

ANÁLISE DA DINÂMICA HIDROSSEDIMENTOLÓGICA EM UMA BACIA HIDROGRÁFICA NO SUL DO BRASIL

Analysis of the Hydrosedimentological Dynamic in a Catchment in South of Brazil

Leandro Redin Vestena
Universidade Estadual do Centro-Oeste
Guarapuava/PR – Brasil
lvestena@gmail.com

Artigo recebido para publicação em 26/05/2009 e aceito para publicação em 04/12/2009

RESUMO: O presente trabalho tem por objetivo analisar a dinâmica hidrossedimentológica em uma bacia hidrográfica no sul do Brasil, por meio da descarga líquida (Q) e da concentração de sedimento em suspensão (C_{ss}), monitorados automaticamente por sensores. A Q e a C_{ss} foram comparadas em 25 eventos pluviométricos, na bacia hidrográfica do Caeté, Alfredo Wagner/SC, entre setembro de 2006 e março de 2008, por meio das análises de regressão, correlação e do comportamento das variáveis ao longo do tempo (*histerese*). A C_{ss} máxima não apresentou bons índices de correlação com a pluviosidade total e com a descarga líquida máxima, mas sim com a pluviosidade máxima (intensidade). Os índices de correlação entre vazão e C_{ss} apresentaram coeficiente de Pearson (R) superior a 0,70 em 56% dos eventos. Contudo, verificou-se que, na ascensão do hidrograma, os índices de correlação são baixos, enquanto na recessão altos. A relação entre descarga líquida e concentração de sedimento em suspensão apresentou comportamento do tipo *figura oito*, com pico de concentração de sedimento em suspensão que antecede o da vazão, com a presença de mais de um pico por evento, representada por uma curva no sentido horário, seguida por outra curva no sentido anti-horário. Por fim, constatou-se que o monitoramento automático é de extrema importância para o entendimento da dinâmica dos processos hidrossedimentológicos, por possibilitar medições contínuas em intervalos de tempos pequenos (minutos), pois dados obtidos em intervalos de tempos grandes (dias) podem esconder variações e comportamentos significativos da dinâmica dos processos hidrossedimentológicos.

Palavras-chave: Hidrossedimentologia. Concentração de Sedimento em Suspensão. Vazão.

ABSTRACT: The present work had for objective to analyze the hydrosedimentological in a catchment in the south of Brazil, through the liquid discharge (Q) and the sediment concentration in suspension (C_{ss}), monitored automatically by sensors. The Q and C_{ss} were compared in 25 pluviometric events, happened from September, 2006 to March, 2008, in the Caeté Catchment in Alfredo Wagner City, Santa Catarina State, through regression analyses, correlation and of the behavior of the variables over the time (*histerese*). A maximum of C_{ss} didn't show good correlation coefficients with the total rainfall and the maximum liquid discharge but with the maximum rainfall (intensity). The correlation coefficients between flow and C_{ss} had Pearson's coefficient (R) greater than 0.70 in 56% of events. However, it was found that the rise of the hydrograph, the correlation coefficients are low, while in recession high. The relationship between discharge and C_{ss} has the behavior type "eight figure" where the C_{ss} peak precedes the discharge peak with the presence of more than one peak for event, represented by a curve in a clockwise direction,

followed by another curve in the counterclockwise direction. Finally, it was found that the automatic monitoring is extremely important for understanding the dynamics of the hydrosedimentological processes, enabling continuous measurements on small time intervals (minutes) because data from large time intervals (days) may hide variations and significant behaviors of the dynamics of the hydrosedimentological processes.

Keywords: Hydrosedimentology. Sediment Concentration in Suspension. Flow.

1. INTRODUÇÃO

O conhecimento da dinâmica dos processos hidrossedimentológicos na bacia hidrográfica fornece informações que fundamentem a tomada de decisões e subsidiem um planejamento de manejo de uso racional dos recursos naturais.

Dentre os problemas relacionados à deterioração da qualidade da água dos rios vincula-se o desequilíbrio no aporte de sedimentos finos nos canais que produzem turbidez e impedem a penetração da luz e calor, reduzindo a atividade da fotossíntese e a população de peixes, além de atuarem como portadores de poluentes (inseticidas, herbicidas, metais pesados, bactérias, vírus). As partículas em suspensão degradam a água, aumentando o custo de tratamento para os usos humanos (consumo residencial, industrial ou agrícola). Os sedimentos ocasionam erosão das margens, assoreamento e alteração na geometria do canal fluvial, prejudicando a navegação e provocando enchentes locais mais frequentes (CARVALHO, 1994; WARD e ELLIOT, 1995).

Os sedimentos ocasionam impactos positivos, tais como redução da ação erosiva da água no escoamento dos rios, atua como redutor de outros poluentes, melhorando dessa forma a purificação da água, permite transportar microrganismos ou matéria orgânica que melhoram a fauna fluvial, podem carregar nutrientes fertilizando terras e servirem para aterros, como impermeabilizantes a construção geral (CARVALHO, 1994).

No município de Alfredo Wagner, Região Serrana de Santa Catarina, a demanda de água tem aumentado em função, principalmente, do crescimento populacional e da elevação do consumo *per capita*,

somados ao aumento da poluição hídrica, que vem deteriorando a qualidade dos recursos hídricos da bacia hidrográfica do Caeté, principalmente devido ao uso acelerado e desordenado do solo.

O uso inadequado da terra na bacia hidrográfica do Caeté e uma paisagem de relevo fortemente dissecado com encostas íngremes tornam mais suscetível à ocorrência dos processos erosivos. Por conseguinte, os processos de erosão, transporte e deposição de sedimentos.

O transporte de sedimento pelos cursos fluviais é um fenômeno complexo e um dos desafios tem sido entender a dinâmica dos processos a partir de medições pontuais em intervalos de tempo diários, pois medições diárias podem esconder variações significativas, principalmente em pequenas e médias bacias hidrográficas.

O monitoramento, entendido como um processo contínuo de medição das características de um determinado fenômeno (pluviosidade, vazão, concentração de sedimento em suspensão), torna-se fundamental para a compreensão dos processos hidrossedimentológicos. Nessa direção, o presente estudo utiliza-se de dados monitorados automaticamente para entender a dinâmica dos processos hidrossedimentológicos na bacia do Rio Caeté, município de Alfredo Wagner/SC, por meio da análise da relação entre a descarga líquida (Q) e a concentração de sedimento em suspensão (C_{ss}), durante eventos pluviométricos ocorridos entre setembro de 2006 e março de 2008.

