

Relações entre chuvas intensas, vazões máximas e sedimentação do ribeirão Itaim, Taubaté, SP

RELATIONSHIP AMONG RAINFALL, MAXIMUM DISCHARGES AND SUSPEND SEDIMENT TRANSPORT IN ITAIM STREAM, TAUBATÉ, SP

Décio Werneck Moreira
Marcelo dos Santos Targa
Getulio Teixeira Batista
Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais da Universidade de Taubaté

RESUMO

Estudos de vazão em função de chuvas intensas são fundamentais para o planejamento do uso do solo de uma bacia. Existe uma grande variação entre diferentes bacias hidrográficas na relação entre a vazão e os diversos parâmetros da precipitação (intensidade (i), duração (d) e frequência (f)). Dessa forma, este trabalho teve por finalidade determinar a equação de chuvas intensas do tipo i-d-f, bem como a curva-chave e sua respectiva equação para a bacia do ribeirão Itaim com base em dados coletados *in locu* durante dois anos consecutivos e dados do Posto Meteorológico do Departamento de Ciências Agrárias da Universidade de Taubaté. Foram também determinadas as relações entre as variáveis: vazão do ribeirão (Q em m^3/s), alturas de chuvas (h em mm), intensidades de chuvas (i em mm/h), concentração de sedimentos em suspensão (q_s em mg/L) e vazão sólida (Q_s em kg/dia). Os resultados obtidos pelo método da regressão linear entre essas variáveis mostraram valores de R^2 de 0,19 ($n = 29$) a 0,73 ($n = 63$). Os resultados permitiram de forma inédita o estabelecimento da equação i-d-f e a estimativa precisa (73%) da carga de sedimentos com base na equação da vazão sólida derivada para o ribeirão Itaim. O ribeirão do Itaim apresentou uma carga média de sedimentos de 6.848 kg/dia estimada próximo à sua foz, o que reflete um problema de degradação. A curva-chave para estimativa da vazão do ribeirão Itaim foi obtida com um ajuste de 98% ($n = 50$). Esse estudo mostrou ainda que as funções obtidas provavelmente dependem de outros parâmetros não analisados nesse trabalho como, por exemplo, tipo de solo, cobertura vegetal, etc.

PALAVRAS-CHAVE

Chuvas intensas. Sedimentação. Vazão sólida. Vazões.

INTRODUÇÃO

O conhecimento das chuvas intensas e vazões máximas em uma bacia hidrográfica tem importância fundamental para a construção de obras hidráulicas e para o planejamento do uso do solo, uma vez que produzem enchentes, inundações e arraste de sedimentos. As relações entre esses parâmetros possibilitam, entre outros aspectos, a definição da equação de chuvas intensas e da curva de vazão sólida, que em última análise pode refletir o grau de degradação de uma bacia.

O Ribeirão Itaim, cuja bacia hidrográfica compreende uma área de 58 Km^2 no município de Taubaté, tem sua foz no rio Una, na área da Fazenda Piloto do Departamento de Ciências Agrárias da Universidade de Taubaté, o qual possui um Posto Meteorológico. As características físicas, importantes para a compreensão do regime hidrológico da bacia hidrográfica do Ribeirão Itaim já foram determinadas por Corrêa (2001), que concluiu que a bacia do Itaim é pouco sujeita a enchentes.

No entanto, segundo Ranzini e Lima (2002), a carga de sedimentos poderá ser facilmente percebida durante as precipitações intensas, que podem ser responsáveis por até 50% da perda de solo de uma bacia hidrográfica.

A equação que relaciona a vazão Q (m^3/s) de um curso d'água com a correspondente chuva intensa h (mm), ocorrida no mesmo dia ou no dia anterior, é indicada pela função $Q = f(h)$. Outra equação de interesse é aquela que relaciona a concentração de sedimen-

tos em suspensão (solos, vegetais e pequenas partículas) transportados pelo curso d'água, com a sua vazão Q. A concentração de sedimentos é representada por q_s (mg/L) e sua relação com a vazão é indicada pela função $q_s=f(Q)$. Também é importante relacionar Q e q_s com a intensidade I (mm/h) de chuva, chegando-se assim, nas funções $Q=f(I)$ e $q_s=f(I)$.

Assim, o presente trabalho teve por finalidade determinar a equação de chuvas intensas do tipo I-d-f, para a bacia hidrográfica do Itaim, a curva-chave e sua respectiva equação, bem como a curva de vazão sólida para a bacia do Ribeirão Itaim com base em dados coletados *in locu* durante dois anos consecutivos.

