



VI-199 - PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS EM BACIA HIDROGRÁFICA EM CRESCENTE PROCESSO DE URBANIZAÇÃO

Aparecido Vanderlei Festi⁽¹⁾

Engenheiro Agrimensor FEAP - Faculdade de Engenharia de Agrimensura de Pirassununga, 1985, Mestre em Engenharia Urbana pela UFSCar – Universidade Federal de São Carlos, 2006, Doutorando em Saneamento pela Unicamp – Universidade Estadual de Campinas.

Danilo Castro Rosendo

Engenheiro civil. UEMA - Universidade Estadual do Maranhão, 2005, Mestre Matemática na Unicamp. Universidade Estadual de Campinas 2007. Doutorando em Engenharia Civil na Unicamp-SP

Maria Helena Rodrigues Gomes

Engenheira Civil. UFJF – Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, 1994, Doutora em Engenharia Civil pela EESC/USP – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2003.

Endereço⁽¹⁾: Avenida B, nº 111 – Condomínio Campos do Conde – Paulínia/SP - vanderleifesti@gmail.com

Endereço⁽³⁾: Faculdade de Engenharia - Campus da UFJF - 4ª Plataforma do Setor de Tecnologia – Bairro Martelos - CEP: 36036-330 - Juiz de Fora – MG - mariahelena.gomes@ufjf.edu.br

RESUMO

O escoamento da água tanto na superfície do solo quanto no seu interior mesmo que esporadicamente causa deslocamentos dos sedimentos que carregados acabam provocando o remanejo e a redistribuição pela bacia de frações consideráveis de partículas sólidas acabam interferindo no ciclo hidrológico e afetam o uso, a conservação e a gestão dos recursos hídricos (Tucci, 2001). A produção de sedimentos tem sido alvo de muitos estudos e um dos métodos usados para investigação é conhecido como Equação de Perda de Solo Modificada (MUSLE) que foi desenvolvida por Williams e Berndt (1977). Neste trabalho utilizou-se desta metodologia para avaliar o processo de produção de sedimentos em uma bacia hidrográfica do córrego efluente do Rio Piracicaba no Estado de São Paulo, em crescente processo de urbanização e um evento de precipitação cuja equação foi desenvolvida para a localidade em estudo. Os resultados obtidos foram satisfatórios e os mesmos podem ser aplicados na elaboração de projetos e análise de sedimentos da bacia

PALAVRAS-CHAVE: Drenagem Urbana, Produção de Sedimentos, MUSLE.

INTRODUÇÃO

A produção de sedimentos gerada pela erosão do solo em rios tem sido objeto de estudo em função da grande preocupação com a preservação do solo e, por conseguinte da água. Para avaliar o processo de produção de sedimentos em uma bacia hidrográfica em crescente processo de urbanização utilizou-se a Equação de Perda de Solo Modificada (MUSLE) desenvolvida por Williams e Berndt (1977) e um evento de precipitação cuja equação foi desenvolvida para a localidade em estudo. A bacia hidrográfica escolhida faz parte da Bacia do Rio Piracicaba no Estado de São Paulo, na região próxima a Campinas e o método de MUSLE se adaptou bem à bacia em estudo e encontrou-se uma relação entre o volume escoado e o total de sedimentos produzidos, o que permite estimar a quantidade de sedimentos produzidos para um evento hidrológico. O valor encontrado é um valor superestimado mas pode-se considerar que valores calculados e apresentados são bem otimistas na elaboração de projetos e análise de sedimentos da bacia.

1 - OBJETIVO

O objetivo principal deste trabalho é aplicação da metodologia de propagação de sedimentos de Williams (1975) aplicada a uma bacia hidrográfica parcialmente urbanizada, ou seja, em crescente estado de urbanização localizada na região de Campinas no Estado de São Paulo. Para alcançar esse propósito serão determinados os coeficientes de propagação de sedimentos A e B, a curva chave de vazão e a curva de sedimentos para bacia em estudo para um determinado evento hidrológico.



