



## XXII SÍMPOSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

26 de novembro a 01 de dezembro de 2017

Florianópolis- SC

### FORMULAÇÃO DE UMA EXPRESSÃO EMPÍRICA DE ARRASTE DE FUNDO PARA RIOS ENCOURAÇADOS DE ELEVADA DECLIVIDADE

*Mauricio Romero Mérida<sup>1\*</sup> & Vanesa Ponce Balderrama<sup>2</sup>*

**Resumo** – O estudo do transporte de sedimentos em rios é um tema pouco estudado devido à escassez de dados, assim se pretende estudar o transporte de sedimentos nos rios Santa Isabel e Málaga, localizado na cidade de Cochabamba (Bolívia).. O objetivo desta investigação é contribuir com a melhoria da disponibilidade de dados de referências a nível local que orientem um procedimento para quantificar a taxa de sedimentos nos rios de alta montanha, além de propor equações que melhor reproduzam o fenômeno de transporte de sólidos. Realizaram-se campanhas para medição de descarga líquida e sólida, depois procedeu-se à formulação das expressões empíricas próprias, utilizando a análise dimensional, também o aplicativo de técnicas de regressão linear e não linear, para sua respectiva comparação dos valores medidos e calculados de transporte de fundo consideraram-se o Coeficiente de Eficiência de Nash & Sutcliffe COEx e Outros. Como resultado se têm dois modelos que representam melhor o transporte de sedimentos e rios acorazados.

**Palavras-Chave** – Transporte de sedimentos, rios encouraçados e declivosos.

### FORMULATION OF AN EXPRESSION EMPIRICAL OF TRAWLING FOR RIVERS BATTLESHIPS OF STEEP SLOPE

**Abstract** –. The study of the transport of sediments in rivers is a subject little studied due to the scarcity of data, so it is intended to study sediment transport in the rivers Santa Isabel and Málaga, located in the city of Cochabamba (Bolivia) .. The objective of this investigation is to contribute With the improvement of the availability of reference data at the local level that guide a procedure to quantify the sediment rate in high mountain rivers, as well as to propose equations that best reproduce the solid transport phenomenon. Campaigns were carried out to measure liquid and solid discharges, followed by the formulation of the own empirical expressions, using the dimensional analysis, also the application of linear and non-linear regression techniques, for their respective comparison of the measured and calculated values of The Nash & Sutcliffe COEx and Others Efficiency Coefficients. As a result, there are two models that better represent the transport of sediments and armored rivers

**Keywords** – Transport of sediments, rivers and battleships.

<sup>1</sup> Universidad Mayor de San Simon, Cochabamba ,Bolivia- E-mail:mauri.romero@fcyt.umss.edu.bo

<sup>2</sup> Universidad Mayor de San Simon, Cochabamba ,Bolivia- E-mail:vanesaponcebalderrama@gmail.com



## **XXII SÍMPOSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS**

**26 de novembro a 01 de dezembro de 2017**

**Florianópolis- SC**

### **INTRODUÇÃO**

Os canais de rios de montanha diferenciam-se amplamente dos canais aluviais. Estas diferenças fazem referência às condições topográficas, morfológicas e geológicas, as quais fazem com que a hidráulica e o transporte de sedimentos neste tipo de correntes tenham características diferentes. Dentro das características topográficas encontram-se a declividade que para canais de montanha é superior a 0.2% (Jarrett 1990), o qual faz que os números de Froude sejam próximos a 1 (condição quase crítica).

A morfologia destes canais obedecem as correntes com escasso transbordamento lateral sem a presença de meandros ou curvaturas marcadas e em alguns casos a sequência de trechos alternados entre rápidas e quedas. No que faz referência ao aspecto geológico os materiais de fundo correspondem a granulometrias grossas típicas de leitos compostos por cascalhos e pedregulhos, o que influi significativamente na resistência ao fluxo e à capacidade de transporte do material.