MATERIAL E MÉTODOS

O Ribeirão Itaim tem sua bacia hidrográfica totalmente contida no município de Taubaté, com sua nascente na Serra de Jambeiro, nas coordenadas: latitude 23°09'46" S e longitude 45°36'28" W e sua foz, no encontro com o rio Una, nas coordenadas 23°01'28" S e 45°30'23" W em terras da Fazenda Piloto do Departamento de Ciências Agrárias da Universidade de Taubaté - UNITAU (Figura 1). O Ribeirão Itaim possui comprimento de 21 km e sua bacia, área de 58,9 km². Sua altitude máxima é de 1060 m (nascente) e mínima de 577 m (foz), segundo Corrêa (2001).

No Ponto de Controle (Figura 1) foi determinada a seção do Ribeirão Itaim (m²) e, em sua margem direita, foi instalada uma régua linimétrica que permitiu a leitura, em cm, do nível da água. Neste mesmo local, foram colhidas as amostras de sólidos em suspensão e foram determinadas as velocidades da água, pelo método do flutuador (DAKER, 1989). A coleta de dados foi realizada regularmente, durante dois anos, três vezes por semana, no período de 02/05/02 e 02/05/04.

A coleta de água para análise de sólidos em suspensão foi feita semanal e regularmente, com garrafa de 2 litros, durante dois anos. As amostras foram encaminhadas para o Laboratório de Solos do Departamento de Ciências Agrárias - UNITAU, onde se utilizaram: cadinho de 50 ml, Becker de 1000 ml, pipeta volumétrica de 50 ml, pipetador de borracha, balança digital, dissecador, estufa, agitador magnético e barra magnética. A determinação da concentração de sólidos foi feita de acordo com a seguinte seqüência de operações:

1. Agitou a garrafa de amostra (2L) para homogeneização e colocou-se a mistura em um Becker de 1000 ml.

2. O Becker foi colocado sobre a placa do agitador magnético, juntamente com a barra magnética. Agitou-se a amostra por 30 segundos, para nova homogeneização.

3. Com a pipeta volumétrica, retirou-se um volume de 50 ml, colocando-o num cadinho de porcelana de mesmo volume.

4. O cadinho de porcelana foi colocado em banho-maria na estufa à 100° C, para vaporização de toda a água da amostra.

5. Vaporizada a água de amostra, o cadinho foi levado à estufa sob a temperatura de 105° C, durante 24 horas.

6. Terminado o tempo de 24 h, o cadinho foi retirado da estufa e colocado em um dissecador durante uma hora, até atingir a temperatura ambiente.

7. Após esse tempo, foi realizada a pesagem do cadinho, contendo o material sólido da amostra.

8. Depois de obtidos os dados da pesagem, calculou-se a concentração da amostra (q_s), de acordo com a Equação 1.

$$q_s = \frac{(p_2 - p_1) - 1000000}{V} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

q_s = concentração (mg/L)

P_1 = massa do cadinho vazio (g)

P_2 = massa do cadinho com o resíduo (g)

V = volume da amostra (ml)

As vazões (ou vazões líquidas) Q do ribeirão foram calculadas, pela equação da continuidade (Equação 2) em função da área (m²) da seção (A) e da velocidade (v) na superfície da água (m/s) no Ponto de Controle.

$$Q = vA \quad (\text{Equação 2})$$

A determinação da seção do Ribeirão Itaim foi feita por meio do seguinte procedimento: uma trena de material plástico de 30 metros de comprimento, graduada de dois em dois milímetros, foi esticada sobre o curso d'água junto à régua linimétrica. A determinação da profundidade da calha foi feita utilizando-se uma haste de alumínio de seção circular e 5/8 de diâmetro de polegada contendo uma trena metálica graduada a qual foi deslocada verticalmente, tocando o fundo, a

