



ESTIMATIVA DE DESCARGA SÓLIDA E ELABORAÇÃO DA CURVA-CHAVE DE SEDIMENTOS EM TRÊS TRIBUTÁRIOS DO RIO IGUAÇU

Helder Rafael Nocko¹; André Luciano Malheiros²; Wallington Felipe de Almeida³ Guadalupe Eugenia Garcia⁴

ABSTRACT – Knowing the solid discharge of water bodies is in the interest of several areas of engineering and environment, helping in the identification of future problems arising from sediments. Although total solid discharge is the most important variable in sedimentological studies, it is not measured daily. Due to the complexity of sediment transport, it is necessary to adopt analyzes and studies that lead to representative parameters of this phenomenon. The sediment key curve relates the flow of a transverse cross-section and the transport of sediments. Thus, the objective of this study was to calculate the solid discharges for the monitored days and to create the solid discharge curves for three tributaries of the Iguaçu River, through data obtained by field sediment samples. Monitoring provided a notion of sediment behavior in each of the studied rivers. Through the sediment transport quantification it was possible to construct a solid discharge key curve for each point. As the data here deal with sample collected in the field for analysis, having no historical series of flow and transport of sediments, there were difficulties in tracing a CCS. This fact may have occurred because the few collections were carried out and the reduced interval between them. However, by excluding data that were apparently outliers, a better fit of the curve was obtained and a closer relationship between solid flow and net flow of the studied rivers was obtained. However, for these indirect estimates of solid discharges to be more reliable, it is important to continue and complement the sedimentometric monitoring of the rivers in question, so that safety can be assured in the exclusion of the outliers and that in fact the adjustments were correct.

Palavras-Chave – Sedimentos em suspensão; Descarga sólida; Curva-chave.

1) EnvEx Engenharia e Consultoria, R. Dr. Jorge Meyer Filho, 93 - Jardim Botânico, Curitiba - PR, 80210-190, helder@envexengenharia.com.br, (45) 3053-3487.

2) EnvEx Engenharia e Consultoria, R. Dr. Jorge Meyer Filho, 93 - Jardim Botânico, Curitiba - PR, 80210-190, andre@envexengenharia.com.br, (45) 3053-3487.

3) EnvEx Engenharia e Consultoria, R. Dr. Jorge Meyer Filho, 93 - Jardim Botânico, Curitiba - PR, 80210-190, felipe.almeida@envexengenharia.com.br, (45) 3053-3487.

4) EnvEx Engenharia e Consultoria, R. Dr. Jorge Meyer Filho, 93 - Jardim Botânico, Curitiba - PR, 80210-190, guadalupe.garcia@envexengenharia.com.br, (45) 3053-3487./.



1 - INTRODUÇÃO

A erosão ocorrida em uma bacia hidrográfica é responsável pela presença de sedimentos nos cursos d'água. Conhecer a descarga sólida dos corpos hídricos é do interesse de diversas áreas da engenharia e meio ambiente, sendo que isto ajuda na identificação de futuros problemas decorrentes dos sedimentos (VEIGA *et al.*, 2015).

Mendes (2005) cita a importância destes estudos como prevenção de assoreamento em reservatórios de diversas finalidades, como irrigação, abastecimento de água, recreação, navegação e na geração de energia. Merten *et al.* (2014) destacaram a importância de estudos que estimam o fluxo de sedimentos para prever a vida útil de reservatórios, dado que as fontes hidráulicas (usinas hidrelétricas) são predominantes na matriz energética brasileira.

A distribuição dos sólidos no decorrer de um rio normalmente é caracterizada pelo volume e pela granulometria do material transportado (SANTOS *et al.*, 2001).

Os sedimentos em suspensão representam a maior parcela da carga sólida de um rio, sendo que a amostragem destes pode ser de forma pontual ou por integração entre verticais (CARVALHO, 2000). Por sua vez, os sedimentos de arrasto e leito representam a menor parcela, podendo estes serem amostrados diretamente ou estimados indiretamente através de fórmulas empíricas (CARVALHO, 2008).