2 - CARACTERIZAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA

Festi (2008) define a bacia hidrográfica ou bacia de contribuição como sendo a área em torno de um curso d'água (córregos, riachos ou rios) ou ainda em torno de um talvegue seco; é a área geográfica coletora das águas de chuvas, que escoando pela superfície de solo, atinge o ponto na seção considerada.

O volume total de água escoado pela bacia e que passa em um determinado tempo no ponto considerado do córrego ou do talvegue, são águas provenientes das chuvas que escoam superficialmente ou após terem percorrido caminhos subterrâneos.

Os limites das bacias hidrográficas são definidos por divisores topográficos (pontos com cotas mais elevadas) ou espigões que separam as bacias vizinhas e os divisores freático ou subterrâneo.

O divisor topográfico é condicionado como o próprio nome diz, pela topografia, a união das cotas mais elevadas de uma determinada bacia, determinam os limites da bacia hidrográfica. Isto não impede que dentro de uma determinada bacia hidrográfica existam picos isolados com cota superior a qualquer ponto da linha divisória.

O divisor freático ou subterrâneo é geralmente determinado pela estrutura geológica, podendo às vezes ser influenciado pela topografia. Estes divisores podem sofrer alterações ao longo do tempo ou de um período, em função do nível do lençol freático.

Devido às constantes variações do nível do lençol freático, costuma-se considerar que a área e os limites da bacia hidrográfica é aquela delimitada pela linha topográfica.

Tanto o escoamento superficial, como o escoamento subterrâneo, caminham para o talvegue (ponto mais baixo da bacia). A bacia hidrográfica é aquela em que se considera somente o escoamento superficial e bacia hidrogeológica é aquela em que se consideram o escoamento superficial e o escoamento subterrâneo.

“A bacia hidrográfica compõe-se basicamente de um conjunto de superfícies vertentes de uma rede de drenagem formada por cursos de água que confluem até resultar em leito único no exutório”. (Tucci, 2001).

As bacias hidrográficas podem ser identificadas por levantamentos topográficos específicos (quando a área da bacia não for muito grande), por aerofotogrametria, por imagem de satélites ou por cartas cartográficas.

2.1 - Descrição da bacia hidrográfica em estudo:

A bacia hidrográfica em estudo apresentada na Figura 1 possui área superficial de 38,22 km², comprimento do córrego principal de 9,85 km e declividade média de 13,30 m/km, possui um perímetro de 25,75 km, com diferenças de cota entre o ponto mais extremo da bacia e o exutório de 131,00 metros. É uma das bacias contribuintes do Rio Piracicaba no Estado de São Paulo. A bacia hidrográfica foi subdividida em quatro sub-bacias com as seguintes características: A sub-bacia I possui área superficial de 7,90 km², comprimento do córrego principal de 4,2 km e declividade média de 24,03 m/km, possui um perímetro de 13,8 km, com diferenças de cota entre o ponto mais extremo da bacia e o exutório de 66,00 metros; a sub-bacia II possui área superficial de 8,8 km², comprimento do córrego principal de 6,1 km e declividade média de 10,82 m/km, possui um perímetro de 16,3 km, com diferenças de cota entre o ponto mais extremo da bacia e o exutório de 66,00 metros; a sub-bacia III possui área superficial de 7,2 km², comprimento do córrego principal de 9,85 km e declividade média de 13,30 m/km, possui um perímetro de 14,9 km, com diferenças de cota entre o ponto mais extremo da bacia e o exutório de 131,00 metros; e a sub-bacia IV possui área superficial de 14,3 km², comprimento do córrego principal de 7,3 km e declividade média de 15,07 m/km, possui um perímetro de 19,50 km, com diferenças de cota entre o ponto mais extremo da bacia e o exutório de 110,00 metros.