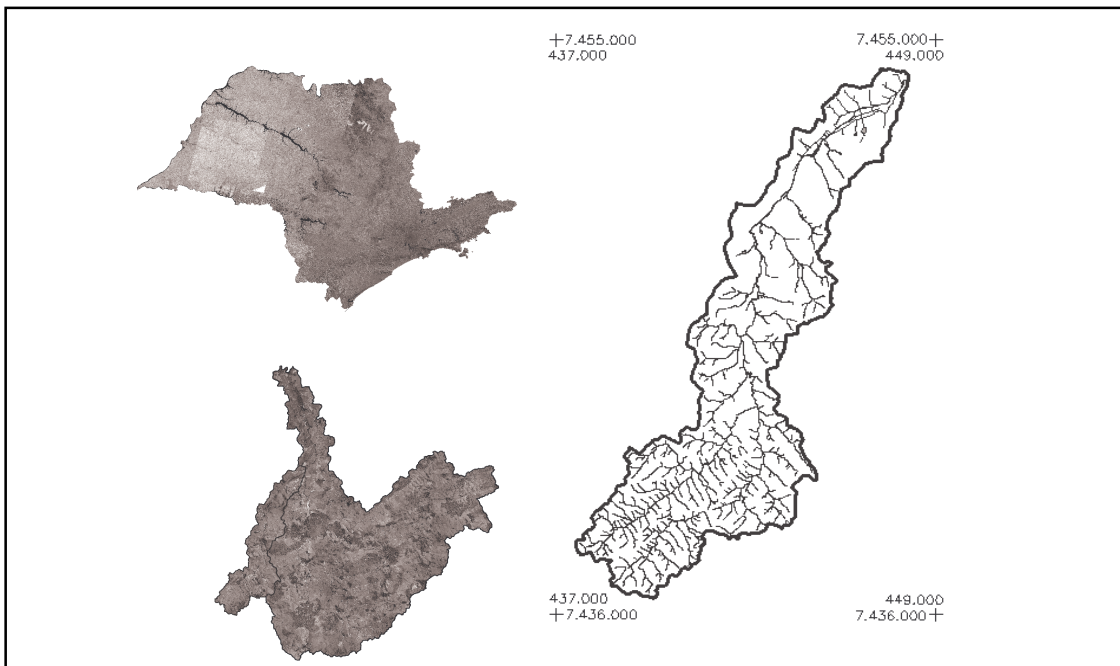


Figura 1 - Localização da Bacia do Ribeirão Itaim. Fonte: Batista e Targa (2005).

cada 20 cm ao longo da trena plástica. As medidas de profundidade do leito foram transferidas para um papel quadriculado, adotando-se a escala 1:40, de tal modo que cada quadrícula possuía lados de 20 cm x 20 cm = 0,2 m x 0,2 m = 0,04 m². Por meio da contagem da quantidade de quadrículas a cada 20 cm da régua linimétrica, e multiplicando-se por 0,04 obteve-se a seção em m².

A equação das chuvas (Equação 3) conhecida como equação I-d-f (Intensidade-duração-freqüência) para a bacia do Ribeirão Itaim foi ajustada com base nos dados de Intensidades de chuvas (mm/h) para o Posto Meteorológico Taubaté, SP- DAEE-E2-022 da Tabela 1, de Martinez Júnior e Magni (1999).

$$i = \frac{KT^3}{(t+c)^n} \quad (\text{Equação 3})$$

Onde i é a intensidade média máxima de chuva (mm/h), t é o tempo de duração da chuva (min) e c é uma constante. T é o tempo de retorno (anos), K , b e n são constantes que foram determinadas conforme metodologia descrita em Villela e Mattos (1975).

A curva-chave de um curso d'água é o gráfico do tipo $H = f(Q)$, onde H é a altura (m) da superfície livre da água e Q é a vazão correspondente. Na sua forma geral a equação de curva-chave é representada pela

Equação 4:

$$Q = a(h_0+b)^n \quad (\text{Equação 4})$$

Onde a e n são constantes que devem ser determinadas, h_0 é a altura do nível da superfície da água medida na régua linimétrica e b é a distância, em m, do zero da régua linimétrica até o ponto mais profundo do curso d'água.

Devido ao fato do Ribeirão Itaim ser raso, foi possível coincidir o zero da régua linimétrica com o ponto de maior profundidade, tornando $b=0$ e $h_0=H$ e deste modo a Equação 3 toma a forma da Equação 5.

$$Q = aH^n \quad (\text{Equação 5})$$

Aplicando logaritmos na Eq. 5, chega-se a:

$$\log Q = \log a + n \log H \quad (\text{Equação 6})$$

A representação gráfica da Equação 6 em papel dilogarítmico é uma reta, donde se determina a e n . As variáveis Q (vazão), h (altura de chuva), i (intensidade de chuva) e q_s (concentração de sedimentos) foram relacionadas entre si pelo método da regressão linear.

Buscou-se também determinar a Vazão Sólida (Q_s) do Ribeirão Itaim, em kg/dia, definida como o produto da concentração de sedimentos q_s , pela vazão Q do

curso d'água, conforme Fill e Santos (2001), sendo dada pela seguinte relação:

$$Q_s = q_s \cdot Q \quad (\text{Equação 7})$$

Com relação à equação das chuvas conhecida como i-d-f, na Equação 3 é comum autores (veja por exemplo VILLELA e MATTOS, 1975) igualarem o termo KT^b a uma constante (C), dando origem à expressão:

$$KT^b = C \text{ (constante)} \quad (\text{Equação 9})$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

No Ponto de Controle na Fazenda Piloto onde se encontra instalada a régua linimétrica, o Ribeirão Itaim é bem raso e a profundidade de sua lâmina d'água durante a maior parte do período estudado variou de 0,50m a 1,30m, sendo normalmente baixa a velocidade da correnteza, motivos estes de terem sido consideradas, para os cálculos na Equação 2, as velocidades na própria superfície da água.

