0,1423
3	9,98	90,02	0,00	0,00	0,0372	0,56	0,1314
4	0,00	98,73	1,27	0,00	0,0396	0,70	0,1234
5	0,00	100,00	0,00	0,00	0,0402	0,75	0,1250
6	0,00	79,04	20,95	0,00	0,351	0,81	0,0992
7	0,00	51,48	48,52	0,00	0,0285	0,81	0,0653
8	0,00	100,00	0,00	0,00	0,0401	0,73	0,1250
9	0,00	33,94	66,06	0,00	0,0243	0,70	0,0437

Legenda: K – fator de erodibilidade, Ti – tempo de percurso da sub-bacia até a saída da bacia, D50 médio – é o diâmetro representativo do solo da sub-bacia considerada.

**Tabela 6 – Cálculo do fator conjunto de declividade e comprimento de rampa**

Sub-bacia	Área (Km) <sup>2</sup>	Perímetro(km)	Declividade(%)	Kc	Le	le	L(m)	m	LS
1	0.19	2,55	9,22	1,67	1,11	0,16	39,98	0,5	1,39
2	0.48	4,56	28,32	1,85	2,06	0,22	55,14	0,5	10,70
3	1.25	6,06	31,39	1,53	2,55	0,47	118,72	0,5	18,30
4	0.35	3,57	31,35	1,69	1,57	0,22	54,24	0,5	12,34
5	0.93	6,17	29,78	1,80	2,77	0,32	79,96	0,5	13,66
6	0.56	4,44	27,25	1,68	1,94	0,28	68,79	0,5	10,81
7	0.46	3,78	26,89	1,58	1,62	0,27	68,12	0,5	10,51
8	0.21	2,55	45,91	1,57	1,09	0,19	46,79	0,5	23,07
9	0.60	4,32	24,53	1,57	1,84	0,32	79,05	0,5	9,63

Legenda: kc–coeficiente de compacidade, Le – comprimento do retângulo equivalente, le – largura do retângulo equivalente, m – fator adimensional determinado em função da declividade, LS – conjunto de comprimento de rampa e grau de declividade.

**Tabela 07 - Produção de sedimentos da bacia e o valor do coeficiente de propagação B da metodologia de Williams (1975) para o evento do dia 31/08/01**

Sub-bacia	Área(Km <sup>2</sup> )	qp(m <sup>3</sup> /s)	Os(m <sup>3</sup> )	Rw	Yi(ton)	Yt(ton)
1	0.19	0,09	132	358,24	0,03	0,03
2	0.48	0,23	249	864,46	0,56	0,22
3	1.25	0,56	642	2418,32	6,74	2,76
4	0.35	0,15	144	500,73	0,61	0,21
5	0.93	0,38	324	1327,06	3,29	1,02
6	0.56	0,26	312	1050,56	0,53	0,17
7	0.46	0,19	126	530,42	0,33	0,13
8	0.21	0,80	84	945,44	1,04	0,33
9	0.60	0,27	243	932,85	1,00	0,53
<b>B=4,4</b>	<b>PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS PELA PROPAGAÇÃO NA BACIA= 5,40</b>					

Legenda: Rw – potencial erosivo do escoamento superficial, Yi – é a produção de sedimentos da sub-bacia obtida pela MUSLE, Yt – é a quantidade de sedimentos da sub-bacia propagado até o exutório da bacia obtido pela equação 12.

**Tabela 08 - Produção de sedimentos da bacia e o valor do coeficiente de propagação B da metodologia de Williams (1975) para o evento do dia 17/06/02**

Sub-bacia	Área(Km <sup>2</sup> )	qp(m <sup>3</sup> /s)	Os(m <sup>3</sup> )	Rw	Yi(ton)	Yt(ton)
1	0.19	0,09	462	722,58	0,07	0,06
2	0.48	0,23	1581	2433,76	1,57	1,28
3	1.25	0,57	4083	6882,50	19,2	15,81
4	0.35	0,16	1665	2044,59	2,48	1,97
5	0.93	0,39	1956	3685,28	9,13	7,08
6	0.56	0,27	1797	2860,35	1,39	1,09
7	0.46	0,19	1119	1802,00	0,99	0,81
8	0.21	0,08	573	763,14	0,84	0,65
9	0.60	0,28	1812	2932,82	2,63	2,29
<b>B=0,956</b>	<b>PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS PELA PROPAGAÇÃO NA BACIA= 31,05</b>					