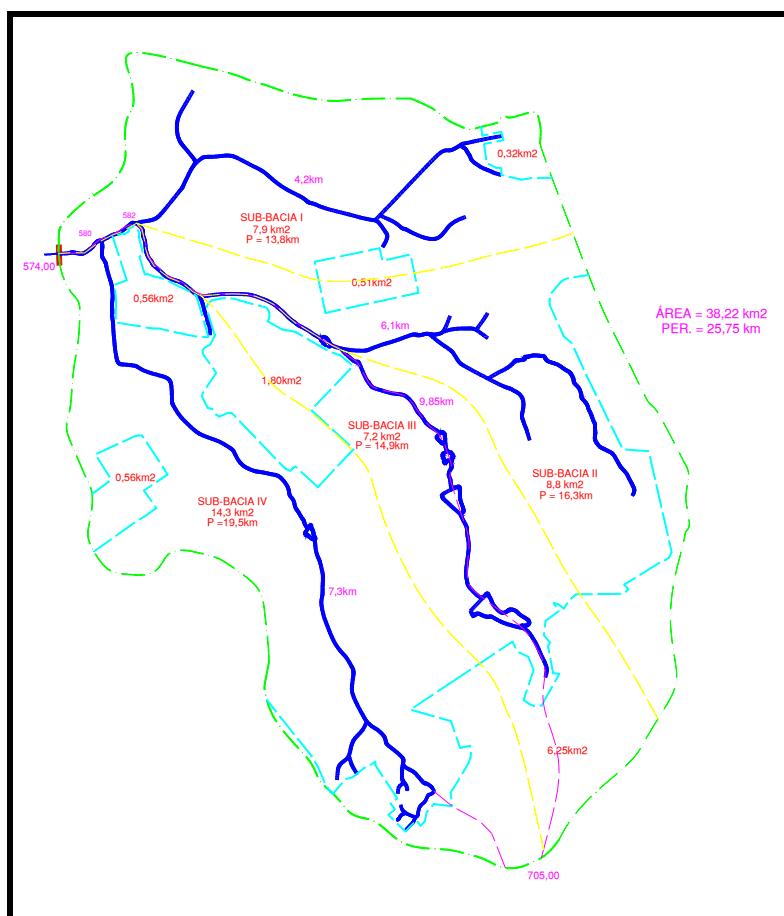


Figura 1 – Bacia hidrográfica contribuinte do Rio Piracicaba no Estado de São Paulo

2.2 - Escoamento superficial

Generalidades: O escoamento superficial é o fator mais importante do ciclo hidrológico em termos de drenagem. Trata-se da ocorrência e transporte de água na superfície terrestre e está associado à maioria dos estudos hidrológicos e proteção aos fenômenos catastróficos provocados pelo seu deslocamento, abrangendo desde o excesso de precipitações e suas diretas conseqüências até um dimensionamento preventivo duradouro.

Alguns fatores influenciam a formação do escoamento superficial e podem ser classificados como fatores climáticos e fatores fisiográficos. Os fatores climáticos podem ser descritos como:

- Intensidade: Quanto maior a intensidade, maior será o escoamento superficial;
- Duração: Quanto maior a duração, maior o escoamento superficial;
- Precipitações Antecedentes: Quanto maior a umidade do solo (saturação) maior o escoamento superficial.

Já os fatores fisiográficos se apresentam como:

- Área da bacia: quanto maior a área da bacia, maior o volume do escoamento superficial;
- Permeabilidade do solo: quanto mais permeável o solo, menor será o escoamento superficial;
- Interceptores: obras hidráulicas contidas na bacia, principalmente barragem, diminuem o escoamento superficial, porém, retificações nos meandros dos cursos d'água aumentam o escoamento superficial;
- Vegetação: quanto maior for a presença de vegetação em densidade, menor é o escoamento superficial;
- Declividade: quanto maior for a declividade, maior a velocidade do escoamento superficial.



3 - METODOLOGIA

A bacia hidrográfica em estudo foi subdividida nas quatro sub-bacias descritas acima, de acordo com a formação topográfica obtidas nas cartas cartográficas publicadas pelo Instituto Geográfico e Cartográfico do Estado de São Paulo - IGC (1982).