Por mais que a descarga sólida total é a variável mais importante nos estudos sedimentológicos, ela não é medida diariamente. Carvalho (2008) explica ainda que devido à complexidade do transporte de sedimentos, é necessário adotar análises e estudos que conduzam a parâmetros representativos deste fenômeno. A curva-chave de sedimentos (CCS) relaciona a vazão de uma seção transversal de escoamento e o transporte de sedimentos.

Desta forma, o objetivo deste estudo foi calcular as descargas sólidas para os dias monitorados e criar as curvas-chaves de sedimentos para três tributários do rio Iguaçu através de dados obtidos por amostras coletadas em campo.

2 - METODOLOGIA

O presente trabalho é resultado de pesquisas sedimentológicas desenvolvidas pela empresa EnvEx Engenharia e Consultoria entre os dias 08/12/2017 e 24/02/2018, em três afluentes do rio Iguaçu.

A área de estudo abrange três tributários do rio Iguaçu, localizados na bacia do Baixo Iguaçu, à montante da região do Parque Nacional do Iguaçu, compreendendo parte dos territórios dos municípios de Capanema e Capitão Leônidas Marques - Paraná. Os afluentes monitorados



possuem características distintas referentes à vazão, possibilitando assim demonstrar o comportamento de descarga sólida de cada um.

O primeiro ponto de coleta se situa no rio Monteiro, na cidade de Capitão Leônidas Marques, estado do Paraná, nas coordenadas $25^{\circ}28'48.80''S$ $53^{\circ}38'30.49''W$. O segundo ponto de coleta se situa no rio Capanema, na cidade de Capanema, estado do Paraná, nas coordenadas $25^{\circ}35'33.50''S$ $53^{\circ}37'32.90''W$. O terceiro ponto de coleta se situa no rio Andrade, na cidade de Capitão Leônidas Marques, estado do Paraná, nas coordenadas $25^{\circ}35'33.50''S$ $53^{\circ}37'32.90''W$.

A metodologia foi dividida em três etapas essenciais para se obter os resultados, sendo elas: medição de vazão, coleta de sedimentos e elaboração da curva-chave de descarga sólida.

Buscando conhecer a carga de sedimentos durante as variações dos rios monitorados, as coletas se dividiram em duas campanhas: a primeira foi realizada entre os dias 08 e 13 de dezembro, a qual teve como objetivo coletar amostras durante os períodos de estiagem dos rios. A segunda foi realizada entre os dias 26 de janeiro e 24 de fevereiro de 2018, tendo como objetivo coletar amostras durante os períodos de cheias dos corpos hídricos monitorados. Nesta última, as amostras foram coletadas semanalmente.

As medições de vazão foram realizadas em campo com molinete fluviométrico MLN-7, uma vez que foram seguidas as orientações de Santos *et al.* (2011) nos procedimentos desenvolvidos, sendo este operado com haste no ponto 1 e com guincho fluviométrico nos pontos 2 e 3. O cálculo da área foi realizado pelo método da meia seção e a velocidade da água nas verticais de monitoramento foi obtida através da equação de calibração do molinete, consistindo uma média na seção transversal. Por fim, a vazão foi calculada como sendo o produto entre área e velocidade média.

As coletas de sedimentos foram realizadas com os amostradores USD-49 e USDH-48 pelo método de amostragem por Igual Incremento de Largura (IIL), sendo utilizados os equipamentos conforme as características de cada rio. Devido às baixas profundidades do ponto 1, as coletas foram realizadas com o USDH-48. No ponto 2 e no ponto 3 foi utilizado o amostrador USD-49.

Como o próprio nome indica, no método IIL a seção de medição é dividida em segmentos de tamanhos iguais para a realização da coleta de subamostras de água (CARVALHO, 2000). Neste método, a partir das características de descarga líquida do corpo hídrico, é determinada uma velocidade constante de descida/subida do amostrador que será usada em todas as verticais. As amostras coletadas foram encaminhadas ao laboratório para determinação da concentração de sedimentos em suspensão através o método do tubo de remoção pela base.

Foi adotado o método simplificado de Colby (1957) para o cálculo da descarga sólida total nos pontos de medição. Este método possui três ábacos distintos a partir dos quais se obtém parâmetros em função dos dados de entrada descritos anteriormente. Os parâmetros obtidos dos ábacos são introduzidos em equações para a determinação da descarga sólida não medida. Ao



final, é então determinada a descarga sólida total, através da soma da descarga sólida em suspensão e a descarga não amostrada (CARVALHO, 2008).