Nos cursos fluviais em torno de 80% de todo o sedimento transportado ocorrem durante as fortes precipitações (CARVALHO, 1994). Assim, a análise da relação da produção de sedimentos e as características da vazão podem ajudar no entendimento dos pro-

cessos que atuam no transporte de sedimento durante os eventos pluviométricos.

A carga sólida em suspensão compreende partículas de granulometria reduzida (principalmente silte e argila) que, por serem pequenas, se conservam em suspensão pelo fluxo turbulento. A carga sólida em suspensão pode representar mais de 90% do material total transportado (WARD e TRIMBLE, 1995). As partículas de granulometria maior como areias e cascalhos, são roladas, deslizadas ou saltam ao longo do leito dos rios.

A carga de sedimento em suspensão nos rios é extremamente sensível às mudanças de uso da terra na bacia de drenagem, independente destas ocasionarem ou não modificação no regime fluvial (REID *et al.*, 1997). De modo geral, pode-se afirmar que as atividades agrícolas, as malhas de acesso (estradas, caminhos, vias de acesso – sem pavimentação) e os distúrbios nos canais fluviais contribuem significativamente para o incremento da quantidade de sedimento transportada nos cursos fluviais.

Pesquisas demonstram a complexidade da relação Q e C_{ss} . Xu (2002), ao estudar a relação entre o diâmetro dos sedimentos em suspensão e a descarga líquida, verificou que o aumento da descarga fluvial e da C_{ss} ocasiona uma diminuição abrupta na quantidade de sedimentos suspensos $> 0,05$ mm, passando posteriormente a aumentar gradualmente, enquanto a porcentagem de sedimento suspenso $< 0,01$ mm apresenta padrão de variação inverso.

O regime pluviométrico também afeta a relação C_{ss} e Q como demonstraram os estudos realizados por Steegen *et al.* (2000), que Gregory e Walling (1973) e Van Dijk e Kwaad (1996), verificaram consideráveis diferenças sazonais, principalmente entre o inverno e o verão. Enquanto, Chikita (1996) avaliou as relações existentes entre C_{ss} e Q , para diferentes condições pluviométricas, concluindo não haver diferenças significativas na relação C_{ss} e Q estabelecida para condições pluviométricas efetivas e de estiagem.

De acordo com Williams (1989), o estudo e a compreensão de como variam a C_{ss} e vazão possibilita esboçar o regime hidrossedimentológico. O autor define cinco modelos de relações (histerese) entre C_{ss} e Q em: (1) única linha (reta ou curva) (*single-valued line*); (2) curva no sentido horário (*clockwise loop*); (3) cur-

va no sentido anti-horário (*counterclockwise loop*); (4) linha única acrescida de uma volta (*single line plus loop*); e (5) figura oito (*figure eight*).

O pico de Q e o da C_{ss} podem ocorrer de três formas distintas. O pico da C_{ss} pode ocorrer antes do pico de vazão, durante e depois, sendo mais comum o pico de sedimento antecipar-se ao pico da vazão (CARVALHO, 1994).

A relação Q e C_{ss} varia com o tempo, influenciada pela intensidade e distribuição da chuva, variação temporal da taxa de escoamento superficial e forma do hidrograma, diferentes tipos de uso da terra que podem beneficiar ou dificultar a ocorrência dos processos erosivos, declividade da bacia hidrográfica, temperatura antecedente, condições de umidade e descarga que influem na quantidade de sedimento a ser fornecida por erosão das vertentes e do canal, pelas distâncias percorridas pelos sedimentos, pelo armazenamento/mobilização dos sedimentos disponíveis e pela taxa de sedimentação (WILLIAMS, 1989; REID *et al.*, 1997).

Para pequenas bacias hidrográficas em regiões úmidas, destacam Sammori *et al.* (2004), a relação Q e C_{ss} do tipo curva no sentido horário, ou seja, à direita (histerese), geralmente ocorre quando a fonte de sedimento está relacionada à intensidade da chuva, com pico de C_{ss} acontecendo antes do pico de vazão.

Dessa forma, como evidencia Jansson (2002), a importância e a influência das características físicas locais na dinâmica do transporte de sedimento e a histerese tem contribuído para localizar a fonte de sedimentos suspensos e compreender o mecanismo de transporte de sedimentos.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os dados pluviométricos, fluviométricos e sedimentológicos utilizados foram obtidos por meio de sensores automáticos instalados na exutória da bacia hidrográfica do Caeté, mais especificadamente, na Ponte do Caeté, na longitude $49^{\circ} 20' 0,40''$ W e latitude $27^{\circ} 42' 18,13''$ S, a uma altitude de 475 metros, em intervalos horários, no período compreendido entre setembro de 2006 e março de 2008.

Os dados fluviométricos monitorados correspondem à altura da cota da régua linimétrica horárias,

obtida por meio de um sensor de nível SITRON LH-840. A vazão foi obtida por meio da determinação da curva-chave pelo método logarítmico, enquanto a extrapolação superior pelo método de Stevens com base nas fórmulas do regime uniforme em canais (Chezy e Manning) e a inferior pelo método gráfico, como prescrito por Santos *et al.* (2001).

O monitoramento da C_{ss} deu-se pela medição da refletância da turbidez da água por meio de um sensor de turbidez, modelo SL 2000-TS, a partir da luz infravermelha imune à cor da água, na faixa de medição de turbidez de 0 ~ 2500 NTU formazina. Para a determinação da C_{ss} na seção, utilizou-se um amostrador de sedimentos em suspensão USDH-48 (AMS-1), por meio de amostras integradas na profundidade, pelo método de amostragem por igual incremento de largura, como descrito em Carvalho *et al.* (2000), e a C_{ss} obtida por ensaio de filtração no Laboratório Integrado do Meio Ambiente (LIMA) do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), para comparação com a C_{ss} coletada pontualmente.

Para estabelecer a relação C_{ss} e Q foram escolhidos 25 eventos ocorridos no período de setembro de 2006 a setembro de 2008. Os eventos foram escolhidos seguindo os seguintes critérios básicos: eventos

de chuva, cuja quantidade proporcionou alterações nas vazões e C_{ss} e intervalos de tempo entre o evento de chuva e a resposta no fluxo de água no canal que atendem as condições do tempo de concentração da bacia.