**Tabela 09 – Estão apresentados:  $\Sigma$ sub-bacias(ton) que representa somatório do estimado por sub-bacia, Med - produção medida no exutório, a porcentagem produzido/ $\Sigma$ sub-bacias, B – coeficiente de propagação,  $Q_{sup}$  med - volume de escoamento superficial medido na bacia e  $Q_{sup}$  calc – volume de escoamento superficial calculado pelo somatório das sub-bacias.**

Evento	$\Sigma$ sub-bacias (ton)	Med(ton)	%produzido/ $\Sigma$ sub-bacias	B	$Q_{sup}$ calc.(m <sup>3</sup> )	$Q_{sup}$ med.(m <sup>3</sup> )	Diferença (%)
31/08/01	14,13	5,40	38,22	4,4	2256	2254	0,11
05/12/01	11,24	2,08	18,50	6,48	2543	2617	2,89
30/07/02	8,02	1,75	21,80	7,08	2014	1951	3,11
07/10/02	132,66	128,35	96,75	0,15	59523	58310	2,04
26/09/01	16,35	8,04	47,17	3,25	4200	4186	0,33
20/12/01	15,45	3,41	22,07	6,99	3144	3114	0,96
21/02/02	6,51	3,52	54,07	2,83	2871	2924	1,86
26/03/02	8,91	1,04	11,67	10,25	15048	14793	1,69
17/06/02	38,29	31,05	81,09	0,956	1657	1625	1,95

Tabela 10 – Comparação entre a produção medida, a calculada e a MUSLE para estes 8 eventos.

Data	Yobs(ton)	Y calc(ton)	Diferença (%)	Diferença MUSLE(%)
15/10/01	4,26	8,93	-109,62	231,10
07/11/01	3,32	1,09	67,17	267,80
30/03/02	2,18	4,54	-108,26	178,20
26/04/02	9,67	10,63	-9,93	267,94
01/07/02	6,18	6,31	-2,10	299,36
06/09/02	0,41	0,11	73,17	504,54
30/09/02	3,31	2,21	33,23	553,84
03/11/02	19,41	29,70	-53,01	198,30

sendo a maior diferença de 3,11% no evento do dia 30/07/2002, conforme se pode observar na tabela 09. Estas diferenças foram consideradas satisfatórias.

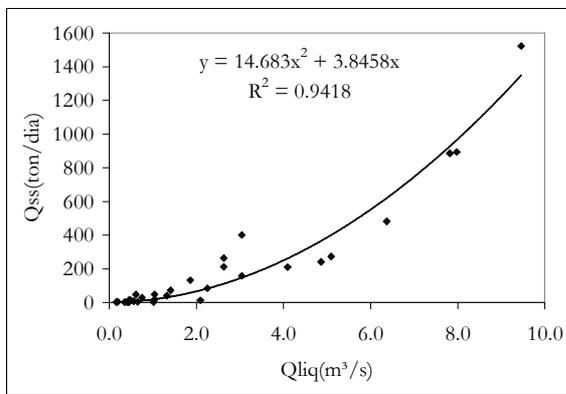


Figura 03 - Curva chave de sedimentos do amostrador AMS1 subida da onda de cheia.

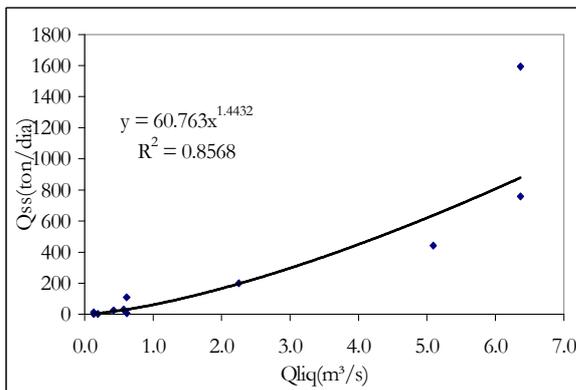


Figura 04 - Curva chave de sedimentos do amostrador AMS1 descida da onda de cheia.

Na mesma tabela estão apresentadas as porcentagens dos valores de produção de sedimentos que chega ao exutório da bacia, ou seja, a relação do que foi produzido nas sub-bacias e do que foi medi-

do no exutório. Verificou-se que nos eventos mais intensos e com maior produção de sedimentos, a deposição ocorrida foi muito pequena, sendo praticamente todo o sedimento desprendido carregado ao exutório da bacia. Um exemplo é o evento do dia 07/10/2002, aonde aproximadamente 97% da produção de sedimentos das sub-bacias chegou ao exutório.

