

# MONITORAMENTO AUTOMÁTICO DO TRANSPORTE DE SEDIMENTO EM SUSPENSÃO POR MEIO DE TURBIDÍMETRO DE ALTA PERFORMANCE.

*Ronald Eugenio Manz<sup>1</sup>, Irani dos Santos<sup>2</sup> & Eduardo Vedor de Paula<sup>3</sup>*

**RESUMO** - Este trabalho tem por objetivo apresentar e discutir os resultados obtidos no monitoramento do transporte de sedimentos em suspensão por meio do registro automático de turbidez, na bacia hidrográfica do Rio Sagrado. Sendo o transporte de fundo foi desconsiderado. A bacia localiza-se na Serra do Mar na porção oriental do estado do Paraná, entre as latitudes 25°31'05"S e 25°37'28"S; e entre as longitudes 48°44'59"W e 48°52'16"W, com uma área de drenagem de 85 km<sup>2</sup>. A turbidez é dada pela capacidade de obstrução de um feixe de luz sob um meio em decorrência da presença de partículas, este valor pode ser obtido por um sensor óptico que após emitir um raio de luz calcula o ângulo e a intensidade de seu retorno. A relação entre a turbidez e a concentração de sedimentos em suspensão foi calibrada para as características locais com 13 amostras coletadas em diferentes condições de vazão, obtendo-se um coeficiente de determinação de 0,98. Comparativamente ao método tradicional da curva-chave, a série de vazão sólida obtida pelo monitoramento automático apresentou uma média 27,4% inferior, com diferenças significativas principalmente nos picos e recessões dos sedimentogramas.

**ABSTRACT** – The present paper has as objective a discussion and presentation of the results obtained from the monitoring of suspended sediment transportation through the automatic registry of turbidity, in Sagrado's river watershed. For this work the bed load has not been considered. The watershed's location is on Serra do Mar on the oriental portion of Paraná state, between the latitudes 25°31'05"S and 25°37'28"S; and between the longitudes 48°44'59"W and 48°52'16"W, with a drainage area of 85 km<sup>2</sup>. Turbidity is given by the capability that a medium has to obstruct a light beam due to particle's presence; this value can be measure through an optic sensor that after applying a light beam to the medium is able to calculate its angle as well as its intensity of return. The turbidity and suspended sediment concentration relation were calibrated for the local characteristics by 13 samples collected on different discharge conditions, where a 0.98 coefficient of determination was obtained. Comparing to the traditional discharge-key method, the solid discharge value acquired through automatic monitoring method has shown a mean 27.4% less, with significant differences especially during sediment rises and falls.

**Palavras-chave:** Turbidez, concentração de sedimentos em suspensão e monitoramento automático.

---

1) Bolsista PIBITI/CNPq; Laboratório de Hidrogeomorfologia (LHG), Departamento de Geografia, UFPR; Rua Schiller, 555, ap. 123, Curitiba, PR; E-mail: [ronm@ufpr.br](mailto:ronm@ufpr.br)

2) Professor doutor; Laboratório de Hidrogeomorfologia (LHG), Departamento de Geografia, UFPR. E-mail: [irani@ufpr.br](mailto:irani@ufpr.br)

3) Professor doutor; Departamento de Geografia, UFPR. E-mail: [eduardovedordepaula@yahoo.com.br](mailto:eduardovedordepaula@yahoo.com.br)

## 1 – INTRODUÇÃO

Os estudos referentes ao transporte de sedimentos em suspensão abordam os processos hidrosedimentológicos que compreendem a desagregação, transporte, sedimentação e a consolidação de sedimentos, constituindo uma importante ferramenta para mitigar a perda de solos, quantificando impactos causados pelo mau uso da terra e para estimar a o assoreamento em reservatórios e lagos (Vestena et al, 2007; Fill & Santos, 2001).

No entanto, para obter a quantidade de sedimentos transportados é necessário dispor de uma longa e contínua série temporal de descarga sólida. Esta série, tradicionalmente é obtida pelo método da curva-chave de sedimentos, que relaciona a vazão líquida com a vazão sólida, medida eventualmente na estação quando da visita da equipe de hidrometria (Carvalho, 1994). O método da curva-chave, além de ter se mostrado pouco preciso, com um gradiente de dispersão acentuado devido aos inúmeros fatores que contribuem para o aumento da concentração de sedimentos em suspensão ( $C_{ss}$ ), apresenta restrições decorrentes do elevado custo das medições que são executadas por um pessoal qualificado e treinado (hidrometristas) que não fica permanentemente no local da estação (Fill & Santos, 2001).

Devido a estas restrições a utilização da turbidez da água, como forma de estimativa da concentração de sedimentos em suspensão, tem apresentado resultados satisfatórios, não apenas por prover dados hidrosedimentológicos ininterruptos como também por apresentar um investimento relativamente atrativo a longo prazo (Lewis, 1996; Lewis & Eads, 1998; Moris & Fan, 1997) .

A turbidez é dada pela capacidade de obstrução de um feixe de luz sob um meio em decorrência da presença de partículas em suspensão, este valor pode ser obtido por um sensor óptico que após emitir um raio de luz calcula o ângulo e a intensidade de seu retorno, sendo que quanto maior a quantidade de luz dispersada maior a turbidez do meio.