A avaliação da relação C_{ss} e Q deu-se, por meio da curva de histerese e análises de regressão e correlação. As análises consistiram em plotar num gráfico cartesiano os pares de informação referentes a cada observação, obtendo-se o denominado gráfico de dispersão, a reta arbitrária e a equação que a representa, assim como o coeficiente de determinação da correlação (R^2) e o coeficiente de correlação de Pearson (R).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A bacia hidrográfica do Caeté, com aproximadamente 163 km² de área, localiza-se no município de Alfredo Wagner, Região Serrana do Estado de Santa Catarina, entre as coordenadas geográficas 27°41'40.77" a 27°52'35.83" de latitude sul e 49°11'14.49" a 49°20'47.60" de longitude oeste (coordenadas UTM – *Universal Transversa de Mercator*: 6935296 a 6915356 e 678741 a 662769, respectivamente), no datum SAD 69 (*South American Datum 1969*) (FIG. 1).

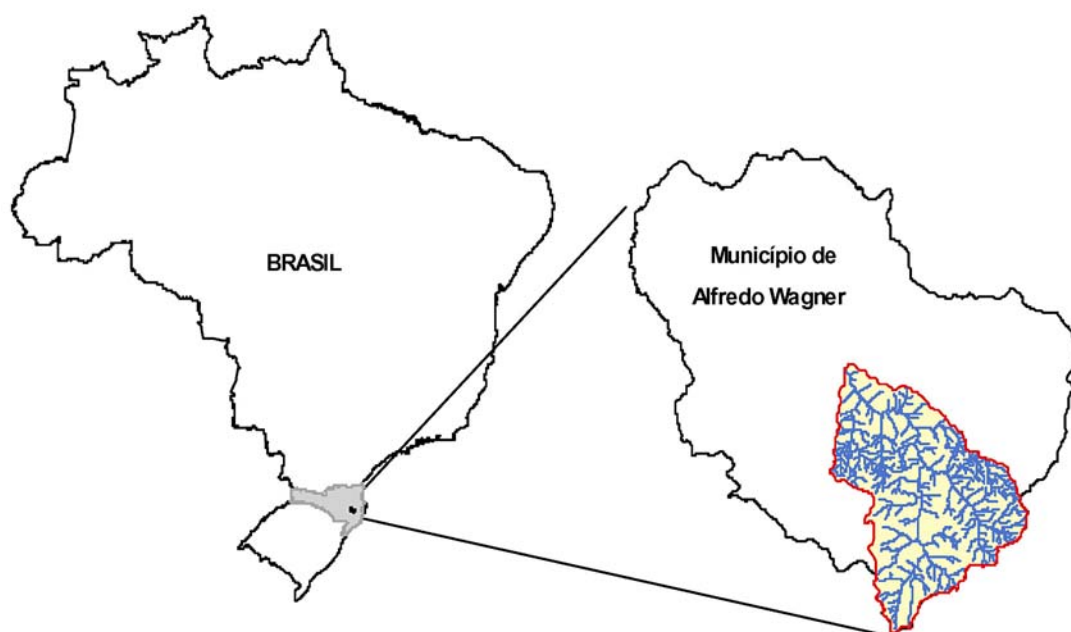


FIGURA 1: Localização da bacia hidrográfica do Caeté, no município de Alfredo Wagner/SC

Fonte: Vestena *et al.* (2006). Org.: O autor

A hidrografia na bacia é caracterizada por uma significativa densidade de drenagem (1,949 km/km²). A grande diferença altimétrica na bacia (1293 metros) reflete em cursos fluviais encachoeirados, com saltos e corredeiras que favorecem os processos de transporte de sedimentos (VESTENA *et al.*, 2006).

O relevo é dissecado com encostas íngremes, patamares e vales estruturais, onde atividades de uso inadequado do solo na bacia tornam mais suscetíveis as ocorrências dos processos erosivos (SILVA e KOBIYAMA, 2004). A dissecação é representada por forma de relevo do tipo montanhoso, escarpado, colinoso e morraria. Na bacia encontram-se depósitos colúvio-aluvial, formados basicamente por sedimentos areno-argilosos com grânulos e seixos com litologias predominantemente quartzíticas, depositadas em fluxos de regimes torrenciais (HERRMANN e ROSA, 1991). Os vales em “V” são caracterizados pelo sistema de drenagem encaixada, com escoamento superficial de alta velocidade e energia, resultando em processo de erosão inicialmente entre sulco e sulco, podendo evoluir à erosão por canais e voçorocas. Este tipo de formação é predominante no vale do Rio Caeté (CHECCHIA *et al.* 2006).

O clima na bacia do Rio Caeté está sob o domínio da zona extratropical, o que resulta em temperaturas com caráter mesotérmico – temperaturas anuais médias entre 16°C e 20°C, inverno frio e verão amenizado pelas altitudes. As chuvas são abundantes e distribuídas ao longo do ano, portanto, não se distingue

um período seco (MONTEIRO, 1963). A temperatura média anual é próxima de 19°C, apresentando oscilações que variam de -2° (inverno) a 30°C (verão), com a ocorrência de geadas nos meses de inverno. A umidade relativa média do ar é de 85%. (SANTA CATARINA, 1986). A precipitação média anual no município de Alfredo Wagner fica em torno de 1.660 mm, com maiores incidências na primavera e no verão. Os meses mais chuvosos são dezembro (165 mm), janeiro (202 mm) e fevereiro (189 mm) e os menos chuvosos, abril (92 mm), maio (109 mm) e junho (97 mm) (ALVES, 2004).

A geologia na bacia é bem diversificada constituída praticamente por camadas horizontais de arenito, siltitos, argilitos, folhelhos e basaltos pertencentes à Bacia do Paraná (SHIMIZU *et al.*, 1995).

Os solos presentes na bacia do Rio Caeté, de acordo com Sachet (1994), estão associados principalmente a Cambissolos e Neossolos e apresentam-se de modo geral alcalinos e com fertilidade natural baixa.

O uso da terra é caracterizado por matas, reflorestamento, campo, solos expostos e cultivos. As áreas com mata (vegetação arbórea) predominam em 52,2% da bacia, seguido por 41,8% de campo (vegetação herbácea e pastagens cultivadas), 2,2% de solo (solos expostos e afloramentos rochosos), 2,1% de reflorestamento e 1,7% de cultivos (VIECILI, 2005). A principal atividade agrícola é o cultivo da cebola, associada geralmente com lavouras de feijão e milho em pequenas propriedades.