O cálculo da descarga sólida total é realizado pela seguinte equação:

$$Q_{st} = Q_{sm} + Q_{nm} \quad (1)$$

Onde Q_{st} é a descarga sólida total, Q_{sm} é a descarga sólida medida, e Q_{nm} é a descarga sólida não medida. O valor de Q_{sm} corresponde à descarga sólida em suspensão, enquanto o valor de Q_{nm} corresponde à descarga de arrasto somada à descarga não amostrada (CARVALHO, 2008).

A determinação da descarga sólida medida é obtida a partir da concentração de sedimentos em suspensão (C_s) e da vazão líquida medida (Q) no momento da amostragem de sedimentos em suspensão. Assim,

$$Q_{sm} = 0,0864 \cdot Q \cdot C_s \text{ (t/dia)} \quad (2)$$

Os dados de entrada deste método são: profundidade média da seção, velocidade média da água na seção, largura da seção, descarga líquida e concentração de sólidos em suspensão, não dependendo da entrada de dados referentes aos sedimentos do leito.

Com os dados de descargas líquidas e sólidas foram criadas planilhas com a identificação de cada dia de coleta para facilitar a visualização e elaboração dos gráficos. Para determinar as curvas-chave dos pontos monitorados foram utilizadas planilhas eletrônicas. Os dados de descargas líquidas e sólidas dos dias monitorados foram correlacionados em gráficos, onde plotou-se no eixo “X” das abscissas a descarga sólida e no eixo “Y” das ordenadas a descarga líquida, obtendo assim a equação e o coeficiente de correlação (R^2) das curvas.

3 - RESULTADOS

A primeira campanha de coleta resultou em uma amostra de cada ponto. Como a maior parte dos sedimentos transportados por um curso d’água ocorre nos seus eventos de cheias (WALLING e WEBB, 1987), priorizaram-se as coletas durante os períodos de cheias, uma vez que a segunda campanha resultou em cinco amostras coletadas em cada um dos rios monitorados. Com os dados de descargas sólidas e líquidas obtidas durante este estudo, foi possível construir os gráficos da relação entre elas e ajustar uma curva-chave de produção de sedimento dos pontos. Para isso, adotou-se a curva exponencial em todos os gráficos, sendo essa a que apresentou melhor coeficiente de correlação. A Tabela 1 apresenta os dados obtidos durante o monitoramento no ponto 1.

O rio Monteiro apresentou certa estabilidade nas medições de vazão, variando entre 0,97 m³/s e 2,23 m³/s. Este foi o ponto em que se registraram as menores vazões do estudo e, conseqüentemente, a carga de sólidos também foi a menor comparada aos outros pontos, ficando entre 0,259 t/dia e 15,992 t/dia. Com base nos dados apresentados na Tabela 1, construiu-se a curva-chave de sedimentos deste rio (Figura 1).

Tabela 1 – Resultados das medições do ponto 1 – rio Monteiro.

Data	Vazão (m ³ /s)	Sólidos Suspensos Totais (mg/l)	Descarga Sólida em Suspensão (t/dia)	Descarga Sólida não medida (t/dia)	Descarga Sólida Total (t/dia)
08/12/17	2,23	1	0,193	0,598	0,791
29/01/18	1,66	80	11,443	4,550	15,992
01/02/18	1,45	10	1,251	1,467	2,718
09/02/18	1,09	34	3,194	1,186	4,380
16/02/18	0,97	1	0,084	0,175	0,259
23/02/18	1,89	11,2	1,828	2,027	3,855

Inicialmente, a curva não apresentou um bom ajuste. Carvalho (2008) orienta para que os pontos considerados discrepantes, ou seja, *outliers* sejam excluídos da CCS, visando melhorar sua tendência. Desta forma, excluíram-se da curva dois pontos que apresentaram maior discrepância nas medições, sendo eles referente às coletas dos dias 08/12/2017 e 09/02/2018. Assim, obteve-se uma curva ajustada do ponto 1 (Figura 2).