A Figura 2 mostra a curva-chave para o Ribeirão Itaim, obtida com dados de H e Q (Equação 5).

Os valores de **a** e **n** da Equação 5 obtidos marcando-se os pontos da curva-chave em papel dilogarítmico, resultaram em $a=2,86$ e $n=1,14$ que permitiram a geração da equação da curva-chave (Equação 8) para o Ribeirão Itaim naquela seção, a qual apresentou um coeficiente de determinação igual a 0,98 para um total de 50 pontos analisados:

$$Q=2,86 H^{1,14} \quad (\text{Equação 8})$$

Aplicando-se logaritmos na Equação 9, chega-se a Equação 10:

$$\log C = \log K + b \log T \quad (\text{Equação 10})$$

Por outro lado, substituindo **C** da Equação 9 na Equação 3 e aplicando-se logaritmos, chega-se a:

$$\log i = \log C - n \log (t + c) \quad (\text{Equação 11})$$

Com base na Equação 11 e utilizando-se os valores de **i**, **t** e **T** da Tabela 1, gerou-se o gráfico da Figura 3, em papel dilogarítmico e obtiveram-se os valores de C_1 (1800), C_2 (2300), C_3 (2700), C_4 (3000), C_5 (3500), C_6 (4000) e C_7 (4800) no ponto $(t + 20) = 1$ e o valor do coeficiente angular **n** (1,05), igual para as 7 retas. Para que todas as retas da Figura 3 fossem paralelas, o valor de **c** da Equação 11, obtido por tentativas, segundo as recomen

Tabela 1- Intensidades máximas de chuvas (mm/h). Posto Taubaté, SP - DAEE-E2-022 - Períodos 1964-65, 1969-88, 1990-97.

t(min)	Período de Retorno T (anos)						
	2	5	10	25	50	100	200
10	89,0	18,9	138,7	163,6	182,2	200,6	243,1
20	72,0	94,9	110,2	129,4	143,6	157,8	190,5
30	60,5	79,2	91,6	107,3	118,9	130,5	157,1
60	41,0	53,2	61,3	71,5	79,1	86,6	104,0
120	25,1	32,4	37,3	43,4	47,9	52,4	62,9
180	18,1	23,4	26,9	31,4	34,6	37,9	45,4
360	10,0	12,9	14,9	17,3	19,2	21,0	25,2
720	5,3	6,9	8,0	9,3	10,3	11,3	13,6
1080	3,6	4,8	5,5	6,4	7,1	7,8	9,4
1440	2,8	3,6	4,2	4,9	5,5	6,0	7,2

Fonte: Martínez Junlor e Magni (1999).

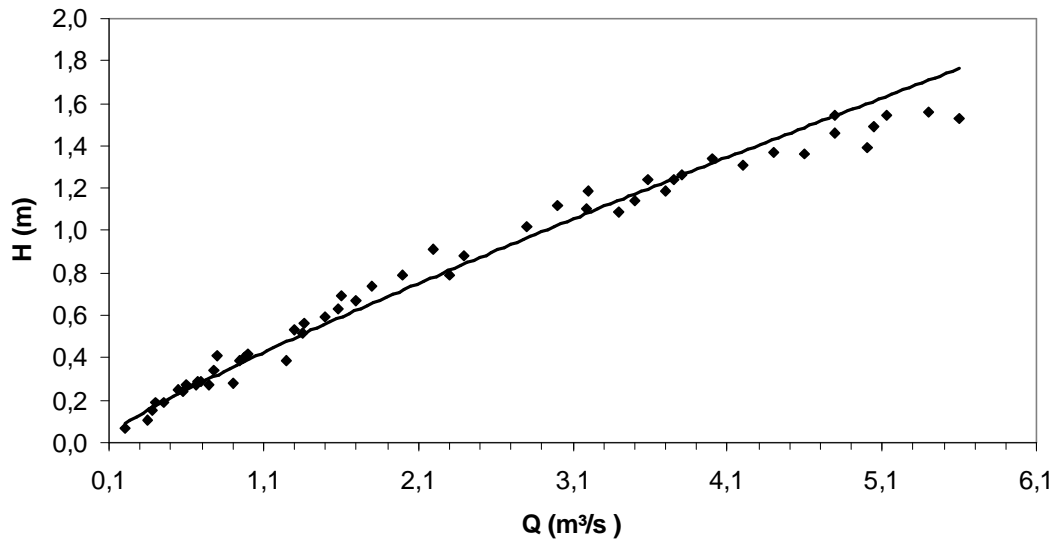


Figura 2 - Curva-chave para o Ribeirão Itaim no Ponto de Controle na Fazenda Piloto do Departamento de Ciências Agrárias da Universidade de Taubaté.