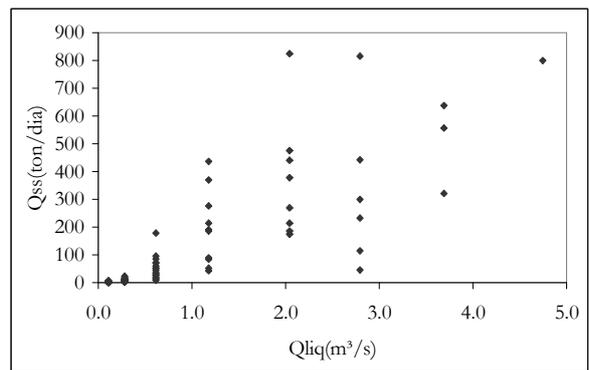


Figura 05- Gráfico com todos os dados coletados em campo com o amostrador ANA.

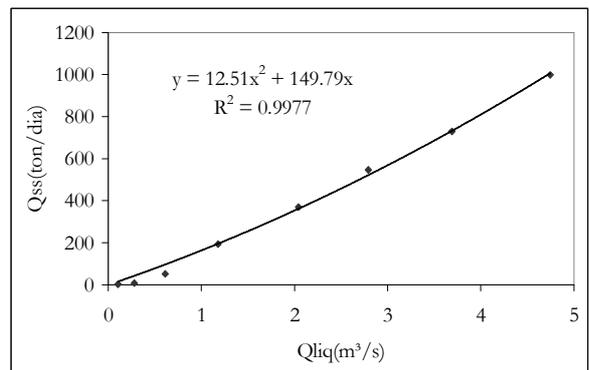


Figura 06 - Curva chave dos valores médios de sedimentos do amostrador ANA.

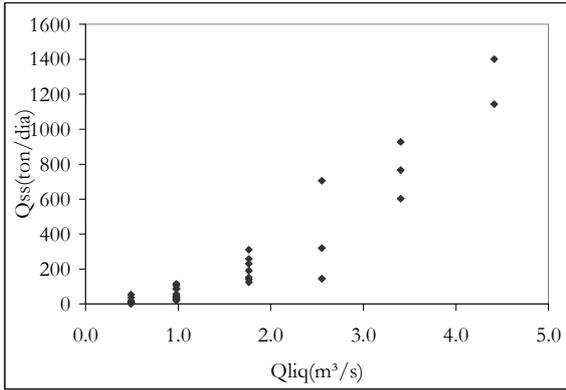


Figura 07 - Gráfico com todos os dados coletados em campo com o amostrador AND.

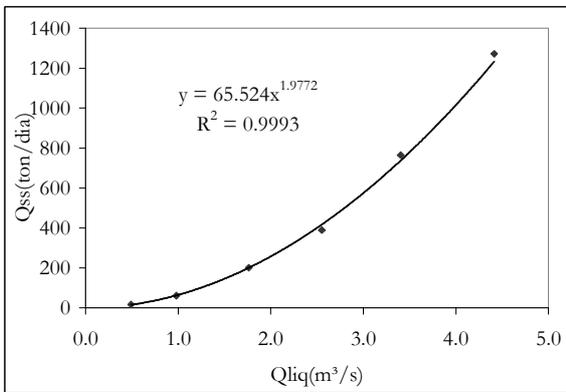


Figura 08 - Curva chave de valores médios de sedimentos do amostrador AND.

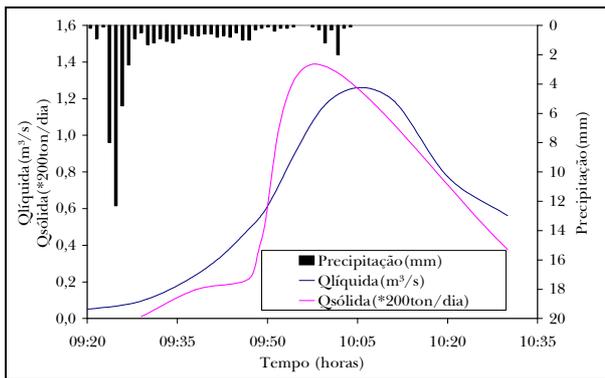


Figura 9 - Hidrograma, sedimentograma e hietograma do evento do dia 31/08/01.