Dessa forma, ao considerarmos um feixe de luz incidente com intensidade  $I_{inc}$  e um comprimento de onda  $\lambda$  atingindo uma partícula esférica de diâmetro  $d$ , pode-se obter a luz retrodifundida  $I_{sc}$  através da função do ângulo refratado  $\theta$ , do diâmetro da partícula  $d$ , do comprimento de onda  $\lambda$  e pelas propriedades óticas de refração, tanto do meio quanto da partícula, do índice refrativo  $n$ . Esta relação pode ser equacionada da seguinte forma:

$$I_{sc} = I_{inc} (\theta, \lambda, d, n) \quad (1)$$

Cabe ressaltar que as respostas espectrais obtidas por um sensor de turbidez na água não apresenta uma relação universal com a  $C_{ss}$ , sendo necessário calibrar esta relação para a realidade

local, através da coleta de amostras do meio no mesmo instante em que o sensor obteve a leitura da turbidez, para que se possa aplicar a função  $C_{ss}$  e Turbidez (Mylvaganam & Jakobsen, 2001).

Este trabalho tem como intuito apresentar os resultados obtidos na empregabilidade do monitoramento automático da concentração de sólidos suspensos na bacia do Rio Sagrado através da turbidez da água, durante os meses de maio a junho de 2010, desconsiderando o transporte de fundo.

## **2 - MATERIAIS E MÉTODOS**

### **2.1 – Área de Estudo**

A bacia do Rio Sagrado possuiu uma área de drenagem de aproximadamente 85 km<sup>2</sup> e está localizada na Serra do Mar, entre as latitudes 25°31'05"S e 25°37'28"S; e entre as longitudes 48°44'59"W e 48°52'16"W, na porção Oriental do estado do Paraná. A Serra do Mar é formada por montanhas constituídas por rochas pré-cambrianas aonde os níveis pluviométricos são elevados Bigarella, (2003). A cobertura vegetal ali encontrada é predominantemente caracterizada pela Floresta Ombrófila Densa com suas subdivisões compreendidas em terras baixas, sub-montana, montana e alta-montana.

Por pertencer a uma região montanhosa, com altos índices pluviométricos, crescente ocupação com atividades antrópicas e se mostrar propícia a deslizamentos de encostas [Lopes et al. (2010)], esta bacia hidrográfica é a de maior contribuição específica para aporte de sedimentos na Baía de Antonina, apontando para a importância dos estudos mais aprofundados dos processos hidrosedimentológicos para a região.

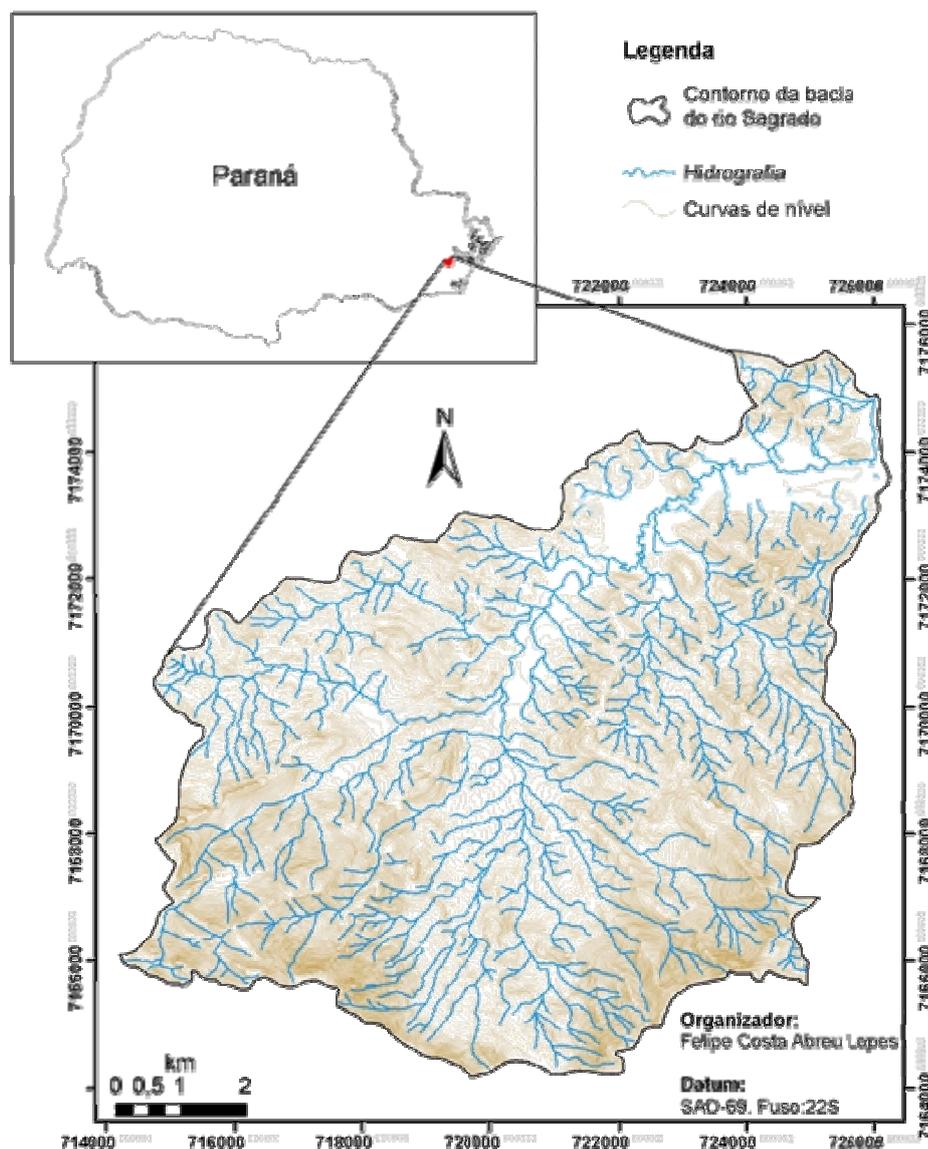


Figura 1: Cartograma de localização da bacia do Rio Sagrado.