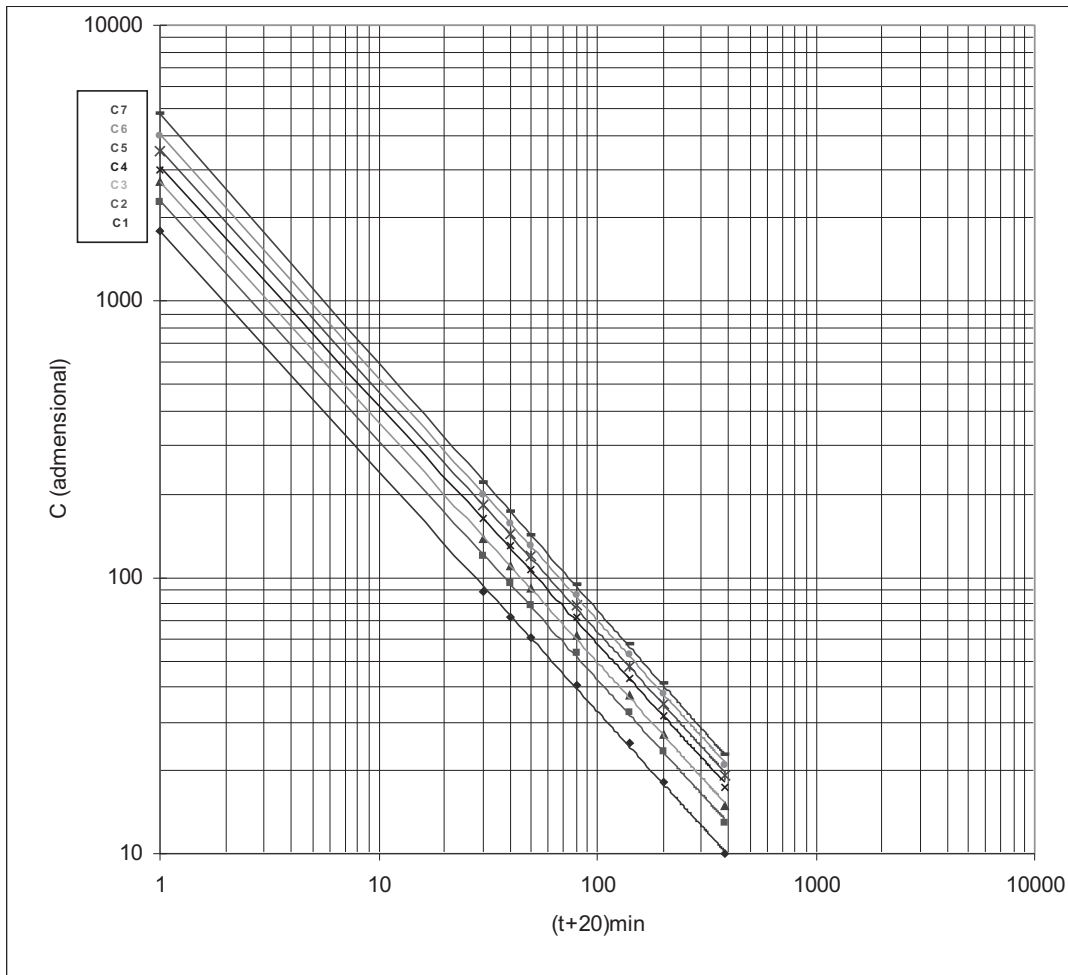


Figura 3 - Relação entre o log I (logaritmo da Intensidade de chuva) versus o log (t+20) (logaritmo do tempo de retorno mais a constante c=20), da Equação 10 para obtenção dos valores de C1 a C7 e do coeficiente angular n .

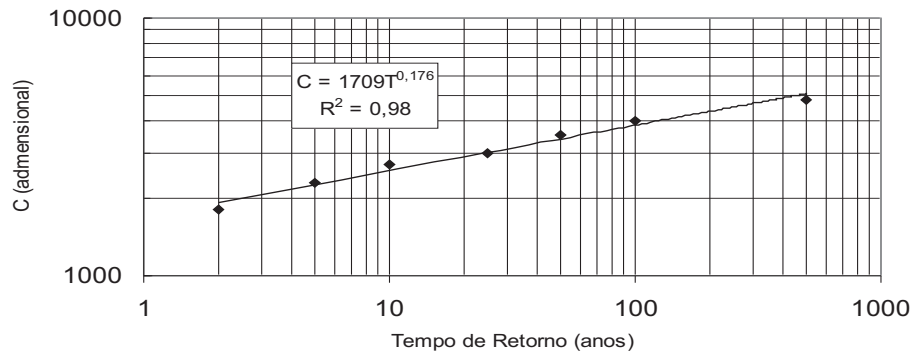


Figura 4- Relação entre as constantes (C) e o tempo de retorno (T) para a determinação de b e K para a equação I-d-f.