Analisando-se os dados do coeficiente de propagação (B), escoamento superficial (Qsup) e vazão de pico (qp), pode-se construir relações entre

estes dados, conforme figura 11. Desta relação obteve-se a seguinte equação:

$$B = 800,81 \cdot (Q_s \cdot qp)^{-0,64} \quad (15)$$

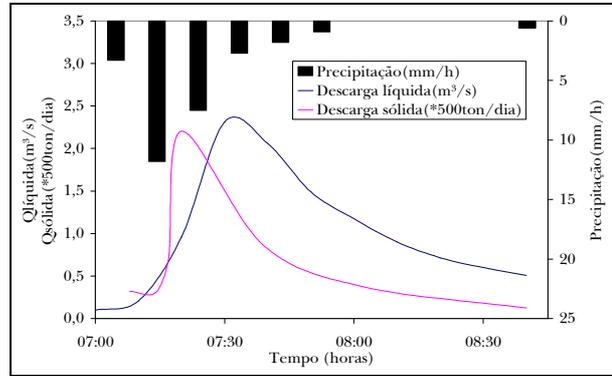


Figura 10 - Hidrograma, sedimentograma e hietograma do evento do dia 26/04/2002.

Após ter sido determinada a equação do coeficiente de propagação aplicou-se esta a 8 eventos de precipitação. Selecionaram-se eventos nos quais se possuíam dados de subida ou descida da onda de cheia. Os valores que faltavam para se completar a construção do sedimentograma foram obtidos pelas curvas chave de sedimentos. Conforme os dados disponíveis selecionou-se a curva a ser utilizada. Adotou-se o conjunto de amostradores ANA e AND e AMS1 subida e AMS1 descida. Destes 8 eventos obteve-se os valores da produção medida, calculada e pela MUSLE apresentados na figura 12.

Na tabela 10 observa-se que as diferenças encontradas de produção de sedimentos calculada pela equação 15 são bem menores que a obtidas pela MUSLE sem considerar a propagação até o exutório da bacia.

Com estes dados encontrou-se uma relação entre a produção observada e a calculada para estes eventos conforme figura 13. Como se pode observar obteve-se um coeficiente de correlação 92%, mostrando que os valores de B determinados pela equação 15, apesar de serem apenas 8 pontos, representam valores satisfatórios para a estimativa da produção de sedimentos para um determinado evento. Pode-se observar também que 62,5% dos pontos ficam abaixo da linha 1:1.

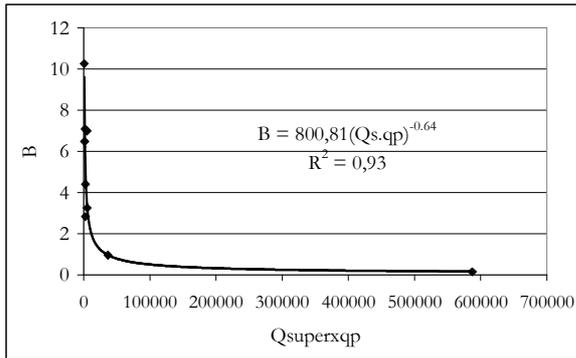


Figura 11 - Relação entre o coeficiente de propagação e o escoamento superficial x vazão de pico.

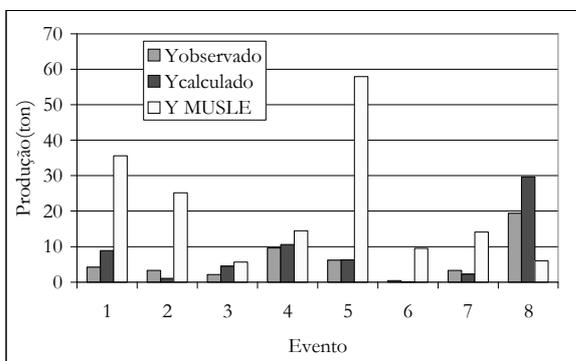


Figura 12 – Produção de sedimentos medida, calculada com os valores de B determinados pela equação 15 e calculados pela MUSLE. Sendo:

Evento 1 – 15/10/2001      Evento 2 – 07/11/2001  
 Evento 3 – 30/03/2002      Evento 4 – 26/04/2002  
 Evento 5 – 01/07/2002      Evento 6 – 06/09/2002  
 Evento 7 – 30/09/2002      Evento 8 – 03/11/2002

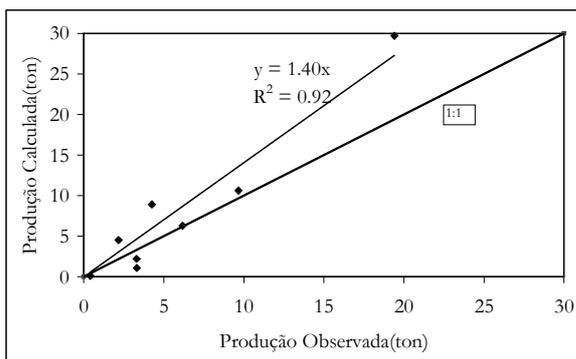


Figura 13 – Correlação entre a produção de sedimentos medida e calculada com os valores de B determinados pela equação 15.