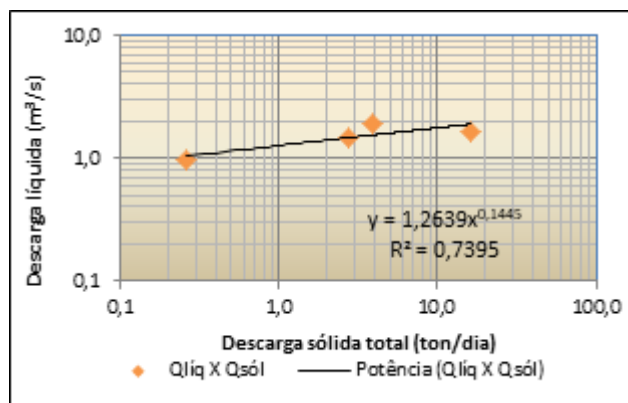
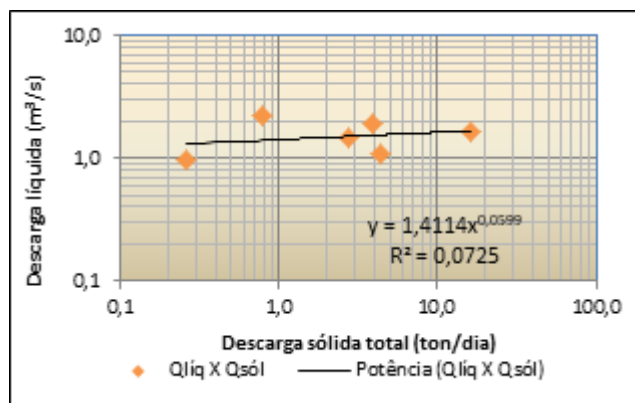


Figura 1 - Curva-chave de descarga sólida do ponto 1 – rio Monteiro. (Fonte: autoria própria).

Figura 2 - Curva-chave de descarga sólida do ponto 1 após ajuste. (Fonte: autoria própria).

Nota-se que após retirar os *outliers* da curva-chave o coeficiente de correlação aumentou significativamente. No entanto, para que não ocorra erros nas estimativas de descarga sólidas, é necessário obter uma quantidade maior de amostras, direcionando matematicamente a CCS à ficar mais próxima da realidade.

No ponto 2, rio Capanema, assim como nos demais rios estudados, foram realizadas 6 coletas de sedimentos em suspensão e 6 seis medições de vazões. A Tabela 2 apresenta os resultados dos monitoramentos no ponto 2 juntamente com os respectivos dias de coletas.

Tabela 2 – Resultados das medições do ponto 2 – rio Capanema.

Data	Vazão (m³/s)	Sólidos Suspensos Totais (mg/l)	Descarga Sólida em Suspensão (t/dia)	Descarga Sólida não medida (t/dia)	Descarga Sólida Total (t/dia)
09/12/17	45,44	1	3,93	33,69	37,61
28/01/18	53,33	1	4,61	55,30	59,91
31/01/18	37,05	10	32,01	95,54	127,55
08/02/18	7,54	1	0,65	1,71	2,36
19/02/18	10,83	30	28,07	18,38	46,45
24/02/18	16,22	1	1,40	7,91	9,32

O rio Capanema apresentou grandes variações de vazão durante o período de estudo, ficando entre 7,54 m³/s e 53,33 m³/s. A carga de sólidos foi maior em relação ao ponto 1 e variou entre 2,36 t/dia e 127,55 t/dia. Com os dados apresentados na Figura 3, construiu-se a curva-chave de sedimentos deste rio.

A tentativa inicial de ajuste de uma curva-chave também não foi satisfatória. Para ajustar a correlação, excluiu-se o ponto que apresentou discrepância nas medições, sendo esse referente à coleta do dia 19/02/2018. Desta forma, obteve-se uma curva ajustada do ponto 2 (Figura 4). Assim como no rio Monteiro, é possível notar que após retirar os pontos discrepantes da curva-chave do ponto 2, o coeficiente de correlação aumentou significativamente.