## 2.2 – Monitoramento

A estação hidrosedimentológica da bacia do Rio Sagrado faz parte da rede de bacias escola operadas pelo laboratório de Hidrogeomorfologia (LHG-UFPR) permitindo o monitoramento automático das características do Rio Sagrado, sendo constituída por 3 componentes principais: 1 sensor ótico de turbidez DTS-12 (FTS), 1 sensor de nível do tipo transdutor de pressão Druck PTX 1280 (General Eletric) e um Data logger H-500XL (WaterLOG), programado para fazer leitura com frequência de 10 minutos. Destaca-se que o sensor de turbidez possui um sistema mecânico de limpeza da superfície de emissão e aquisição do sinal, o qual é acionado instantes antes de todas as leituras. Para calibrar os dados de turbidez com a  $C_{ss}$ , foram realizadas coletas de amostras nas

proximidades do sensor em diferentes momentos hidrométricos. Até o momento foram coletadas 13 amostras com uma  $C_{ss}$  variando de 45,6 a 206,5 mg/L.



Figura 2: Detalhe dos equipamentos instalados na estação hidrosedimentológica.

### 3 - RESULTADOS

Com base nos resultados das 13 amostras realizadas obteve-se a relação entre turbidez da água, obtida pelo sensor ótico, com a concentração de sedimentos em suspensão, como mostra a figura 3, sendo dada por:

$$C_{ss}=1,2481 \cdot T-3,6393 \quad (2)$$

onde  $C_{ss}$  = concentração de sedimentos em suspensão (mg/L) e  $T$  = turbidez (NTU)

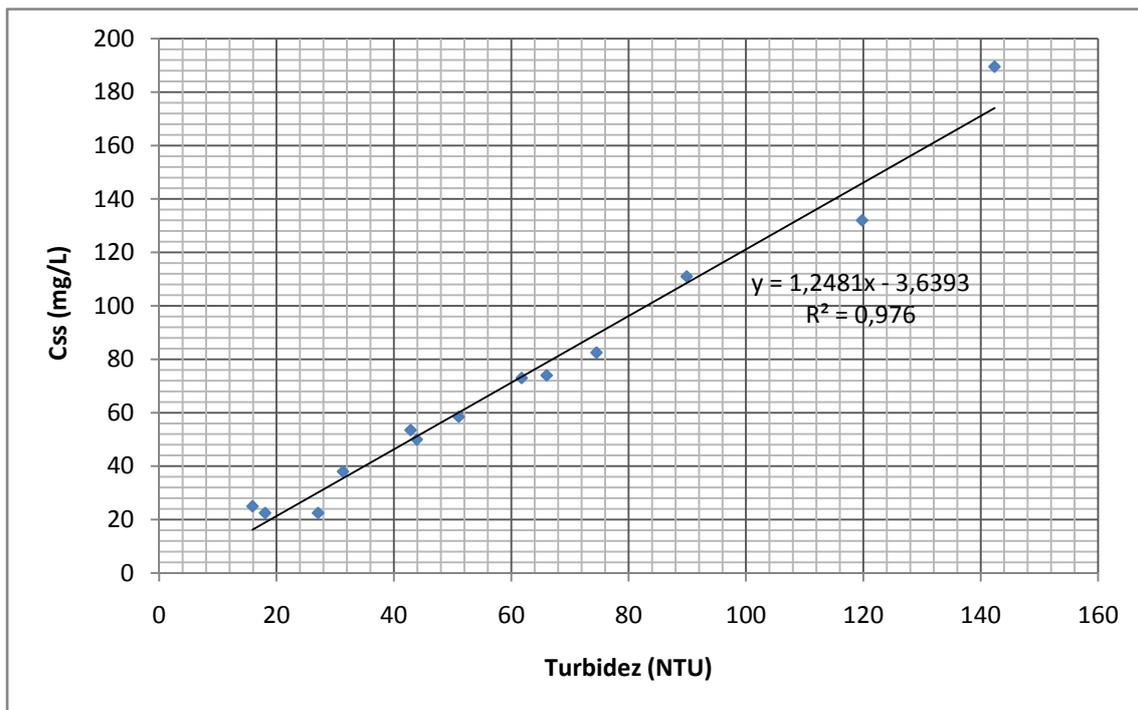


Figura 3: Relação entre a turbidez e concentração de sólidos suspensos.

Assim, uma série de vazões sólidas foi calculada a partir dos dados da  $C_{ss}$  obtidos através de leituras automáticas de turbidez, pela equação:

$$Q_{ss\_turb} = 0,0864 \cdot Q_l \cdot C_{ss} \quad (3)$$

onde  $Q_{ss\_turb}$  é a descarga sólida em suspensão a partir da turbidez;  $Q_l$  é a vazão líquida ( $m^3/s$ ) e  $C_{ss}$  é a concentração de sedimentos em suspensão (ppm ou mg/L).

Para efeito de comparação, foi calculada para o mesmo período, uma série de vazões sólidas pela tradicional curva chave de sedimentos. Para tanto foram utilizadas todas as coletas efetuadas na estação desde 2006 pelo LACTEC, SUDERHSA e LHG-UFPR, totalizando 60 resultados de  $C_{ss}$ . Estes dados constam na figura 4 e resultaram na seguinte equação:

$$Q_{ss\_chave} = 0,9438 \cdot Q_l^{2,096} \quad (4)$$

onde:  $Q_{ss\_chave}$  é a descarga sólida em suspensão a partir da curva chave e  $Q_l$  é a vazão líquida.