Numerosas equações têm sido propostas para calcular o transporte de sedimentos em função das características morfológicas, hidráulicas e sedimentológicas em rios e canais. Ditas equações têm sido desenvolvidas e verificadas experimentalmente, no entanto, a falta de dados confiáveis com os quais as verificar, tem favorecido a proliferação das mesmas em lugar da consolidação e aceitação generalizada de um grupo reduzido de equações para aplicativos práticos. A validade das equações é portanto limitada à faixa de variação dos parâmetros hidrodinâmicos e sedimentológicos para os quais têm sido verificadas e geralmente proporcionam valores de transporte notavelmente diferentes (entre a cada uma das mesmas e com respeito a dados observados) quando são superados ditos limites (Maza, 1996)..

O transporte de sedimentos em rios de montanhas é um tema de grande complexidade e que depende de muitos fatores difíceis de quantificar como ser a resistência ao fluxo, esforços de corte a nível do leito, acorazamiento devido às formas do leito e outros. É de modo que considerou-se importante estudar variáveis que se considerem relevantes no transporte de sedimentos para rios de montanha.

Por tratar de um processo físico muito complexo propuseram-se fórmulas empíricas, desenvolvidas com um banco de dados experimental. Aproveitando o banco de dados de rios de montanha com a que conta o Laboratório de Hidráulica da Universidade Maior de San Simón (LHUMSS), pretende-se obter uma fórmula empírica que seja aplicável às características de rios próprios que estão próximas à cidade de Cochabamba, e que tenha uma melhor ou similar capacidade de predição que as desenvolvidas por outros autores.

## XXII SÍMPOSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

26 de novembro a 01 de dezembro de 2017

Florianópolis- SC

### CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

As zonas de estudo encontram-se localizadas na província Chapare do departamento de Cochabamba a 85 Km da cidade de Cochabamba-Bolívia (ver Figura 1).



Figura 1- Província Chapare e localização da zona de estudo (Aguabólviva, 2007)

Os rios Santa Isabel e Málaga são rios de alta declividade e regime torrencial, com presença de sedimento grosso, água durante todo o ano, o qual os converte em rios perennes (Figuras 2).

Por meio de uma visita de campo efetuada pelo pessoal do laboratório de hidráulica (LHUMSS) em data 23/02/07 localizaram-se os lugares de amostragem em ambos os canais, cujas coordenadas UTM são  $E = 198983,917$ ,  $N = 8097741,555$  e elevação de 1683,8 m. aproximadamente para o rio Santa Isabel.



Figura 2- Vista do rio Santa Isabel e Málaga(A montante)

A zona de aforo escolhida para o rio Málaga tem coordenadas  $E = 200177,892$ ,  $N = 8095263,5$  e de elevação = 1903,281 (perto à Ponte sobre o rio Málaga).



## **XXII SÍMPOSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS**

**26 de novembro a 01 de dezembro de 2017**

**Florianópolis- SC**

### **Río Santa Isabel**

O trecho escolhido para realizar o trabalho de medição de descargas líquidas e sólidas, bem como as amostragens de sedimento para a obtenção da granulometria do leito conta com uma larga média de 7,5 m entre as épocas de Abril e Outubro incrementando na época de cheia (Novembro- Março). O leito do rio Santa Isabel apresenta material grosso, rochas e até pedregulhos, enquanto na superfície observa-se material mais fino. O rio Santa Isabel, tanto em época de estiagem como em época de enchente, apresenta água com sedimentos.

### **Río Málaga**

A zona na que se realizaram os trabalhos de medição de descarga líquida e sólida, amostragem da granulometria do leito e a avaliação de todos os parâmetros hidráulicos necessários (Figura 2), onde o trecho eleito para os trabalhos conta com uma largura média de 10,5 m entre as épocas de Abril e Outubro com um aumento do mesmo na época de crescidas (Novembro - Março). O leito deste rio de alta montanha está conformado por material muito grosso, entre pedras, pedregulhos e cascalho. Uma das características deste rio é que durante todo o ano tem água livre de sedimentos em suspensão.

## **MATERIAIS E METODOS**

O monitoramento hidrossedimentológico ocorreu entre os anos 2007 a 2012, com primeira campanha realizada em 05/09/07 e a última em 18/12/12, totalizando 32 campanhas para o rio Santa Isabel e 31 para o rio Málaga, nas quais se realizaram as medidas de vazão mediante um molinete convencional óptico Swoffer 3000 (Figura 3), para posterior geração da curva-chave da seção.