Para cálculo dos coeficientes de propagação de sedimentos A e B, da curva chave de vazão e da curva de sedimentos para bacia em estudo para um determinado evento hidrológico, foi necessário determinar os seguintes parâmetros:

a) Área de Drenagem:

A área da bacia hidrográfica é determinada topograficamente ou planimetricamente, acompanhando os espigões e fechando sempre ortogonalmente às curvas de nível em direção ao “ponto do projeto”. O ponto do projeto trata-se do local definido para avaliar as vazões ou mais precisamente o local de execução da obra como exemplo, pontes, barragens, etc.

b) Índices de forma:

- Coeficiente de Compacidade “K_c”

Relaciona o perímetro da bacia hidrográfica e a circunferência de um círculo de área igual à da bacia. Este coeficiente é um número adimensional que varia de acordo com a forma da bacia, independentemente do seu tamanho. Quanto mais irregular for a bacia, tanto maior será o coeficiente de compacidade. Um coeficiente mínimo igual à unidade corresponderia a uma bacia circular e para uma bacia alongada, seu valor é significativamente superior a 1. Uma bacia será mais suscetível a enchentes mais acentuadas quando seu K_c for mais próximo da unidade (Cardoso et alii., 2006).

$$K_c = \frac{P}{2\pi R} \quad (2)$$

Sendo: P o perímetro da bacia hidrográfica e $R = \sqrt{\frac{A}{\pi}}$

- Fator de Forma “K_f”:

O fator de forma relaciona a forma da bacia hidrográfica a um retângulo e corresponde à razão entre a largura média e o comprimento axial da bacia, ou seja, da foz ao ponto mais distante do espigão (Cardoso et alii, 2006). Pode-se afirmar que a forma da bacia hidrográfica e a forma do sistema de drenagem são influenciadas por algumas características, principalmente pela característica geológica. Além de atuar sobre alguns processos hidrológicos ou sobre o comportamento hidrológico da bacia. O fator de forma da bacia é importante na definição do tempo de concentração.

$$K_f = \frac{\text{Largura Média da Bacia} \bar{L}}{\text{Comprimento Axial da Bacia} L} \quad (3)$$

Sendo: $\bar{L} = \frac{A}{L}$ onde A é a área da bacia (km²) e L o comprimento axial (km).

Villela e Mattos (1975) mencionam que para uma bacia com um fator de forma baixo é menos sujeita a enchentes que outra de mesmo tamanho, porém com fator de forma maior

- Densidade de Drenagem “D_d”:

Relaciona o comprimento total dos cursos d’água dentro da bacia hidrográfica com a área da bacia hidrográfica.



$$Dd = \frac{L_t}{A} \quad (4)$$

Sendo: L o comprimento dos cursos d'água (km); A a área da bacia hidrográfica (km²) e Dd a densidade de drenagem (km⁻¹)

c) Característica do Relevo de uma bacia:

- Curva Hipsométrica:

A curva hipsométrica relaciona as áreas localizadas acima ou abaixo das curvas de nível para a determinação física da bacia hidrográfica identificando as áreas de mesmo tempo de concentração.

- Declividade do Alveo:

A velocidade de um rio depende da declividade dos canais pluviais, ou seja, quanto maior a declividade, maior é a velocidade. A declividade média é calculada dividindo-se a diferença total de elevações do leito pela extensão total horizontal.

$$S_1 = \frac{\Delta H}{\sum l} \quad (5)$$

Sendo ΔH a diferença entre cotas.

- Declividade Equivalente:

É o índice que indica o tempo de percurso da água ao longo do perfil longitudinal onde:

$$S_3 = \frac{L}{\sum \frac{L}{\frac{l_i}{S_i}}} \quad (6)$$

Onde: L = distância (km) e L_i/S_i é a declividade parcial de cada trecho (m/km)

4 - PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS

A produção de sedimentos será avaliada com utilização da equação universal de perdas de solo modificada (MUSLE) de acordo com Willians & Bernalt (1977) que consiste em um modelo matemático para a previsão da produção de sedimentos em eventos individuais de precipitação, de acordo com a equação

$$Y = A \cdot (Q_s \cdot Q_p)^B \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad (7)$$

Onde:

Y= perda anual de solo calculada por unidade de área, em t/ha;

Q_s = Volume de escoamento superficial, em m³/s

Q_p = Vazão de pico do escoamento superficial, em m³/s.