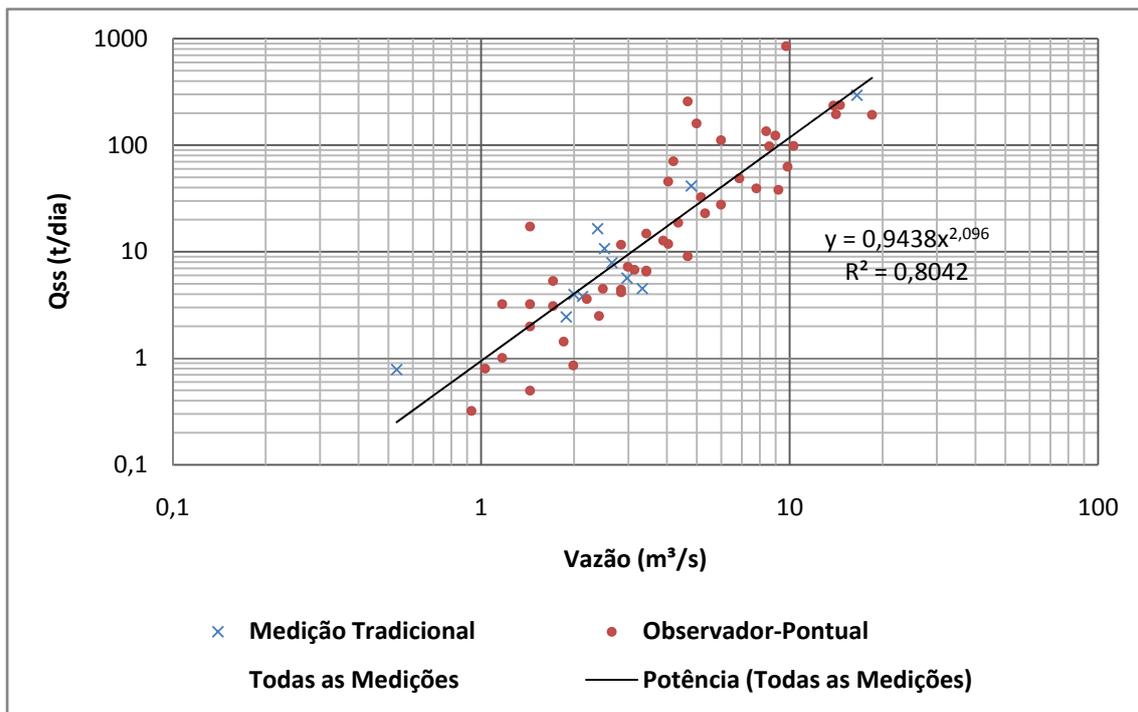


Figura 4. – Curva-chave de descarga de sedimentos em suspensão da estação hidrosedimentológica do Rio Sagrado.

Os dados apresentados na Figura 4 foram divididos em dois grupos com base na forma de coleta, onde um grupo foi coletado aplicando-se o método tradicional por igual incremento de largura e outro no qual foi feita apenas uma coleta pontual pelo observador da estação. Nota-se que os resultados não apresentam diferenças significativas, mostrando que a amostragem pontual permite uma boa representatividade da  $C_{ss}$  na seção considerada. Comparando o coeficiente de determinação entre as figuras 3 e 4, nota-se um  $R^2=0,80$  para a relação entre a vazão e o  $Q_{ss}$ , que seria o método tradicional da curva-chave, e um  $R^2=0,97$  para a relação turbidez com a  $C_{ss}$ , o qual corresponde ao método alternativo avaliado neste trabalho.

A figura 5 mostra comparativamente as vazões sólidas de sedimentos em suspensão obtidas pelos dois métodos. Nota-se que de forma geral o método da curva chave tende a subestimar as descargas de sedimentos em suspensão nos períodos em que a vazão é mais alta, enquanto que durante os períodos de vazão baixa costumam apresentar valores levemente superestimados. As médias calculadas para todo o período estudado evidenciam a diferença entre os métodos, onde a  $Q_{ss\_chave}$  registrou uma média de 19,20 t/dia, enquanto o método da turbidez da água apresentou uma média 27,4% inferior, com 13,94 t/dia.