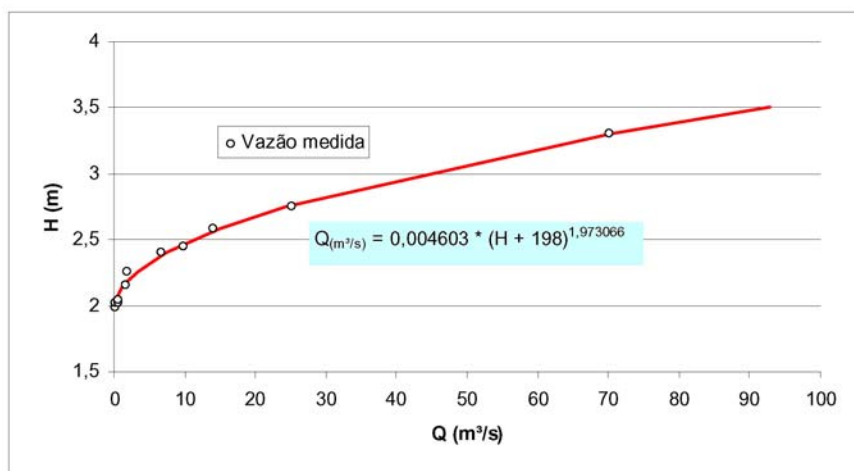


FIGURA 2: Curva-chave da Estação fluviométrica Ponte do Rio Caeté

Fonte: Dados EPAGRI (2007). Org.: O autor

A curva-chave foi determinada para a obtenção da vazão, a partir de medidas pontuais da descarga líquidas e do nível de água em condições fluviométricas diversificadas (FIG. 2). A curva-chave determinada foi de $Q_{(m^3/s)} = 0,004603 (H + 1,98)^{1,973066}$, sendo H o nível de água na régua fluviométrica em metros.

A C_{SS} na seção transversal do curso fluvial, obtida pelo método de amostragem por igual incremento de largura com o auxílio do amostrador US-

DH-48, foi correlacionada com a C_{SS} pontual monitorada pelo sensor de turbidez para determinar a C_{SS} na seção do curso fluvial. Nessa seção verificou-se uma pequena diferença entre a C_{SS} pontual e a C_{SS} integrada da seção transversal do curso fluvial (FIG. 3). Elas apresentaram considerável índice de correlação ($R = 0,9979$), sendo que a C_{SS} pontual mostra-se superior à C_{SS} média da seção transversal do Rio Caeté.

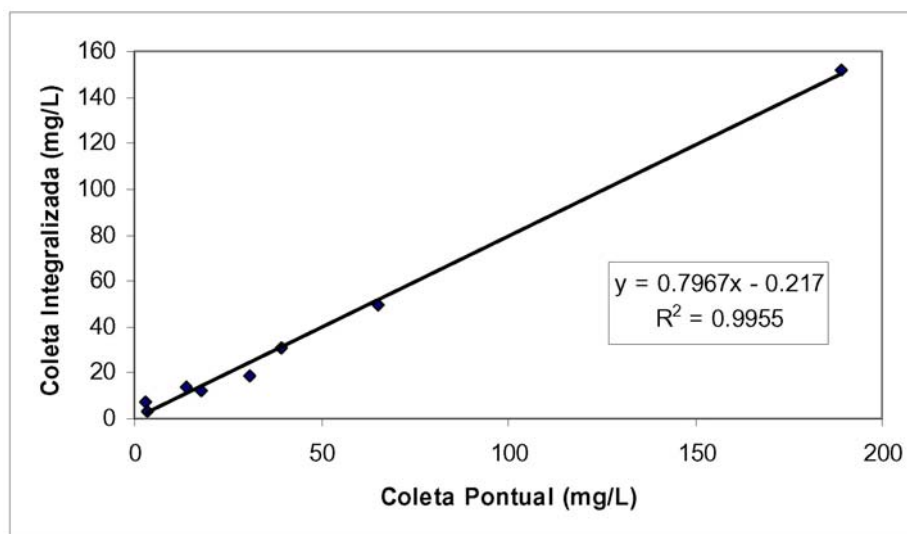


FIGURA 3: Relação entre a C_{SS} pontual e integrada a seção fluvial

Fonte: Trabalho de campo. Org.: O autor

Os aspectos fluviais do Rio Caeté e as características da bacia hidrográfica, principalmente a grande diferença altimétrica entre as nascentes e a exutória, associados aos solos rasos, beneficiam o escoamento superficial em detrimento da infiltração, acabam também determinando um tempo de concentração rápido e um fluxo turbulento decorrente de corredeiras e cachoeiras, com queda de nível que, de modo geral, favorecem a dissolução dos sedimentos ao longo da seção transversal fluvial.

Na TAB. 1, observa-se o período compreendido em cada evento selecionado, a pluviosidade no evento, a vazão máxima, a C_{SS} máxima e a pluviosidade máxima observada nos 25 eventos utilizados. Na tabela 1 é possível observar que a C_{SS} máxima nos eventos variou de 77,4 a 13.204,6 mg/L, sendo que a C_{SS} máxima observada não ocorreu no evento de maior volume de chuva, nem no de maior vazão máxima, mas

naquele que apresentou maior pluviosidade máxima.

A partir dos dados contidos na TAB. 1, estabeleceram-se relações entre a C_{SS} máxima e os demais indicadores e verifica-se que a C_{SS} máxima não apresenta índices de correlação com a pluviosidade total e a descarga líquida máxima, ao passo que apresentou certo índice de correlação com a pluviosidade máxima (intensidade), demonstrado por um R de 0,60 ($y = 229,63x - 1232,6$, sendo y a C_{SS} mg/L/h e x a pluviosidade máxima mm/h). Na bacia hidrográfica do Caeté, a intensidade da chuva influencia na quantidade de sedimento em suspensão, pois, quanto maior a intensidade, maior a quantidade de sedimento em suspensão no curso fluvial.