K = Fator de erodibilidade do solo, em t/ha/MJ/ha.mm/h;

LS = Fator conjunto de comprimento e declividade do solo;

C = Fator de uso e manejo do solo;

P = Fator de práticas conservacionistas;



A e B = coeficientes de propagação de sedimentos

O valor de LS é obtido pela equação de Williams e Berndt (1977) apresentada da seguinte forma:

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

Onde: $m=0,2$ para $S<0,5$; $m=0,3$ para $0,5<S<3,5$; $m=0,5$ e $S>3,5$; S é a declividade da rampa (%).

Na metodologia de Williams é adotado para $A=89,6$ e $B=0,56$, com esses valores podemos calcular o fator de erodibilidade do solo.

Equação chuva-vazão

A avaliação da equação chuva-vazão é pela a equação IDF de Campinas - SP (Vieira, 1978) foi o modelo utilizado para a estimativa da intensidade pluviométrica e a vazão produzida na bacia hidrográfica.

$$i_{\max} = \frac{2524,86 * T_R^{0,1359}}{(t + 20)^{0,948 * T_R^{-0,007}}} \quad \text{unidade: mm/m} \quad (9)$$

5 - RESULTADOS

A bacia em estudo possui cerca de 38 km^2 , o rio principal possui comprimento de 9,2 km e declividade média de 2,5 m/km. A bacia possui áreas rurais ocupadas por culturas de cana de açúcar e soja além da área total ser também parcialmente urbanizada. As características físicas da bacia hidrográfica e de suas sub-bacias estão reunidas na Tabela 1.

Tabela 1 – Características Físicas da bacia e sub-bacias hidrográficas.

Sub-bacia	Área (km^2)	Perímetro (km)	Declividade (m/km)	Coef de compacidade e	Fator de Forma	Densidade de drenagem	Extensão do rio principal (km)
I	7,05	13,8	24,03	1,47	1,84	0,83	4,2
II	8,80	16,3	10,82	1,55	3,69	0,89	6,1
III	7,20	14,9	13,30	1,57	0,73	1,14	9,85
IV	14,30	19,5	15,07	1,45	0,31	0,57	7,3
toda bacia	38,22	25,75	13,30	1,28	0,82	1,22	9,85

Na Tabela 1, encontram-se os valores do coeficiente de compacidade para a bacia e as sub-bacias em estudo. Pode-se observar que os valores encontrados não distam de forma significativa do valor da unidade, sendo assim pode-se concluir que a bacia hidrográfica não possui uma tendência acentuada para grandes enchentes. O que é confirmado quando se analisam os valores calculados para o fator de forma, pois daí pode-se concluir que a bacia hidrográfica em sua totalidade não possui tendência a enchentes, o que pode ser verificado pelo baixo valor encontrado para o fator de forma K_f igual a 0,82. A mesma análise também se verifica em relação às sub-bacias III e IV, que possuem fatores de forma iguais a 0,73 e 0,31, respectivamente. Para as sub-bacias I e II, os fatores de forma apresentam valores maiores (1,81 e 3,69, respectivamente) demonstrando que nestas regiões existe a possibilidade de ocorrência de chuvas intensas cobrindo simultaneamente toda extensão destas sub-bacias e a possibilidade de ocorrência de enchentes nesta área.

**Tabela 2 – Potencial de erodibilidade do solo pelo escoamento superficial - R_w**

Sub-bacia	Área (km^2)	qp(m^3/s)	Qs(m^3/s)	R_w
I	7,05	85,5	645.277	1939397,80
II	8,8	71,1	651.913	1759143,17
III	7,2	48,86	929.471	1739137,91
IV	14,3	132,11	1.342.640	3729832,79
toda bacia	38,22		3.569.301	

O valor do fator LS, conjunto de comprimento da rampa e grau de declividade, foi obtido pela equação de Willians e Berndt (1977). Os valores de LS para a bacia e as sub-bacias em estudo estão reunidos na Tabela 3.