O material de fundo foi coletado com um amostrador Helley-Smith, colocando no fundo do leito em direção contrária ao fluxo durante um tempo dentre 3 a 5 minutos, em função à quantidade de sedimento coletado na rede (Vão Rijn, 1984), tal como se ilustra na (Figura 3). Posteriormente o material coletado foi cuidadosamente lavado e depositado em recipientes de plástico de 1 litro, para sua posterior análise no Laboratório de Geotecnia da UMSS. Repetiu-se o processo em média 5 vezes por amostragem, e constatou-se que a quantidade de material coletado era similar, pelo que se considera que o processo de amostragem é representativa.



**ABRH**  
Associação Brasileira de  
Recursos Hídricos

## XXII SÍMPOSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

26 de novembro a 01 de dezembro de 2017

Florianópolis- SC



**Figura 3- Aforos de vazão líquido e sólido.**

Mediante a análise dimensional e especificamente o aplicativo do teorema de  $Pi$  de Buckingham identificassem-se os parâmetros adimensionais que se assumiram governam a interação entre o transporte de fundo e seu meio. Neste sentido, considera-se que existe uma relação funcional  $f$  que pode descrever o fenômeno de transporte de fundo.

O transporte de fundo  $q_{SB}$  está em função dos parâmetros conceituados mais importantes, ou aqueles que podem ser medidos ou calculados para o fluxo líquido e sólido. Como a velocidade média, tirante médio, gravidade, densidade do água, rádio hidráulico, declividade do leito, Coeficiente de Manning, velocidade competente de fundo, diâmetro de blindagem e outros.

As variáveis conceituadas agrupam-se em variáveis dimensionais, depois de aplicar-se o teorema  $Pi$  de Buckingham, e de levar a cabo uma série de combinações e operações entre os diferentes números dimensionais obtidos, com a finalidade de encontrar variáveis dimensionais representativas do problema. Obtém-se diversas equações dimensionais tanto lineares como não lineares, bem como modelos logarítmicos.

A seguir, mostram-se as oito equações conceituadas, onde posteriormente; sobre a base da estimativa de Coeficiente de Eficiência de Nash & Sutcliffe  $COEx$ , o Erro Regular Médio de Estimativa  $Sx$  e o Erro Médio Absoluto  $EPAx$  para o transporte de fundo, se validarão os três melhores modelos, para posteriormente eleger ás melhores fórmulas, cujos resultados sejam os mais satisfatórios na predição de  $g_{BS}$ . Nestes modelos  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  e  $e$  são constantes de calibração.

Para a regreção dos modelos, utilizou-se o software estatístico SPSS Statistics 21.0 para regreção linear e não linear, esta última sobre a base do método iterativo de Levenberg-Marquardt (LMA) para minimización de funções em regreção por mínimos quadrados e programação não linear.

## XXII SÍMPOSIOS BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

26 de novembro a 01 de dezembro de 2017

Florianópolis- SC

Na fase de calibração, elegeram-se aleatoriamente 50 dados em SPSS, deixando os restantes 13 dados para a fase de validação, os quais constituem o 20% do total, tal como sugere (López 2005). Por questões de espaço só se mostrassem os modelos que foram escolhidos para a fase de validação Modelo 2 (Equação 1) e Modelo 8 (Equação 2).

$$(1) \frac{q_{SB}}{h\rho_s U_{SC}^*} = 0.019 \left( \frac{v}{\frac{1}{h^3 ng}} \right)^{4.155} \left( \frac{D_{50}}{R_h} \right)^{-7.184} (\sigma_g)^{-47.165} (S_f)^{-4.908}$$

$$(2) \frac{q_{SB}}{h\rho_s v_c} = 0.000001 \left( \frac{v}{\frac{1}{h^3 ng}} \right)^{3.178} \left( \frac{D_{50}}{D_b} \right)^{0.972} (\sigma_g)^{0.135} (S_f)^{0.467}$$