Além disso, convém destacar a importância do relevo na C_{SS} . Na bacia, o relevo dissecado, constituído por vertentes íngremes (elevada declividade), favorece a concentração do fluxo e uma resposta hidrológica

Evento	Data/Hora de início	Data/Hora de término	P total no evento (mm)	P máxima horária (mm)	Q máxima horária observada (m ³ /s)	C _{ss} máxima horária observada (mg/L)
1	04/10/06 – 18:00	09/10/06 – 23:00	32,5	27,4	31,2	13204,6
2	10/10/06 – 00:00	17/10/06 – 21:00	57,1	11,4	24,5	1780,2
3	01/11/06 – 01:00	06/11/06 – 09:00	52,2	18,2	191,5	1568,8
4	06/11/06 – 01:00	10/11/06 – 07:00	25,8	24,3	38,1	215,6
5	15/12/06 – 17:00	19/12/06 – 15:00	12,0	8,0	10,3	358,0
6	11/01/07 – 12:00	18/01/07 – 01:00	32,9	7,1	55,6	2119,7
7	19/01/07 – 00:00	24/01/07 – 14:00	28,6	11,4	8,6	348,9
8	28/02/07 – 00:00	03/03/07 – 15:00	53,0	27,2	367,5	2365,0
9	11/03/07 – 07:00	16/03/07 – 08:00	24,7	12,4	14,4	480,0
10	03/04/07 – 02:00	06/04/07 – 22:00	14,8	6,4	17,2	560,1
11	15/05/07 – 13:00	19/05/07 – 19:00	54,0	6,0	93,6	270,7
12	19/05/07 – 20:00	26/05/07 – 23:00	48,5	8,0	97,9	247,8
13	12/07/07 – 01:00	17/07/07 – 03:00	19,1	5,4	17,8	77,4
14	01/08/07 – 21:00	19/08/07 – 19:00	21,5	5,0	15,3	77,4
15	29/08/07 – 11:00	02/09/07 – 12:00	25,8	3,0	54,6	387,0
16	02/09/07 – 00:00	05/09/07 – 03:00	12,2	7,5	11,1	167,9
17	20/09/07 – 09:00	25/09/07 – 23:00	82,0	12,0	66,5	1379,6
18	26/09/07 – 00:00	30/09/07 – 23:00	40,0	7,2	137,2	411,8
19	10/10/07 – 14:00	14/10/07 – 19:00	31,8	7,0	9,27	165,3
20	14/10/07 – 20:00	21/10/07 – 13:00	64,2	11,2	236,6	731,6
21	10/11/07 – 02:00	16/11/07 – 10:00	26,6	5,4	6,2	883,7
22	25/12/06 – 00:00	28/12/06 – 02:00	15,0	11,7	8,0	682,1
23	20/02/07 – 00:00	23/02/07 – 18:00	39,5	5,4	158,0	379,3
24	23/02/07 – 00:00	26/02/07 – 19:00	19,0	8,6	48,7	1495,3
25	11/05/07 – 22:00	15/05/07 – 12:00	42,8	11,6	100,9	550,5
Mínima			12,0	3,0	6,2	77,4
Máxima			82,0	27,4	367,5	13204,6
Média			35,0	10,8	72,8	1236,3
CV (%)			51,4	62,2	120,6	208,6

TABELA 1: Vazão, precipitação e C_{ss} monitorada em 25 eventos estudados

Fonte: Trabalho de campo. Org.: O autor

rápida. Tais resultados corroboram com os apontamentos de Gregory e Walling (1973), Williams (1989), Van Dijk e Kwaad (1996), Reid *et al.* (1997), Steegen *et al.* (2000) ao afirmarem que o regime pluviométrico e o relevo influenciam na vazão e na carga em suspensão e, principalmente, com o tipo de uso da terra e a dinâmica de armazenamento/mobilização de sedimentos na bacia hidrográfica.

As relações entre a Q e a C_{ss} demonstram a complexidade e a dinâmica dos processos na bacia hidrográfica do Caeté, representadas, de modo geral, pela presença de mais de um pico de sedimento em suspensão a cada pico de vazão.

Na maioria dos 25 eventos avaliados, verificou-se a ocorrência de pico da C_{ss} logo no início da

ascensão da vazão. Posteriormente, tem-se um decréscimo na C_{ss} , enquanto a vazão continua aumentando. Em seguida, verifica-se mais um pico da C_{ss} e o pico da vazão, que ocorreram praticamente ao mesmo tempo, com leve tendência do pico da vazão anteceder o da C_{ss} . Cumpre observar que, em alguns eventos, ocorreu apenas um pico da C_{ss} , e em outros, três ou mais picos da C_{ss} . Na recessão do hidrograma, com a redução no volume escoado, tem-se a redução da quantidade de sedimento em suspensão, ocorrendo na maioria dos eventos oscilações da C_{ss} , representadas por picos de menores proporções.

Dentre os cinco modelos de relação entre Q e C_{ss} propostos por Williams (1989) para a compreensão do regime hidrossedimentológico, na maioria dos

eventos, o modelo que representou a dinâmica dos processos foi a do tipo figura oito (*figure eight*), porque, com o início da pluviosidade, tem-se um aumento considerável da C_{SS} sem grandes alterações na vazão, seguido por um decréscimo da C_{SS} e aumento da vazão, quando se verifica um novo acréscimo da C_{SS} , enquanto a vazão continua aumentando até chegar a seu pico. Posteriormente, observa-se a redução de ambas, podendo a C_{SS} apresentar novos picos, porém com menores intensidades. A relação Q e C_{SS} apresenta inicialmente uma curva no sentido horário (*clockwise*) e, posteriormente, uma outra curva no sentido anti-horário (*counterclockwise*) (FIG. 4).

No primeiro momento, a ocorrência do aumento da C_{SS} antes da vazão, associado posteriormente a uma diminuição da C_{SS} e à ascensão da vazão, condiciona uma histerese do tipo curva no sentido horário (*clockwise*), indicando a contribuição de sedimentos provenientes de áreas fontes próximo do curso de água que condicionam uma resposta rápida na taxa de sedimento em suspensão (SEEGER *et al.*, 2004). O decaimento da taxa de sedimento em suspensão antes da recessão do hidrograma, conforme Williams (1989), ocorre pela reduzida quantidade de sedimento disponível nestas áreas. Outra razão para a ocorrência de picos de C_{SS} antes do de vazão pode estar relacionado, segundo Sammori *et al.* (2004), à intensidade da chuva.

No segundo momento, a taxa de sedimentos em suspensão passa a ascender novamente, ocorrendo um segundo pico da C_{SS} , porém depois do pico de vazão, condiciona uma histerese do tipo curva no sentido anti-horário (*counterclockwise*). Seeger *et al.* (2004) destacam que tal comportamento deve-se à contribuição de sedimentos oriundos de áreas fontes mais distantes dos cursos de água, distribuídas na bacia. Estas áreas geralmente apresentam maior disponibilidade de sedimentos e ocorrem quando o solo apresenta alta umidade, em condição próxima da saturação.

A ocorrência do primeiro pico da C_{SS} bem antes do pico da vazão, com elevadas taxas de sedimento em suspensão, é condicionada também pela carga de sedimento de lavagem (*wash load* ou *deplúvio*) carregado da bacia hidrográfica.