Tabela 3 – Cálculo do fator de declividade e comprimento da rampa.

Sub-bacia	Área (km^2)	Perímetro (km)	Declividade (%)	Kc	L (km)	m	LS
I	7,05	13,8	2,40	1,47	4,2	0,3	1,0215
II	8,8	16,3	1,08	1,55	6,1	0,3	0,6572
III	7,2	14,9	1,33	1,57	9,85	0,3	0,8532
IV	14,3	19,5	1,51	1,45	7,3	0,3	0,8442
toda bacia	38,22	25,75	1,33	1,28	9,85	0,3	0,8532

O valor médio do fator de uso e manejo do solo C foi estimado através de observações sobre o tipo de cobertura vegetal existente na superfície do solo da bacia hidrográfica estudada e da área que cada tipo de cobertura representa. Lencastre & Franco (1984) apud Paranhos & Paiva (2008) afirmam que o parâmetro C é obtido pela combinação das variáveis de cobertura e manejo do solo. Para a bacia hidrográfica em estudo a Tabela 4 reúne os valores do fator de uso e manejo do solo - C.

Tabela 4 - Cálculo do fator de declividade e comprimento da rampa.

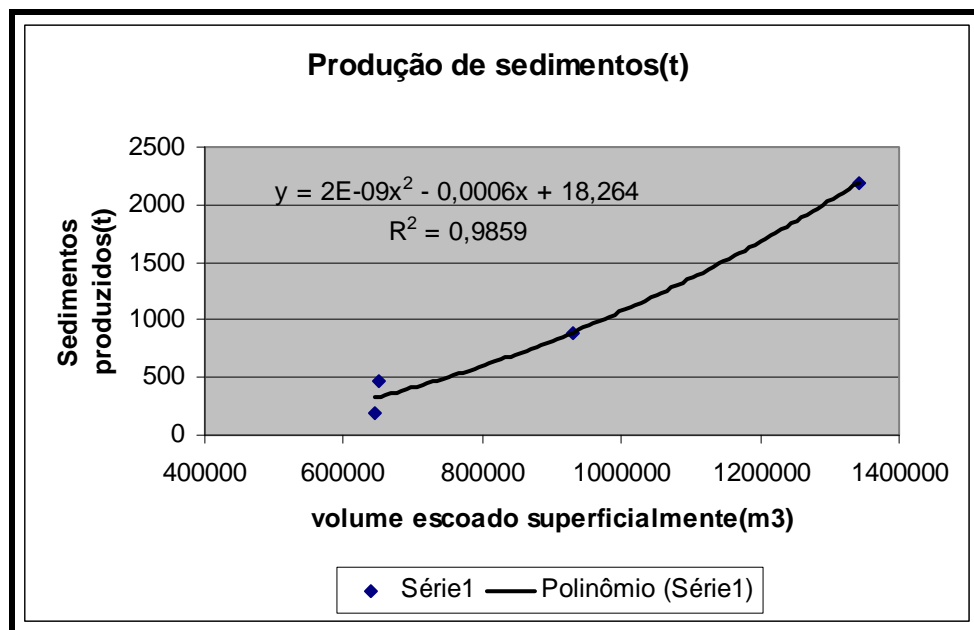
Estimativa do fator de cultivo e manejo do solo-C						
Sub-bacia	Área (km^2)	Agricultura (%)	Pastagens (%)	Matas (%)	Urbanização (%)	C
I	7,05	35	25,0	13,0	27	0,04
II	8,80	40	3,0	12,0	45	0,04
III	7,20	22	8,0	5,0	65	0,03
IV	14,30	58	16,0	9,0	17	0,07
toda bacia	38,22	40	9	16	35	0,05

O parâmetro K que expressa a erodibilidade do solo foi obtido através da formulação proposta por Wischemeier & Smith (1978) e os resultados para a bacia em estudo estão reunidos na Tabela 05. Considerando-se os valores mencionados na literatura, pode-se afirmar que estes se encontram dentro de uma faixa de variação aceitável tendo em vista o tipo de solo da região em estudo.