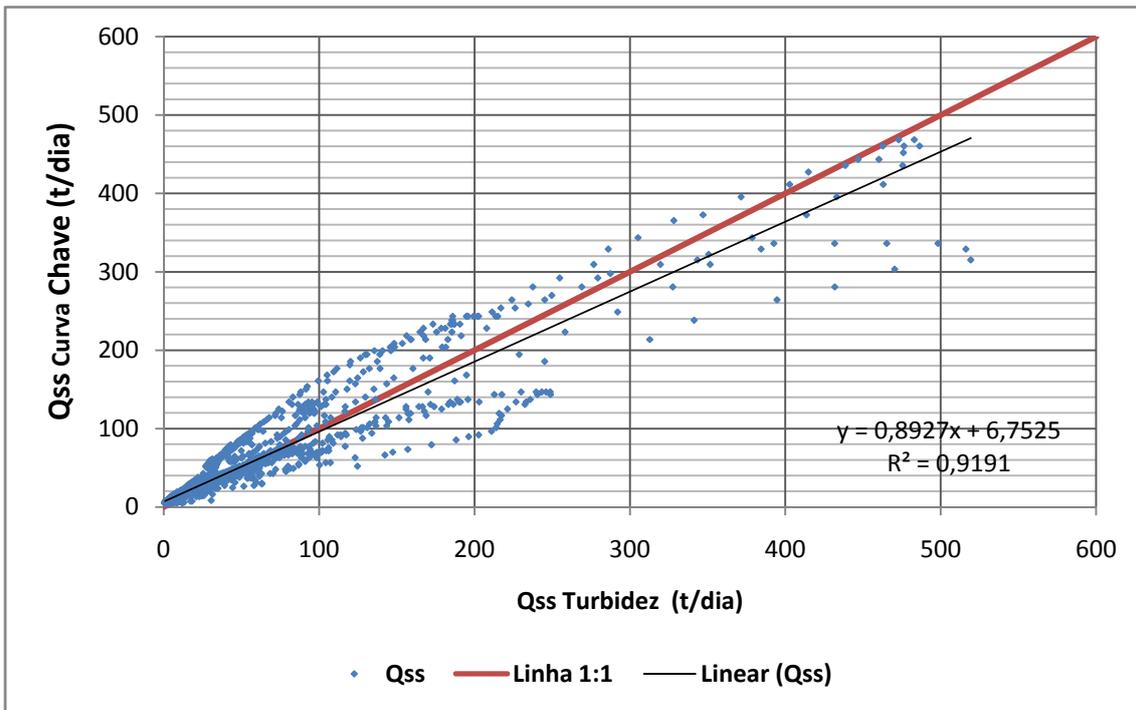


Figura 5: Relação entre descarga de sólidos suspensos obtidos através do método da turbidez e o tradicional método da curva chave.

A título da ilustração a figura 6 mostra os resultados de um período cuja vazão apresenta maior heterogeneidade, evidenciando as diferenças entre as séries  $Q_{ss\_turb}$  e  $Q_{ss\_chave}$ .

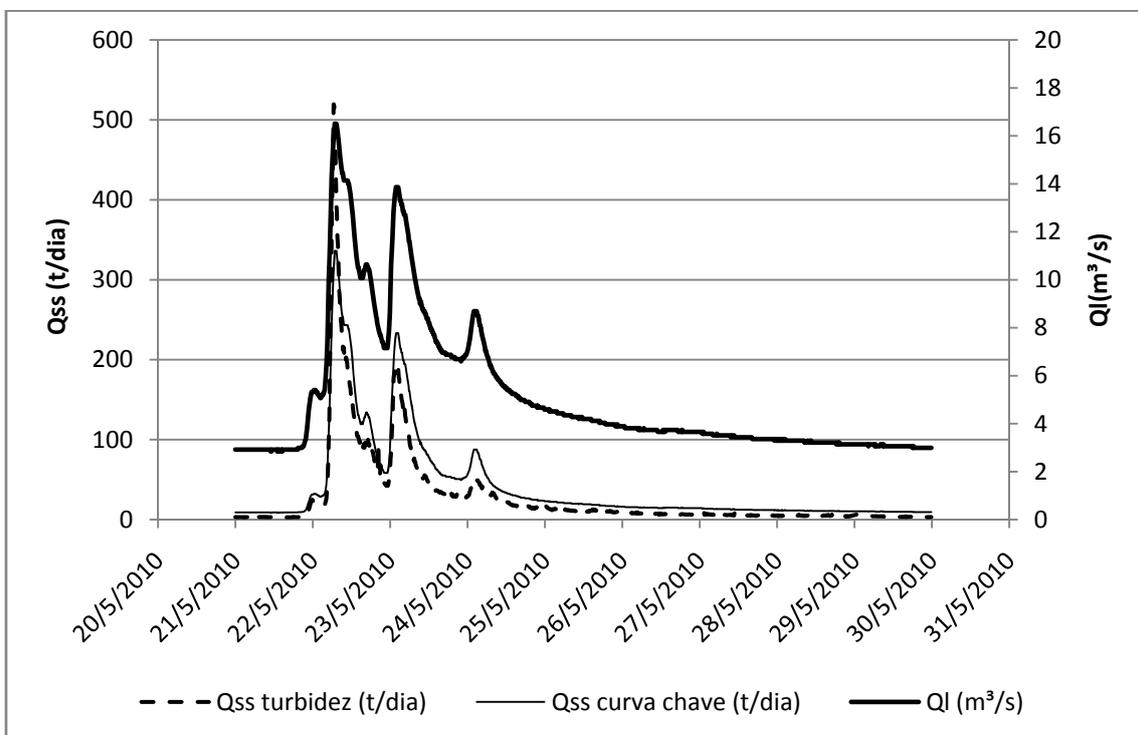


Figura 6: Visualização do comportamento das séries de vazão líquida,  $Q_{ss\_turb}$  e  $Q_{ss\_chave}$ .

## 4 - DISCUSSÃO

Os resultados deste trabalho mostram que o método da curva-chave ( $Q_{ss\_chave}$ ) subestima as vazões sólidas de sedimentos em suspensão nas vazões altas e superestima nas vazões baixas, quando comparado com o método de medição direta de turbidez ( $Q_{ss\_turb}$ ). Geralmente a  $Q_{ss\_chave}$ , como relatado em outros estudos, tende a apresentar valores subestimados tanto para vazões baixa quanto altas, como observado por Walling & Webb (1981) onde foram analisados métodos de correções destas tendências sem resultados satisfatórios. Da mesma forma, Fill & Santos (2001) notaram que a curva-chave de sedimentos apresentou resultados subestimados para as vazões baixas e altas, comparativamente com o método de medição direta com disco de Sechi, princípio inversamente proporcional ao da turbidez, por avaliar a transparência da água.