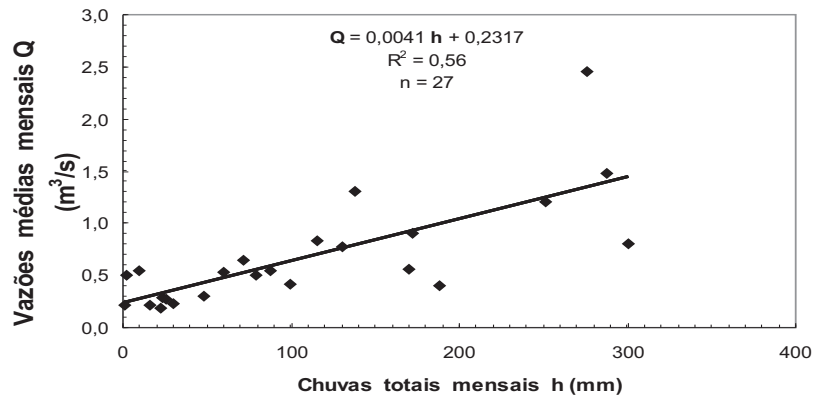


Figura 5- Chuvas totais mensais (h) x Vazões médias mensais (Q) para o Ribeirão Itaim, com base em dados de campo coletados entre maio de 2002 e maio de 2004.

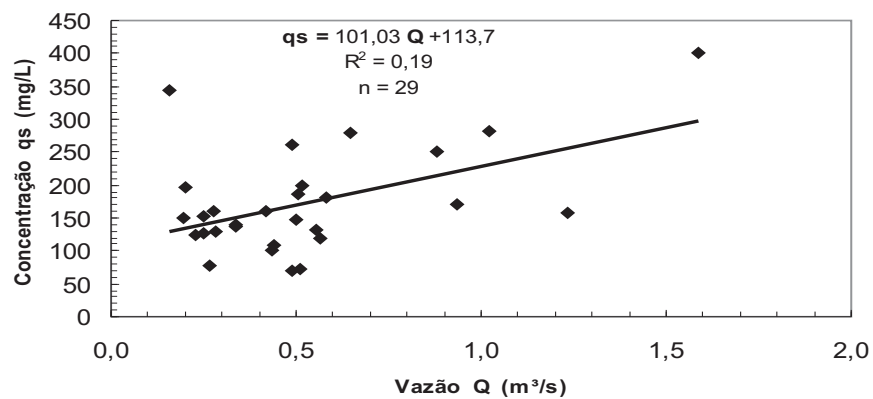


Figura 6- Vazão Q x Concentração de sedimentos (q_s) para o Ribeirão Itaim, com base em dados de campo coletados entre maio de 2002 e maio de 2004

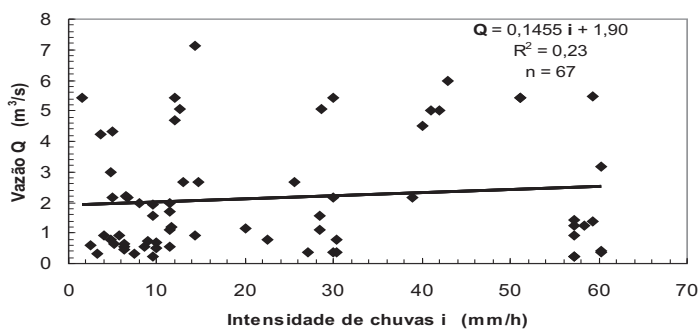


Figura 7- Intensidade de chuvas (i) x Vazão (Q) para o Ribeirão Itaim, com base em dados de campo coletados entre maio de 2002 e maio de 2004.

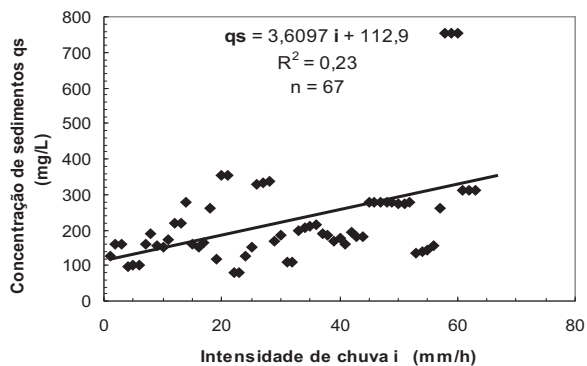


Figura 8- Intensidade de chuvas (i) x Concentração de sedimentos (q_s) para o Ribeirão Itaim, com base em dados de campo coletados entre maio de 2002 e maio de 2004.