O fator de P da equação de perdas de solo representa a intensidade esperada de perdas de solo com utilização de determinada prática conservacionista e as perdas de solo quando a cultura esta plantada no sentido do declive. Os valores de P reunidos na Tabela 5 condizem com aqueles encontrados na literatura.

Tabela 5–Cálculo da produção de sedimentos.

Sub-bacia	R_w	K	LS	C	P	Yi(t)
I	1939397,80	0,012	1,02	0,04	0,2	197,0273
II	1759143,17	0,020	0,66	0,04	0,5	464,4138
III	1739137,91	0,02	0,85	0,03	1	886,9603
IV	3729832,79	0,01	0,84	0,07	1	2193,1417
toda bacia						3741,5431



6 - CONCLUSÕES

Com base no trabalho realizado, concluiu-se que o método de MUSLE proposto por Williams & Berned (1977) se adapta bem à bacia em estudo. Foi possível perceber que apesar de se utilizar apenas um evento para geração do modelo, os resultados foram coerentes com aqueles encontrados para outras bacias e nas quais o método de MUSLE foi aplicado. A metodologia de propagação de Williams (1975) foi aplicada na bacia do Rio Piracicaba no Estado de São Paulo, na região próxima a Campinas e encontrou-se uma relação entre o volume escoado e o total de sedimentos produzidos, o que permite estimar a quantidade de sedimentos produzidos para um evento hidrológico.

Analisando-se a produção de sedimentos obtidos pela Equação Universal de perdas de solos modifica, aplicada na área da bacia em estudo superestima o valor real. Mas, como não existe na literatura e nem curva chave de sedimentos medidos no campo os valores calculados e apresentados são bem otimistas na elaboração de projetos e análise de sedimentos da bacia. A bacia hidrográfica em estudo apresentada na Figura 1 possui área superficial de 38,22 km², para um volume total escoado de 3 milhões de metros cúbico de água precipitada resultando um total de sedimentos de 3.741,53 t.

7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CARDOSO, C.A.; H.C. T. D.; SOARES, C. P. B.; MARTINS, S.V. **Caracterização hidroambiental da bacia hidrográfica do rio Debossan**, Nova Friburgo, RJ. Rev. Árvore, Viçosa, v. 30, n. 2, Apr. 2006. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-67622006000200012&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 10 Mar. 2009. doi: 10.1590/S0100-67622006000200012.
- FESTI, A. V. **Projeto e Dimensionamento de Redes de Águas Pluviais**. Paulínia, 2008. Apostila, 85pg.
- Instituto Geográfico e Cartográfico do Estado de São Paulo – IGC (1982)
- PARANHOS, R. M; PAIVA, J. B. D. **Avaliação de Metodologia de Estimativa de Produção de Sedimentos em ma Pequena Bacia Rural de Encosta**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Vol.13, nº1. 2008. p.7-12.
- RIGHETTO, A. M., **Hidrologia e Recursos Hídricos**, EESC-USP, 1998, 398p.
- TOMAZ, P. – **Cálculos Hidrológicos e Hidráulicos para Obras Municipais** – 1ª. Edição, São Paulo, 2002, 263p.
- TUCCI, C. E. M - PORTO, R. L. L. – BARROS, M. T., **Drenagem Urbana**, ABRH, Porto Alegre, 1995, 428p.
- TUCCI, C. E. M., **Hidrologia – Ciência e Aplicação**, 2ª edição, ABRH, Porto Alegre, 2001, 588p.



9. VIEIRA, D. B. **Análise das Máximas Intensidades de Chuvas na Cidade de Campinas.** In IV Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos, ABRH, Fortaleza/CE, Brasil.
10. WILKEN, P.S., **Engenharia de Drenagem Superficial**, CETESB, São Paulo, 1978, 276p.
11. WILLIAMS E BERNDT (1977)
12. Wischemeier & Smith (1978)
13. ZUFFO, A. C. **Equações de Chuvas São Eternas?** In XXI Congresso Latino americano de Hidráulica, São Pedro/SP. Brasil, 2004.