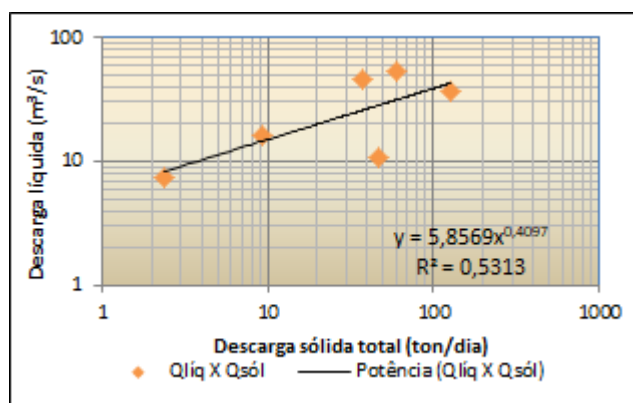


Figura 3 - Curva-chave de descarga sólida do ponto 2 – rio Capanema. (Fonte: autoria própria).

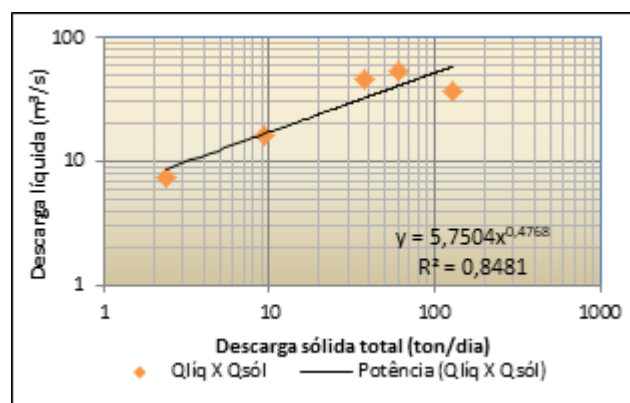


Figura 4 - Curva-chave de descarga sólida do ponto 2 após ajuste. (Fonte: autoria própria).

No rio Andrade, ponto 3, o monitoramento também resultou em 6 medições de vazões e 6 coletas de sedimento em suspensão. A Tabela 3 apresenta os dados coletados no ponto 3 durante este estudo.

Tabela 3 – Resultados das medições do ponto 3 – rio Andrade.

Data	Vazão (m³/s)	Sólidos Suspensos Totais (mg/l)	Descarga Sólida em Suspensão (t/dia)	Descarga Sólida não medida (t/dia)	Descarga Sólida Total (t/dia)
13/12/17	20,92	37,5	67,779	27,991	95,770
26/01/18	46,42	40	160,439	164,866	325,305
01/02/18	42,06	10	36,344	61,913	98,257
09/02/18	23,96	40	82,792	47,411	130,204
16/02/18	36,85	12	38,210	57,017	95,227
23/02/18	34,40	1	2,972	15,945	18,917

As variações de vazão do rio Andrade foram menores do que nos outros rios aqui estudados, ficando entre 20,92 m³/s e 46,42 m³/s. Por sua vez, a descarga sólida deste ponto ficou entre 18,917 e 325,305 t/dia. Com os dados apresentados na Tabela 3, construiu-se a curva-chave de sedimentos do ponto 3 (Figura 5).

Inicialmente, o ajuste de uma curva aos dados não foi possível. Para otimizar o coeficiente de correlação da curva excluíram-se dois pontos que apresentaram maior discrepância nas medições, sendo esse referente às coletas dos dias 13/12/2017 e 09/02/2018. Assim, obteve-se uma curva ajustada do ponto 3 (Figura 6). Conforme apresentado nos demais rios, excluir os dados discrepantes da curva-chave deste rio apresentou uma elevação significativa no R².

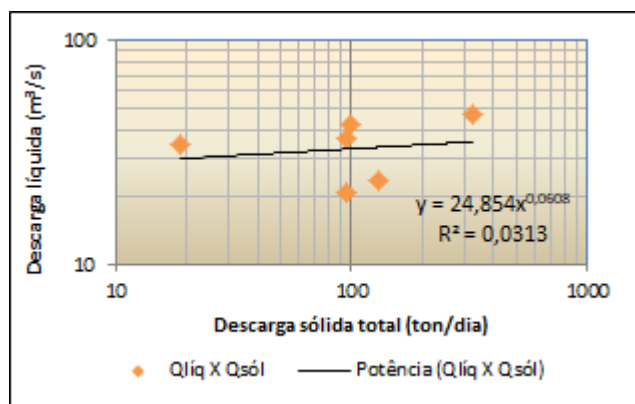


Figura 5 - Curva-chave de descarga sólida do ponto 2 – rio Capanema. (Fonte: autoria própria).