## CONCLUSÕES

A metodologia de propagação de Williams (1975) se adaptou bem a bacia em estudo. Encontrou-se uma relação entre o volume de escoamento x vazão de pico e o coeficiente de propagação B, o que permite que para um evento qualquer se obtenha esse coeficiente. Aplicando-se esta equação a outros eventos obteve-se bons resultados, com um coeficiente de correlação entre a produção medida e a calculada de 92%. Apesar dos do pequeno número de eventos testados os resultados indicam que a equação fornece resultados satisfatórios na obtenção do coeficiente de propagação B para a bacia hidrográfica Menino Deus II.

Analisando-se a produção de sedimentos obtida pelo cálculo da Equação Universal de Perdas de Solos Modificada, aplicada a área da bacia observa-se que esta superestima em média 390% a produção de sedimentos, enquanto que a produção calculada pela equação 15 fornece resultados mais aproximados dos produzidos em campo.

## REFERÊNCIAS

- AZOLIM, L. S. M.; MUTTI, M. A. D. Solos da Bacia Hidrográfica do Vacacaí-Mirim. Relatório técnico. Acordo DNOS - UFSM (FATEC). 1987/88
- DILL, P. R. J. Assoreamento do reservatório do Vacacaí-Mirim e sua relação com a deterioração da microbacia contribuinte. Dissertação de Mestrado. PPGEC - UFSM. Santa Maria, 2002.
- GENOVEZ, A. M. Vazões Máximas. Hidrologia Aplicada a Gestão de Pequenas Bacias Hidrográficas. 2001. cap. 3, p. 33-112.
- MELLER, A.; PARANHOS, R. M.; PAIVA, E. M. C. D.; PAIVA, J. B. D. Parâmetros de calibração de modelo IPH II na bacia hidrográfica do Vacacaí Mirim. REUNIÃO FINAL DA REHIDRO, 2002, Vitória, Rede Cooperativa em Recursos Hídricos, São Paulo FINEP, 2002, v. 1, n. , p. 1-10
- LENCASTRE, A.; FRANCO, F.M. Lições de Hidrologia. Universidade de Lisboa, Portugal, 1984
- PAIVA, E. M. C. D. Métodos de estimativa de produção de sedimentos em Pequenas Bacias Hidrográficas. Hidrologia Aplicada a Gestão de Pequenas Bacias Hidrográficas. 2001. cap. 13, p. 379-408.
- PAIVA, J.B.D.; PAIVA E.M.C.D.; VILLELA, S.M. Avaliação da descarga de sedimentos afluentes à captação de estação elevatória I do projeto de transposição das á-

- guas do Rio São Francisco. RBE – Caderno de Recursos Hídricos. 1995, v 13, n2, p. 47-79.
- WILLIAMS, J. R. Sediment routing for agricultural watersheds. Water Resources Bulletin, 1975. v.11 n° 5, p. 965-974.
- WILLIAMS, J. R.; BERNDT, H. D. Sediment yield prediction based on watershed hydrology. Transactions of the ASAE, 1977. v.20, no 6, p. 1100-1104.
- WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. Predicting Rainfall Erosion Losses: a Guide to Conservation Planning. Agriculture Handbook, no 537. Washington, U.S.D.A. Department of Agriculture, 1978.

### ***Evaluation of a Methodology to Estimate Sediment Production in a Small Rural Hillside Basin***

#### **ABSTRACT**

*Erosion de to runoff and the consequent production of sediments, has been the subject of increasing concern in all situations involving management of land and water use.*

*The main objective of this work is to analyze the Williams routing methodology (1975) associated with the IPH II rainfall-runoff model applied to the Menino Deus II catchment in Santa Maria - RS - Brazil. The purpose of this methodology is to determine the sediment routing coefficient B, for the basin studied. This is how the flow and sediment stage-discharge relation of the basin studied were determined. The stage-discharge relation of sediments was plotted from observed data, achieving relations considered satisfactory for these curves: 99.8% for the average data from the ANA sediment sampler; 98.9% for the average data from the AND sediment sampler; and 97% for the AMSI sediment sampler in ascent and 85.7% descending, so now it is possible to estimate the solid discharge of sediments. The Williams routing methodology (1975) adapted well to the basin studied. A relationship was obtained between the product of runoff and peak flow and the coefficient of propagation B that gives the respective coefficient for any event. Applying this equation to other events results in good values with a 92% coefficient of correlation between the measured production and the calculated one. This indicates that the equation supplies satisfactory results to estimate the coefficient of propagation B for the Menino Deus II catchment.*

*Key-words: sediment yield, Williams routing methodology (1975).*