### RESULTADOS E DISCUSSÕES

No seguinte diagrama de dispersão (Figura 4) mostram-se unicamente aos modelos empíricos que mais se aproximam dos valores medido em campo, deixando de lado os demais modelos empregados e os considerando unicamente para confirmar o fato de que não existe em realidade uma equação que tome em conta todos os fenômenos que ocorrem neste tipo de ríos, pelo que a análise estatística somente se efetuasse a estes resultados. Os valores mostrados na Tabela 1 ilustram os valores de COEx, Sx e EPAX para gbs correspondem ao Coeficiente de Eficiência de Nash & Sutcliffe, o Erro Regular Média de Estimativa e o Erro Médio Absoluto, cujas formula não foram apresentadas anteriormente por questões de espaço.

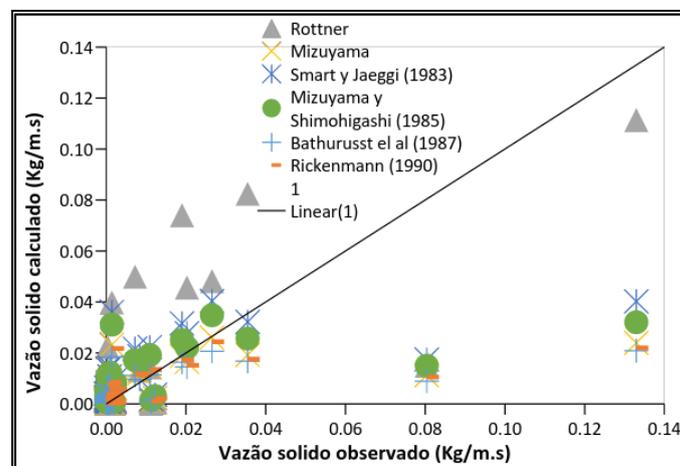


Figura 4- Diagrama de dispersão de gsb calculados vs. gsb observados para os modelos empíricos que representam melhor o fenômeno estudado

## XXII SÍMPOSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

26 de novembro a 01 de dezembro de 2017

Florianópolis- SC

Tabela 1 – Valores de COEx, Sx e EPAx para gSB; modelos empíricos que representam melhor o fenômeno estudado.

Variable	Rottner (1959)	Mizuyama (1981)	Smart y Jaeggi (1983)	Mizuyama y Shimohigashi (1985)	Bathurst et al (1987)	Rickenmann (1990)
COE <sub>x</sub>	0,384	0,278	0,368	0,334	0,245	0,258
S <sub>x</sub> (%)	958,7	473,4	811,6	653,7	394,2	435,3
EPA <sub>x</sub> (%)	313,5	277,7	497,9	395,7	226,9	255,6

Os resultados obtidos mostram uma dispersão notável entre valores calculados e observados da taxa de arraste de fundo gBS para a maioria dos modelos. A figura anteriormente apresentada mostra que existem modelos que sobre ou subestimam o transporte de fundo com o bissetor onde se cumpre que COEx = 1, Sx = 0 % e EPAx = 0 %. Valores más alejados de 1 para COEx indicam uma maior dispersão entre valores observados e calculados de gBS.

A maneira de ilustração, a (Figura 5) apresenta o diagrama de dispersão da taxa de transporte de fundo observados vs. calculados na fase de calibração e validação.