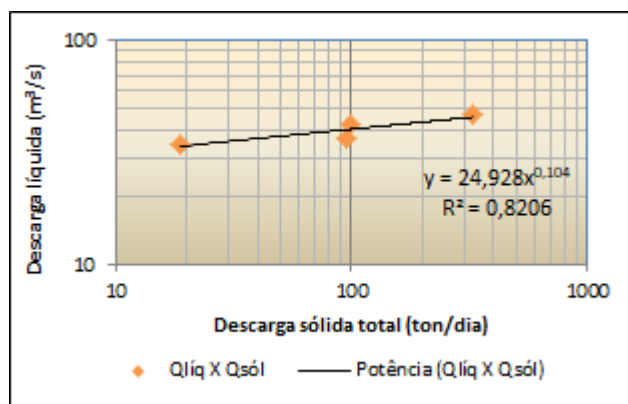


Figura 6 - Curva-chave de descarga sólida do ponto 2 após ajuste. (Fonte: autoria própria).

4 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

O monitoramento proporcionou uma noção do comportamento dos sedimentos em cada um dos rios estudados. Através da quantificação do transporte de sedimento foi possível construir uma curva-chave de descarga sólida para cada ponto. Como os dados aqui tratam de amostra coletas em campo para análise, não dispondo de uma série histórica de vazão e transporte de sedimentos, houve dificuldades em traçar uma CCS. Esse fato pode ter ocorrido devido às poucas



coletas terem sido realizadas e ao intervalo de tempo reduzido entre elas. No entanto, ao se excluir dados que aparentemente se tratavam de *outliers*, obteve-se um melhor ajustamento da curva e uma relação mais próxima entre vazão sólida e vazão líquida dos rios em estudo.

Porém, para que essas estimativas indiretas de descargas sólidas possam ser mais confiáveis, é importante que se continue e se complemente o monitoramento sedimentométrico dos rios em questão, de modo que se possa ter segurança quanto à exclusão dos *outliers* e que de fato os ajustes foram corretos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CARVALHO, N. O.; FILIZOLA JÚNIOR, N. P.; SANTOS, P. M. C.; LIMA, J. E. F. W. (2000). *Guia de Práticas Sedimentométricas*. Brasília, 154p.

CARVALHO, N. O. (2008). *Hidrossedimentologia prática*. 2 ed., rev., atual. e ampliada. Rio de Janeiro: Interciência.

MENDES, A. B. (2005). *Análise Sinérgica da Vida Útil de um Complexo Hidrelétrico: Caso do Rio Araguaia, Brasil*. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Coppe/ufrrj, Rio de Janeiro, 98 p.

MERTEN, G. H.; MINELLA, J. P. G.; HOROWITZ, A. J.; MORO, M. (2014) *Determinação da concentração de sedimentos em suspensão em rios com o uso de turbidímetro*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

SANTOS, I.; FILL, H. D.; SUGAI, M. R. V. B.; BUBA, H.; KISHI, R. T.; MARONE, E.; LAUTERT, L. F. (2001) *Hidrometria aplicada*. Curitiba: Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, LACTEC, 372p.

VEIGA, A. M. ; SOARES, A. K. ; COELHO FILHO, J. A. P. ; SOUZA, D. N. ; OLIVEIRA, W. N. (2015) *Determinação da produção de sedimento através da curva-chave sedimentométrica na Bacia Hidrográfica do Rio Araguaia-GO*. In: XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2015, Brasília, DF. Anais do XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos.

WALLING, D. E.; WEBB, B. W. (1987) Suspended load in gravel-bed rivers. In: THORNE, C. R.; BATHURST, J. C.; HEY, R. D.. *Sediment Transport in Gravel-bed Rivers*. Darmstadt: John Wiley & Sons, p.691-734.

AGRADECIMENTOS

À equipe técnica da empresa Envex Engenharia e Consultoria pela dedicação durante o desenvolvimento deste estudo.