Para um melhor detalhamento dos resultados obtidos, os mesmos são avaliados frente aos estudos realizados por Williams (1989), onde são descritos vários tipos de relações entre  $C_{ss}$  e  $QI$ . O método empregado pelo autor consiste em avaliar o comportamento da concentração de sedimentos frente às vazões durante a ascensão e recessão dos hidrogramas de enchente.

Segundo Williams (1989) pode-se identificar a ocorrência de 5 tipos diferentes de formas na relação entre concentração de sedimentos e vazão, sendo: tipo 1 - linha de valor único; tipo 2 - laço horário; tipo 3 – laço anti-horário; tipo 4 – linha única mais laço; e tipo 5 – laço em oito. Segundo o autor estas formas são resultantes de vários fatores e características das bacias hidrográficas. Segundo esta classificação a bacia do rio Sagrado apresenta uma configuração similar ao laço do tipo 2 – laço horário (Figura 7).

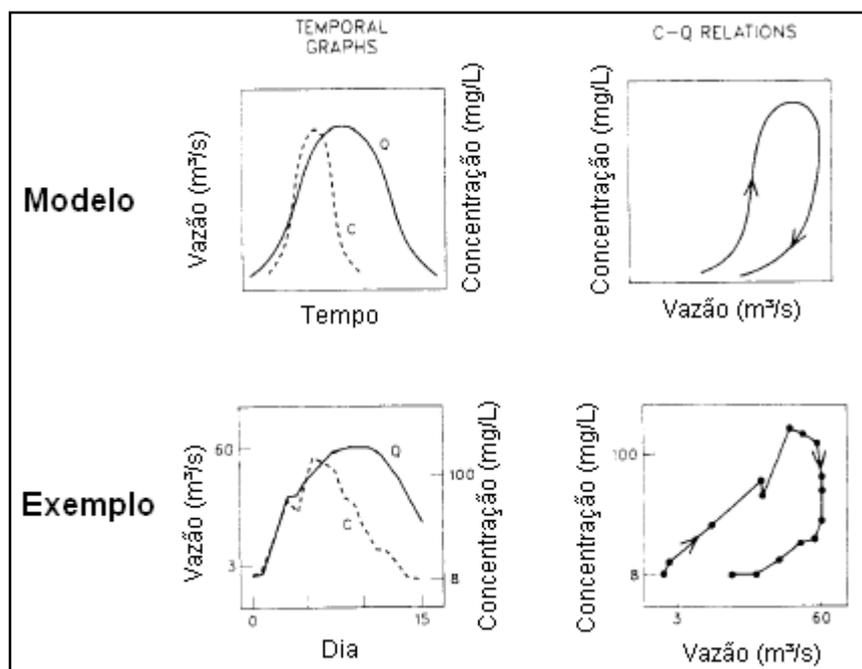


Figura 7: Exemplo de laço horário assimétrico na relação entre vazão e  $C_{ss}$  (adaptado de William, 1989).

O laço horário pode ser normalmente identificado quando o pico da concentração de sedimentos alcança seu limiar antes do pico da vazão ou quando o valor da  $C_{ss}$  é maior para uma vazão em ascensão do que para uma mesma vazão na recessão. Segundo William (1989) o laço horário ainda pode ser subdividido em quatro subclasses, das quais foi identificado o laço horário assimétrico como sendo o tipo predominante na bacia do rio Sagrado. O laço horário assimétrico ocorre devido a uma maior dispersão dos pontos  $C_{ss}-Q$  de maneira a tornar o laço assimétrico, como apresentado na Figura 7. Para esse laço o aumento da  $C_{ss}$  ocorre simultaneamente à ascensão do hidrograma e a diminuição da  $C_{ss}$  é mais rápida que a recessão.

O laço horário é atribuído a uma diminuição brusca dos sedimentos disponíveis antes do pico do hidrograma. O laço horário tende a ocorrer mais comumente durante a primeira chuva depois de um período de estabilidade. Isso se dá devido a uma acumulação dos sedimentos depositados no canal durante a recessão do evento anterior, devido a diminuição da capacidade de transporte (William, 1989).

A figura 8 mostra o período compreendido entre 07/05/2010 a 11/05/2010, aonde pode-se averiguar após um período com uma vazão baixa a ocorrência do pico da concentração de sedimentos 2 horas antes do pico da vazão. Para esse mesmo período o gráfico da relação  $C_{ss}$  e  $Q$  (figura 9) mostra o laço horário assimétrico resultante.