Contudo, destaca-se que nos eventos 5, 7, 10, 13 e 21 o primeiro pico apresentou taxa de C_{SS} superi-

or ao segundo pico (ou demais picos ocorridos no evento), demonstrando maior disponibilidade de sedimento proveniente das áreas próximas aos cursos fluviais (FIG. 4). Apesar de a histerese tipo figura oito (*figure eight*) predominar, os eventos 3, 7, 8, 9, 10, 12, 15, 18, 20 e 25 apresentaram histerese do tipo curva no sentido horário (*clockwise*) e o evento 16 anti-horário (*counterclockwise*).

No Sul do Brasil, Lopes *et al.* (2007) identificaram diferentes tipos de curvas de histerese em quadro microbacias experimentais, na região norte do estado de Santa Catarina, duas delas com vegetação nativa e duas com reflorestamento de pinus. Nos cinco eventos analisados nas microbacias com vegetação nativa foram identificados três tipos de histerese, sendo duas *clockwise* (sentido horário), duas *single-valued curve* (única linha curva) e uma *counterclockwise* (anti-horário). Enquanto nas microbacias com pinus foram constados em oito eventos sete histerese do tipo *clockwise* (sentido horário) e uma do tipo *figure eight* (figura oito). Segundo os autores a histerese do tipo *counterclockwise*, na microbacia com vegetação nativa aconteceu em condição de umidade no solo, a histerese *single-valued curve* em condições de alta Q e C_{SS} numa precipitação de média intensidade e a histerese *figure eight* em condições de baixa Q e C_{SS} durante chuva de pouca intensidade.

Nesse contexto, verifica-se que o tipo de histerese é condicionado principalmente pelas características da pluviosidade, umidade do solo, fontes de sedimentos e pelo tipo de uso e manejo da terra, não havendo um tipo de histerese exclusiva que caracterize a dinâmica dos processos hidrossedimentológicos no Sul do Brasil.

Na TAB. 2 aparecem os índices de relação entre a Q e a C_{SS} obtidos, além do índice da relação na ascensão e na recessão do hidrograma. A ascensão compreendeu os dados do início do evento até o primeiro pico de vazão e a recessão do último pico no hidrograma até a vazão mínima observada.

Os índices de correlação entre Q/C_{SS} total na maioria dos 25 eventos são aceitáveis, ou seja, em 56% dos mesmos o R é superior a 0,7. O melhor índice de correlação ocorreu no evento 12, com R de 0,9521, dada pela equação $C_{SS} = 2,4535 Q - 14,333$.

As correlações realizadas para o período de

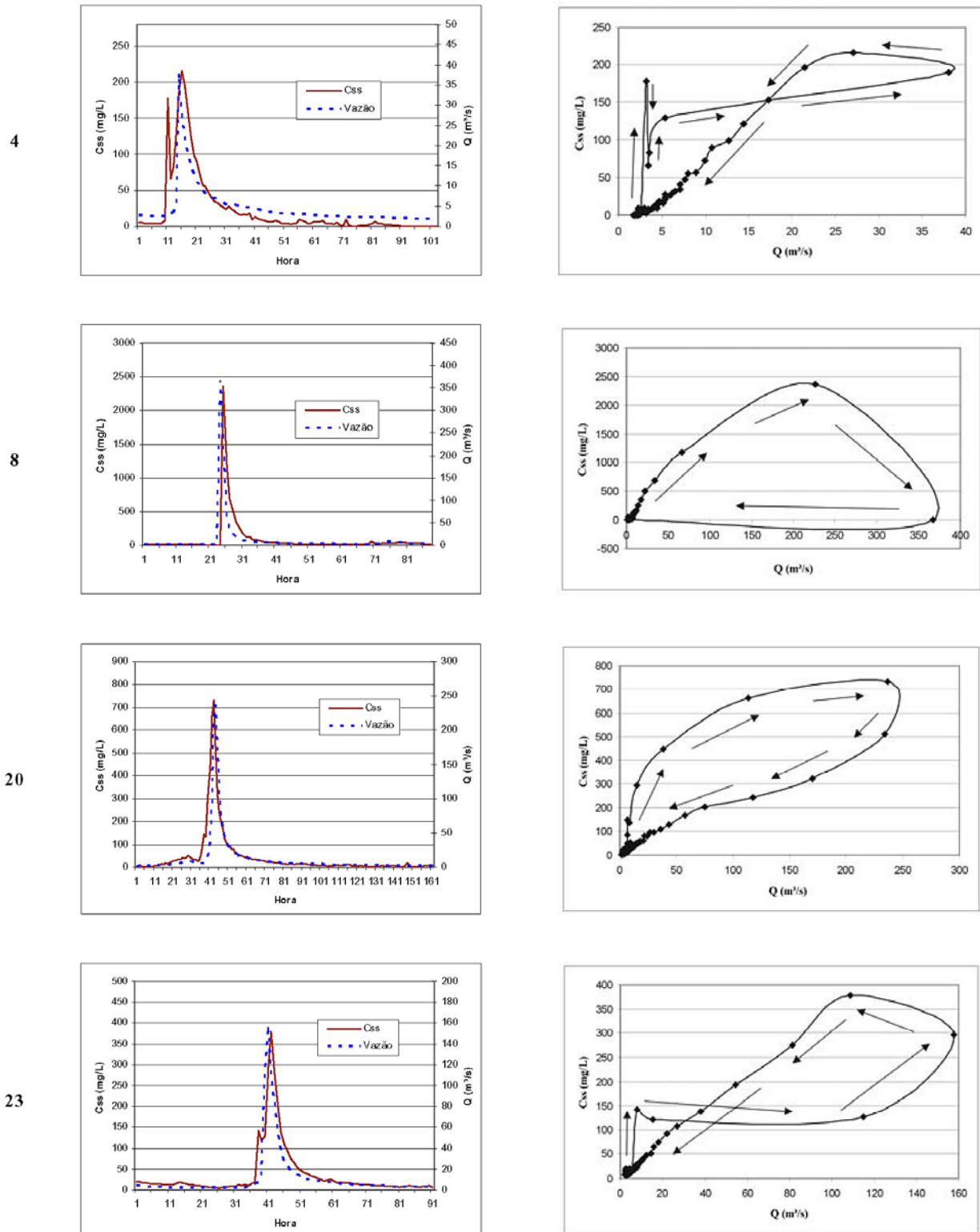


FIGURA 4: Evento, hidrossedimentograma (hidrograma e sedimentograma) e curva de histerese (relação entre Q e C_{ss}) em intervalo de tempo horário.