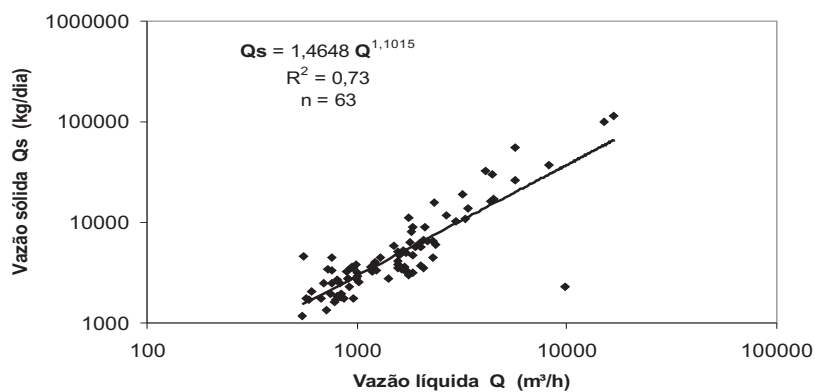


Figura 9- Vazão líquida (Q) x Vazão sólida (Q_s) para o Ribeirão Itaim, com base em dados de campo coletados entre maio de 2002 e maio de 2004.

dações de Villela e Mattos (1975), foi $c=20$.

Com base na Equação 10, fez-se um gráfico dos valores de C_1 a C_7 e os valores de T correspondentes em papel dilogarítmico (Figura 4), e obtiveram-se os valores $K=1709$ e $b=0,176$. Substituindo-se os valores (**K**, **b**, **c**, **n**) na Equação 3, tem-se a equação i-d-f para chuvas intensas na bacia do Ribeirão Itaim (Equação 12), que comparada às equações de Pfafstetter e de Martinez e Magni (São Paulo, 2000) para chuvas intensas no município de Taubaté, para valores diferentes de tempo de duração da chuva (t) e tempos de retorno (T), mostrou valores concordantes. Maiores detalhes podem ser encontrados em Moreira (2005).

$$i = \frac{1709 T^{0,176}}{(t + 20)^{1,05}} \quad (\text{Equação 12})$$

As variáveis Q (vazão), h (altura de chuva), i (intensidade de chuva) e q_s (concentração de sedimentos) foram relacionadas pelo método da regressão linear e são mostrados nas Figuras 5, 6, 7 e 8.

As Figuras 5, 6, 7 e 8, a seguir, apresentam as seguintes equações, respectivamente:

$$Q = 0,0041 h + 0,23 \quad (\text{Equação 13})$$

$$q_s = 101,03 Q + 113,7 \quad (\text{Equação 14})$$

$$Q = 0,1455 i + 1,90 \quad (\text{Equação 15})$$

$$q_s = 3,6097 i + 112,9 \quad (\text{Equação 16})$$

Foram observados valores baixos para os coeficientes de determinação (R^2) devido ao espalhamento dos pontos observados nas respectivas figuras. O pior valor de R^2 , mostrado na Figura 6, indica que a relação da concentração de sedimentos em suspensão (q_s) com a vazão Q é o parâmetro de estimação mais impreciso.

O gráfico $Q_s \times Q$, mostrado na Figura 9, tem a vantagem de apresentar os pontos (Q_s, Q) mais concentrados que os pontos (q_s, Q) da Figura 6, originando uma reta mais precisa ($R^2=0,73$) no gráfico dilogarítmico da Figura 9, conforme já observaram Fill e Santos, 2001.

O Ribeirão Itaim é afluente do rio Una pela margem esquerda, e a grande carga de sedimentos no rio nas sub-bacias do Una, é devida à erosão de estradas

vicinais e obras de engenharia. Esforços no planejamento de ações de mitigação e minimização de impactos ambientais e sociais decorrentes da má conservação de estradas rurais são essenciais no município de Taubaté (CATELANI; BATISTA, TARGA, 2005).

CONCLUSÃO

Em vista dos resultados obtidos neste trabalho, pode-se concluir que:

a) A equação i-d-f (intensidade, duração e frequência) para chuvas intensas, obtida de forma inédita para a bacia do Itaim, apresentou resultados consistentes com equações propostas para outros cursos d'água.

b) A estimativa da vazão com base na altura de lâmina d'água passa a poder ser obtida com precisão (98%) a partir do desenvolvimento inédito da equação "curva-chave" determinada para o Ribeirão Itaim.

c) Foi observada uma elevada carga de sedimentos no Ribeirão Itaim (6.848 kg/dia), o que reflete um sério problema de degradação ambiental dessa bacia.

d) As relações entre as variáveis h , Q , i , q_s observadas são válidas, numa primeira aproximação.

e) A relação entre a vazão sólida Q_s e a vazão líquida Q apresentou alta precisão (73%). Sugere-se a inclusão de outras variáveis, por exemplo, a turbidez para aumentar a precisão da estimativa da carga de sedimentos.