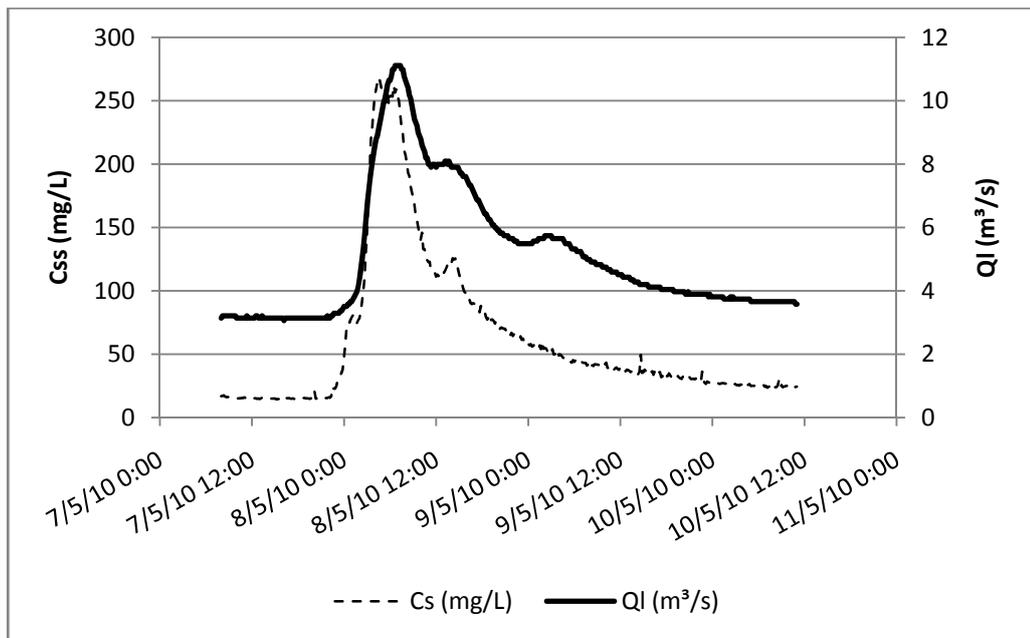


Figura 8: Relação entre  $C_{ss}$  e  $Q_I$  entre o período de 07/05/2010 a 11/05/2010.

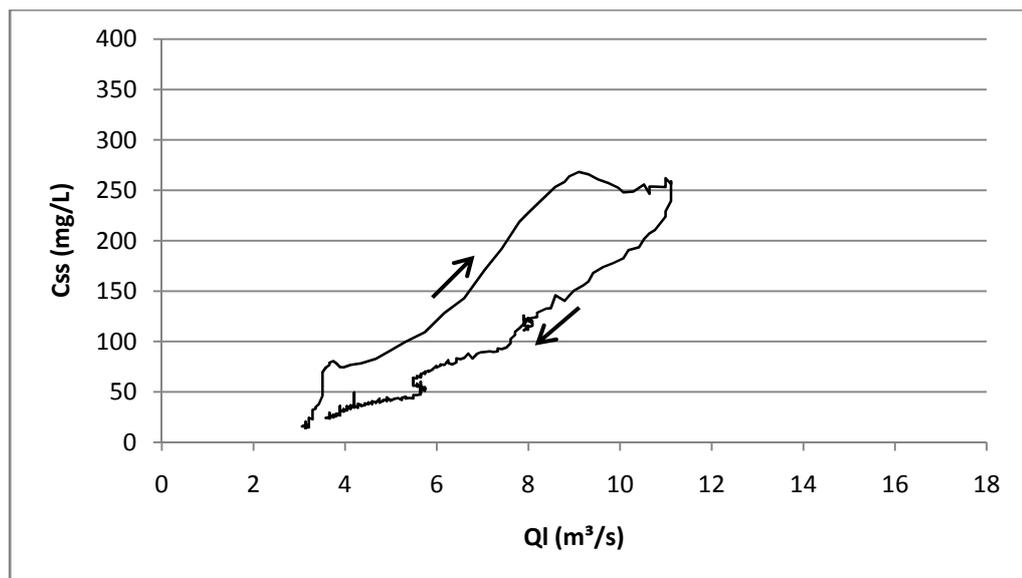


Figura 9: Laço Horário Assimétrico, identificado para o período entre 07/05/2010 a 11/05/2010.

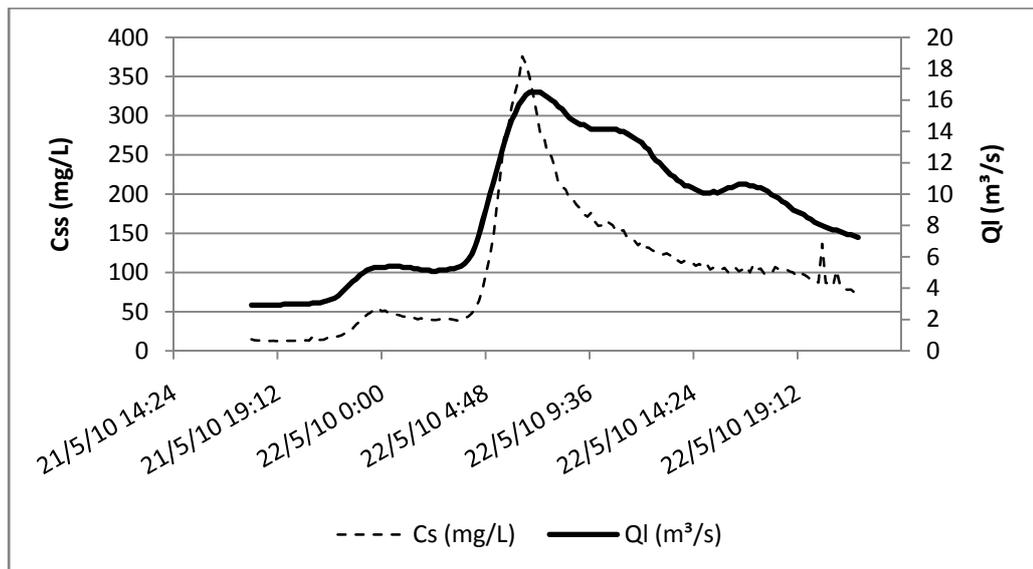


Figura 10: Laço Horário Assimétrico, identificado para o período entre 21/05/2010 a 22/05/2010.

As figuras 10 e 11 referem-se ao período de 21/05/2010 a 22/05/2010, onde pode-se observar com uma maior evidência a ocorrência do pico da  $C_{ss}$  antes do máximo da  $Q_I$ , além da forma diferenciada no comportamento das duas variáveis. É importante mencionar que o tamanho da bacia hidrográfica, bem como a acentuada declividade nas cabeceiras são fatores importantes para os aspectos encontrados na dinâmica sedimentológica abordada nesta discussão.