Obs: Os eventos 4 e 23 exemplificam hidrossedimentogramas e tipo de histerese figura oito (*figure eight*), e os eventos 8 e 20 histerese com curva no sentido horário (*clockwise*). Fonte: Trabalho de campo. Org.: O autor

Evento	Q/C _{SS} – Total		Q/C _{SS} – Ascensão		Q/C _{SS} – Recessão	
	Equação	R	Equação	R	Equação	R
1	y = 137,07x - 307,99	0,5136	y = 235,79x - 66,075	0,6106	y = 69,703x - 202,92	0,8328
2	y = 17,161x - 12,949	0,4188	y = 43,971x - 15,427	0,6368	y = 6,0616x - 7,6114	0,9760
3	y = 8,3325x + 14,397	0,7009	y = 8,103x + 83,141	0,6454	y = 8,7133x - 10,288	0,9507
4	y = 7,3931x - 10,494	0,8434	y = 4,6875x + 20,767	0,6324	y = 7,4844x - 14,657	0,9554
5	y = 14,918x - 18,939	0,4122	y = 8,4158x + 23,679	0,1382	y = 17,375x - 31,817	0,7339
6	y = 14,797x + 4,0902	0,4938	y = 1,1336x + 245,15	0,0361	y = 11,109x - 19,292	0,9787
7	y = 16,192x - 11,481	0,5485	y = 20,401x - 2,0966	0,5141	y = 12,486x - 11,11	0,9473
8	y = 3,2099x + 45,362	0,5031	y = -0,0095x + 9,6752	0,2524	y = 11,255x + 8,5952	0,9683
9	y = 21,658x - 23,786	0,7164	y = -0,0145x + 9,269	0,0100	y = 31,694x - 51,166	0,8439
10	y = 18,087x - 41,266	0,5139	y = 46,49x - 98,687	0,7169	y = 12,666x - 34,799	0,9386
11	y = 2,4477x + 1,423	0,7942	y = 5,2934x - 4,7289	0,8483	y = 2,4884x - 16,361	0,9863
12	y = 2,4535x - 14,333	0,9521	y = 2,7291x - 8,4679	0,9678	y = 1,7322x - 9,6767	0,9771
13	y = 4,3491x - 13,596	0,7361	y = 3,9203x - 2,9765	0,6307	y = 4,5076x - 19,738	0,9767
14	y = 6,2161x - 17,606	0,8060	y = 6,7193x - 9,083	0,6401	y = 5,4704x - 16,007	0,9279
15	y = 4,9182x + 3,5949	0,6877	y = 7,1948x + 14,524	0,7031	y = 3,5036x - 4,7969	0,9625
16	y = 14,966x - 55,738	0,7083	y = 1,8974x + 5,7814	0,4369	y = 23,67x - 94,49	0,9122
17	y = 6,9508x + 0,8254	0,3842	y = 5,343x + 61,928	0,5191	y = 4,4714x - 21,722	0,9744
18	y = 3,1123x - 2,5791	0,9192	y = 3,0081x + 2,0646	0,8915	y = 3,3471x - 6,5273	0,9888
19	y = 14,325x - 18,862	0,8272	y = 7,793x - 7,5599	0,7000	y = 15,186x - 29,739	0,9556
20	y = 2,759x + 7,0057	0,8718	y = 3,6574x + 24,708	0,8836	y = 2,1652x + 3,3301	0,9852
21	y = 37,098x - 62,568	0,4060	y = 81,584x - 149,88	0,3787	y = 37,622x - 69,538	0,9038
22	y = 77,987x - 59,118	0,7923	y = 62,413x - 61,468	0,7964	y = 86,117x - 58,002	0,8244
23	y = 2,2751x + 9,7634	0,8837	y = 1,5703x + 12,284	0,8695	y = 3,5473x - 2,0442	0,9978
24	y = 11,605x + 26,843	0,3294	y = 9,9098x - 16,249	0,2516	y = 26,033x - 93,09	0,7913
25	y = 4,2872x + 11,589	0,7245	y = 5,1199x + 25,746	0,6701	y = 4,4349x - 18,541	0,9942
Mínima		0,3294		0,0100		0,7339
Máxima		0,9521		0,9678		0,9978
Média		0,6595		0,5752		0,9314

TABELA 2: Índice de correlação entre a Q e a C_{SS}, na ascensão e recessão do hidrograma

Obs: y é a C_{SS} (mg/L) e x a vazão (m³/s).

Fonte: Trabalho de campo. Org.: O autor

recessão e ascensão apresentam resultados divergentes, enquanto na ascensão os índices de correlação foram pequenos entre Q/C_{SS}, com R superiores a 0,70 em apenas 8 dos 25 eventos (32%). Na recessão constatou-se R superior a 0,70 em 100% dos eventos. Uma das prováveis causas da baixa relação no período de ascensão entre Q/C_{SS} podem ser oscilações na C_{SS}, com pico antes da vazão, associado ou não à contribuição da carga de sedimento de lavagem das vertentes da bacia hidrográfica. A equação obtida com melhor índice de correlação na ascensão da vazão foi a do evento 12, dada por C_{SS} = 2,7291 Q - 8,4679, e na recessão do evento 23, dada por C_{SS} = 3,5473 Q - 2,0442.

A elevada C_{SS} no início da cheia, apresentando um pico, que possivelmente corresponde à carga de lavagem, seguido por uma redução da C_{SS}, comparati-

vamente com o acréscimo da vazão, dificultam a construção da curva-chave de sedimentos, uma vez que a C_{SS} inicial depende das condições de chuva antecedente, intensidade da chuva e carga disponível para transporte, fatores estes que apresentam grande variação nos diversos eventos.

Considerando os resultados obtidos da relação entre vazão e C_{SS}, constata-se que sua utilização pode conduzir a erros significativos na determinação da C_{SS} a partir da vazão em determinados eventos, uma vez que não considera o padrão de variabilidade presente na quantidade de sedimento em suspensão. Por conseguinte, deve-se evitar sua utilização e privilegiar sempre o monitoramento automático da C_{SS} em escala temporal inferior a 60 minutos.

4. CONCLUSÕES

A relação entre Q e C_{SS} , no geral, apresentou comportamento do tipo figura oito, com pico da C_{SS} anterior ao da vazão, com mais de um pico por evento, representada por uma curva no sentido horário, seguida por outra curva no sentido anti-horário.