ABSTRACT

Studies of river discharge as a function of intense rainfall are essential for land use planning in a watershed. There is a great variation among watersheds regarding the relationship between the river discharge and precipitation parameters (intensity (i), duration (d) and frequency (f)). Thus, this work had the objective of deriving the i-d-f type rainfall equation for Itaim watershed and its rating curve equation (discharge equation as a function of water height) based on two years of data collected in Itaim stream and of the Meteorological Station at the Department of Agrarian Science of the University of Taubaté. The relationship among the following variables: discharge (Q in m^3/s), rainfall height (h in mm), rainfall intensities (i in mm/h), sediment concentrations (q_s in mg/L) and sediment

discharge (Q_s in kg/day) were established. The results were obtained by linear regression method and the determination coefficients (R^2) ranged from 0.19 ($n = 29$) to 0.73 ($n = 63$). The results allowed, in an inedited way, the establishment of the i-d-f equation and the precise (73%) estimation of sediment charge based on the solid discharge equation for Itaim stream. Itaim stream presented a mean sediment discharge load of 6,848 kg/day what indicates a degradation problem in this watershed. The rating-curve derived for Itaim stream showed an adjustment of 98% ($n = 50$). This study showed that the relationships studied depend also on other parameters not analyzed in the present work such as soil types, vegetation cover, etc.

KEY-WORDS

Discharges. Rainfall. Sediments. Sediment discharge.

REFERÊNCIAS

- BATISTA, G.T., TARGA M. S., FIDALGO, E.C.C. *Banco de dados ambientais da Bacia do Rio Una, Bacia do Rio Paraíba do Sul*. Disponível em: <www.agro.unitau.br/dspace>. Acesso em: 17 de ago. 2005.
- CATELANI, C.S.; BATISTA, G.T.; TARGA, M.S. Geoprocessamento na determinação da proximidade de estradas vicinais em relação à rede de drenagem em uma bacia hidrográfica no Município de Taubaté, SP. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., 2005, Goiânia. *Anais...* Goiânia: INPE, 2005. p. 3723-3730.
- CORRÊA R.C. *Avaliação das Atividades Antrópicas sobre a Bacia hidrográfica do Ribeirão Itaim - SP*. 2001. 109f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) - Departamento de Ciências Agrárias, Universidade de Taubaté. Taubaté, 2001.
- DAKER, A. *A água na agricultura: Irrigação e drenagem*. 7.ed. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 1989. v.3. 543p.
- FILL, H. D. ; SANTOS, I. Estimativa de concentração de sedimentos em suspensão através da profundidade de Sechi. In: SIMPÓSIO DE HIDRÁULICA E RECURSOS HÍDRICOS DOS PAÍSES DE LÍNGUA OFICIAL PORTUGUESA, 5., 2001, Aracaju. *Anais...* Aracaju: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2001. p. 1-9.
- MARTINEZ JUNIOR, F.; MAGNI, N.L.G. *Equações de chuvas intensas do Estado de São Paulo*. São Paulo: DAEE/CTH, 1999. 141p.
- MOREIRA, D.W. *Intensidades máximas de chuvas e sua influência na vazão máxima e sedimentação do Ribeirão Itaim, Taubaté - SP*. 2005, 160f. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais). Departamento de Ciências Agrárias, Universidade de Taubaté. Taubaté, 2005. 160p.
- RANZINI, M.; LIMA P. Comportamento hidrológico, balanço de nutrientes e perdas de solo em duas microbacias reflorestadas com *Eucalyptus*, no Vale do Paraíba, SP. *Scientia Forestalis*, n. 61, p. 144-159, jun. 2002.
- SÃO PAULO (Estado). Secretaria de Energia, Recursos Hídricos e Saneamento. Departamento de Águas e Energia Elétrica. *Sistema de informações para gerenciamento de recursos hídricos do Estado de São Paulo (SIGRH). Plano estadual de recursos hídricos 2000-2003. Banco de dados pluviométricos, fluviométricos, e pluviográficos do Estado de São Paulo. Regionalização Hidrológica do Estado de São Paulo*. São Paulo: Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica (FCTH). 2000. Disponível em: <[http:// www.sigrh.sp.gov.br](http://www.sigrh.sp.gov.br)> .
- VILLELA, S. M., MATTOS, A. *Hidrologia Aplicada*, São Paulo: Mc-Graw-Hill, 1975, 273p.

Marcelo dos Santos Targa

Prof. Dr. do Departamento de Ciências Agrárias da Universidade de Taubaté
Estrada Dr. José Luis Cembranelli, 5.000
Itaim - Taubaté-SP
CEP: 12.081-010
e-mail: mtarga@agro.unitau.br

TRAMITAÇÃO

Artigo recebido em: 31/08/2005
Aceito para publicação em: 13/04/2006