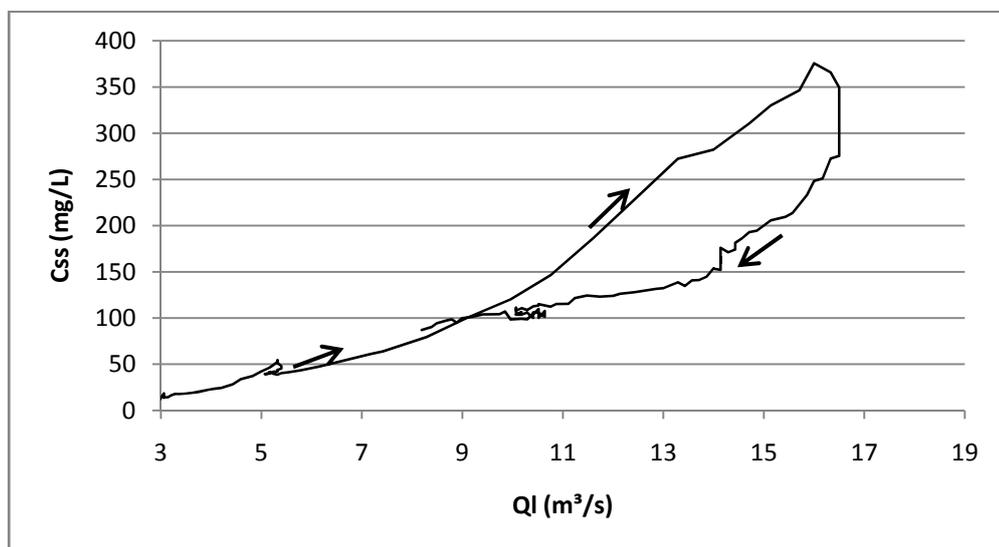


Figura 11: Laço horário assimétrico ilustrado para mesmo período da figura 10.

## 5 - CONCLUSÃO

A relação entre a turbidez e a concentração de sedimentos em suspensão foi calibrada para as características locais da bacia do rio Sagrado, com um coeficiente de determinação de 0,98, apontando para a aplicabilidade do método.

Comparativamente ao método tradicional da curva-chave, a série de vazão sólida obtida pelo monitoramento automático apresentou uma média 27,4% inferior, com diferenças significativas principalmente nos picos e recessões dos sedimentogramas.

Analisando-se o comportamento da *C<sub>ss</sub>* durante os hidrogramas de enchente, a bacia do rio Sagrado apresenta um laço horário assimétrico, conforme classificação de William (1989). Neste caso o aumento da *C<sub>ss</sub>* ocorre simultaneamente à ascensão do hidrograma e a diminuição da *C<sub>ss</sub>* é mais rápida que a recessão.

Destaca-se que a compreensão da dinâmica envolvida nos processos de produção e transporte de sedimentos é fundamental no desenvolvimento e implantação de estratégias de monitoramento.

## AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa, a Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP), ao Fundo Nacional de Recursos Hídricos (CT-Hidro) pelo apoio financeiro aos projetos do LHG/UFPR e a Ariel Dantas pela contribuição na instalação e manutenção dos equipamentos em campo.

## BIBLIOGRAFIA

BIGARELLA, J. J. (2003). *Estrutura e Origem das Paisagens Tropicais e Subtropicais*. v.3. Florianópolis: Editora da Universidade Federal de Santa Catarina.

CARVALHO, N. de O. (1994). *Hidrossedimentologia prática*. Rio de Janeiro: CPRM, 372 p.

FILL, H. D.; SANTOS, I. (2001). *Estimativa da concentração de sedimentos em suspensão através da profundidade Sechi*. In: Anais do XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos e V Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos de Língua Oficial Portuguesa, 2001, Aracaju. p. 1-9.

LEWIS, J. e EADS, R. (1998). *Automatic real-time control of suspended sediment sampling based*

*upon high frequency in situ measurements of nephelometric turbidity.* In: Proceedings Federal Interagency Workshop: Sediment Technology for the 21<sup>st</sup> Century. St. Petersburg, FL, February 17-19.

LEWIS, J. (1996). *Turbidity-controlled suspended sediment sampling for runoff-event load estimation.* Water Resour.

MORRIS, G. L. & FAN, J. (1997). *Reservoir sedimentation handbook: design and management of dams, reservoirs, and watersheds for sustainable use.* McGraw-Hill, New York.

MYLVAGANAM, S. & JAKOBSEN T. (2001). *Turbidity sensor for under water applications.* Aanderaa Instruments Inc Press.

VESTENA, L.R.; LUCINI, H., KOBAYAMA, M. (2007). *Monitoramento automático da concentração de sedimentos em suspensão na bacia hidrográfica do Caeté, Alfredo Wagner/SC.* In: I Workshop Regional de Geografia e Mudanças Ambientais: Desafios da sociedade do presente e do futuro. Guarapuava: Ed. Unicentro, Anais. p.56 – 66.

WALLING, D. E. & WEBB, B. W. (1988) *The reliability of rating curve estimates of suspended sediment yield: some further comments.* In: Sediment Budgets (ed. By M. P. Bordas & D. E. Walling) (Proc. Porto Alegre Symp., December), 337-350. IAHS Publ. n°. 174.

WILLIAMS, G. P. (1989). *Sediment concentration versus water discharge during single hydrologic events in Rivers.* In: Journal of Hydrology. Volume 111, Issues 1-4, Pg. 89-106.