A C_{SS} máxima não apresentou bons índices de correlação com a pluviosidade total e com a descarga líquida máxima, mas sim com a pluviosidade máxima (intensidade).

Os índices de correlação entre todos os valores de vazão e C_{SS} apresentaram R superior a 0,7 em 56% dos eventos. Contudo, verificou-se que, na ascensão do hidrograma, os índices de correlação são baixos, enquanto na recessão altos.

O monitoramento automático e as medições pontuais da descarga líquida e sólida exigem, além de tempo, recursos financeiros, equipamentos adequados, a adoção de procedimentos técnicos na coleta, armazenamento, transporte e nas análises laboratoriais.

A modelagem hidrossedimentológica não exclui o monitoramento automático dos processos e medições *in loco* periódicas.

AGRADECIMENTOS

Ao Fundo Setorial de Recursos Hídricos do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CT-HIDRO/CNPq) pela bolsa de doutorado e financiamento da pesquisa. Ao Prof. Dr. Masato Kobiyama pelo apoio.

REFERÊNCIAS

- ALVES, A. *Análise de dados hidrológicos da região do município de Alfredo Wagner/SC*. 2004. 95f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.
- CARVALHO, N. O. *Hidrossedimentologia prática*. Rio de Janeiro: CPRM, 1994.
- CHECCHIA, T. et al. Interação entre climatologia, geologia e geomorfologia na bacia hidrográfica do Caeté, município de Alfredo Wagner, SC. In: XV SEMANA DE GEOGRAFIA, 4., 2006, Guarapuava. *Anais...* Guarapuava: Universidade Estadual do Centro-Oeste, 2006. p. 121-133.
- CHIKITA, K. A. Suspended sediment discharge from snowmelt: Ikushunbetsu River, Hokkaido, Japan. *Journal of Hydrology*. v. 186, p. 295 – 313, 1996.
- EPAGRI – Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina. *Dados fluviométricos da seção fluvial da Ponte do Caeté*. Florianópolis, 2007.
- GREGORY, K. J.; WALLING, D. E. *Drainage Basin Form and Process: a geomorphological approach*. London: Edward Arnold, 1973.
- HERRMANN, M. L P.; ROSA, R. O. *Mapeamento temático do município de Florianópolis – Geomorfologia*. Florianópolis: IPUF/IBGE, 1991.
- JANSSON, M. B. Determining sediment source areas in a tropical river basin, Costa Rica. *Catena*. v. 47, p. 63 – 84, 2002.
- LENZI, M. A.; MARCHI, L. Suspended sediment load during floods in a small stream of the Dolomites (northeastern Italy). *Catena*. v. 39, p. 267 – 282, 2000.
- LOPES, N. H. Y.; KOBİYAMA, M.; SANTOS, I. Relação entre concentração de sedimentos em suspensão e vazão em microbacias experimentais na região norte do estado de Santa Catarina, Brasil. In SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 17, 2007, São Paulo. *Anais...* São Paulo: ABRH, 2007. CD-ROM
- MONTEIRO, C. A. F. O clima. In: *Geografia Regional do Brasil: Grande Região Sul*. Volume IV. Tomo I. Cap. III. Biblioteca Geográfica Brasileira, IBGE, CBG, Rio de Janeiro, 1963. p. 117 – 169.
- REID, I. et al. Sediment Erosion, Transport and Deposition. In: THORNE, C. R.; HEY, R. D.; NEWSON, M. D. *Applied Fluvial Geomorphology for River*

Engineering and Management. New York: John Wiley & Sons, 1997. p. 95 – 135.

SACHET, Z. P. Levantamento edafoclimatológico da microbacia do Rio Caeté. *Documento Técnico*. n. 20. Florianópolis: FAPEU. 1994.

SAMMORI, T. et al. Suspended solids discharge from a small forested basin in the humid tropics. *Hydrological Processes*. 18, p. 721 –738, 2004.

SANTA CATARINA. Gabinete de Planejamento e Coordenação Geral. *Atlas do Estado de Santa Catarina*. Rio de Janeiro. 1986.

SANTOS, I. et al. *Hidrometria Aplicada*. Curitiba: Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, 2001.

SEEGER, M. et al. Catchment soil moisture and rainfall characteristic as determinant factor for discharge/suspended sediment hysteretic loops in a small headwater catchment in the Spanish pyrenees. *Journal of Hydrology*, 288, p. 299 – 311, 2004.

SHIMIZU et al. Síntese temática: solos. *Projeto Gerenciamento Costeiro: 2º fase*. Florianópolis: IBGE. 1995. Mapas

SILVA, R. V.; KOBAYAMA, M. Mapeamento de erosão potencial de encostas por meio de delineamento automático do escoamento superficial. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE DESASTRES NATURAIS, 1., 2004, Florianópolis. *Anais...* Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina. 2004. p. 129 – 143. CD-ROM

STEEGEN, A. et al. Sediment export by water from an agricultural catchment in the Loam Belt of central Belgium. *Geomorphology*. v. 33, p. 25 – 36, 2000.

VAN DIJK, P. M.; KWAAD, F. J. P. M. Runoff generation and soil erosion in small agricultural catchments with loess-derived soils. *Hydrological Processes*. 10, p. 1049 – 1059, 1996.

VESTENA, L. R.; CHECCHIA, T.; KOBAYAMA, M.

Análise morfométrica da bacia hidrográfica do Caeté, Alfredo Wagner/SC. In: VI SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA REGIONAL CONFERENCE ON GEOMORPHOLOGY, 6., 2006, Goiânia. *Anais/Actes...* Volume II. Goiânia: União da Geomorfologia Brasileira / International Association of Geomorphologists, 2006. CD-ROM

VIECILI, F. L. *Mapeamento temático do uso e cobertura do solo na bacia do Caeté, município de Alfredo Wagner, SC*. 2005. 197f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

WILLIAMS, G. P. Sediment concentration versus water discharge during single hydrologic events in rivers. *Journal of Hydrology*. Amsterdam, v. 111, p. 89 – 106, 1989.

WARD, A. D.; ELLIOT, W. J. *Environmental Hydrology*. Lewis Publ., 1995. 328 p.

WARD, A. D.; TRIMBLE, S. W. *Environmental hydrology*. 2 ed. New York: Lewis Publishers, 1995. 475p.

XU, J. Implication of relationships among suspended sediment size, water discharge and suspended sediment concentration: the Yellow River basin, China. *Catena*. v. 49, p. 289 – 307, 2002.