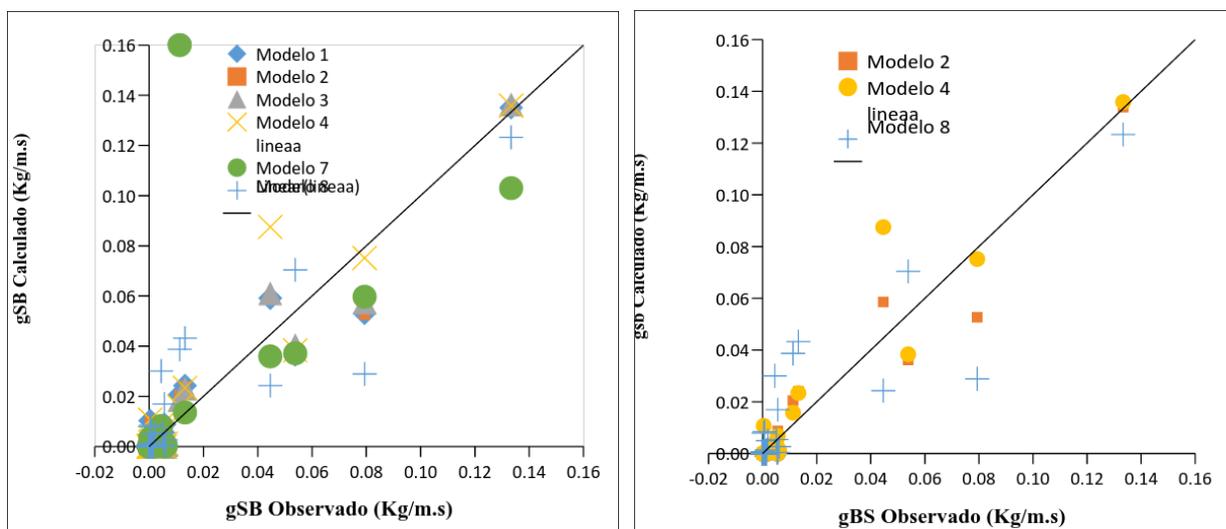


Figura 5- Diagrama de dispersão de gBS vs. gBS para os modelos empíricos próprios selecionados; Fase de Calibração e Validação

Também apresentam-se os resultados da (tabela 2) com os valores da fase de validação.

Tabela 2 – Valores de COE, Sx e EPA para gBS; modelos próprios; Fase de Validação.



## XXII SÍMPOSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

26 de novembro a 01 de dezembro de 2017

Florianópolis- SC

Modelo	COE <sub>x</sub>	S <sub>x</sub> (%)	EPA <sub>x</sub> (%)
2	0,722	99,9	91,6
8	0,727	96,2	87,4

Portanto, por todo o visto em ambas fases de calibração e validação levadas a cabo, se considera que ambos modelos identificados proporcionam de maneira aceitável e satisfatória valores do transporte de fundo g<sub>BS</sub> nos canais estudados.

Ademais, o modelo 8 apresenta características de encouraçamento e blindagem, como o diâmetro de blindagem (D<sub>b</sub>) e a velocidade competente de fundo (v<sub>c</sub>), as quais são características importantíssimas nos canais estudados.

A análise das 19 modelos empíricos da literatura para avaliar por que estas fórmulas não quantificam adequadamente o transporte de fundo, dos quais só se apresentaram resultados de 6 modelos que são os que apresentaram melhores resultados. Conclui-se que as mesmas não tomam em conta a influência do encouraçamento no cálculo da taxa de transporte de fundo, além da incerteza existente na estimativa dos parâmetros hidráulicos presentes nestas fórmulas, dada a complexidade do comportamento do fluxo torrencial.

Consideraram-se inicialmente oito modelos próprias a ser calibradas com o 80 % dos dados de aforos (50 medidas), deixando o restante 20 % para a fase de validação. Os resultados mostram que os modelos 2 (2013) e 8 (2013) apresentaram os valores mais satisfatórios de COE<sub>x</sub>= 0.722 e 0.727, S<sub>x</sub>=99.9 % e 96.2 % e EPA<sub>x</sub>=91.6 % e 87.4 % respectivamente.

Portanto estes dois modelos próprios, chegam a ser os que apresentam os melhores resultados, como os mesmos tomam em conta a influência do encouraçamento presente aos rios estudados por médio de parâmetros específicos conceituados por Meyer-Peter & Müller (1948) e outros adaptados ao presente estudo (Vão Rijn,1984).

### REFERÊNCIAS

JARRETT, (1990). Hydrologic and Hydraulic research in mountain rivers. *Water Resources Bulletin*. pp. 419 – 420.

MAZA A, (1996). *Transporte de Sedimentos U.N.A.M./México*, 74 p.

MEYER-PETER E. AND MULLER, R.(1948). *Formulas for Bed-Load Transport International Association for Bydraulic Research/Stockholm*, 105 p.

VAN RIJN, L.C, (1984). Sediment Transport, Part I: Bed Load Transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 110.