

Vazão de Margens Plenas em Canal Misto Rochoso-Aluvial: Um Teste Preliminar de Equações Empíricas

Adalto Gonçalves Lima

Departamento de Geografia, Universidade Estadual do Centro-Oeste, Guarapuava, PR
PPGGEO, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC
adalto@unicentro.br

Andrey Luis Binda

PPGGEO, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Francisco Beltrão, PR
andrey_geobass@hotmail.com

Resumo

A vazão de margens plenas é importante para a esculturação dos canais mistos rochosos-aluviais. Seu cálculo depende do uso de equações empíricas que geralmente envolvem o conhecimento da resistência ao fluxo. Neste artigo são relatados os resultados preliminares de um teste comparativo do desempenho de dois métodos indiretos de obtenção da vazão, via obtenção da rugosidade n de Manning, e um método direto, sem a necessidade de obtenção da rugosidade. Em um dos métodos indiretos n é obtido por tabelas (Cowan, 1956), enquanto em outro é utilizada equação empírica baseada em parâmetros hidráulicos (Jarrett, 1984). O método direto faz uso de equação baseada em parâmetros geométricos e hidráulicos das seções transversais (Dingman e Sharma, 1997). Foram levantadas seis seções transversais ao longo de um rio de leito misto instalado sobre basaltos. Os resultados apontam igualdade no desempenho dos métodos indiretos para obtenção de n , mas a subjetividade no uso de valores tabelados torna mais recomendável o uso de equação, uma vez que pequenas diferenças de n podem ser significativas no cálculo da vazão. O uso do modelo de Jarrett (1984) tende a fornecer vazões menores que o método de Cowan (1956) e que o modelo de Dingman e Sharma (1994). As diferenças Jarrett-Dingman e Sharma não são significativas, mas acompanham inversamente a diminuição do raio hidráulico. Como o modelo de Jarrett (1984) é mais sensível aos valores do raio hidráulico, o modelo de Dingman e Sharma (1994) aparenta ser mais consistente.

Palavras-chave: vazão de margens plenas; canal misto; coeficiente de rugosidade; equações empíricas.

Abstract

The bankfull discharge is important for the channel forming into mixed bedrock-alluvial rivers. Its calculation depends on the use of empiric equations that usually involve the knowledge of the flow resistance. In this paper are presented some preliminaries results of a comparative test of two indirect methods of discharge calculation, through Manning roughness coefficient (n), and a direct method, without n calculation. In one of the indirect methods n is obtained by tables (Cowan, 1956), while in another, empiric equation is used, based on hydraulic parameters (Jarrett, 1984). The direct method uses equation based on geometric and hydraulic parameters of cross sections (Dingman and Sharma, 1997). Six cross sections along a river of mixed bed installed on basalts were examined. The results point equality in the performance of the indirect methods, but the subjectivity in the use of tables turns more advisable the equation use, considering small differences of n can be significant in the discharge calculation. Jarrett's (1984) model tends to supply smaller discharges than the Cowan (1956) and Dingman and Sharma (1994) methods. The Jarrett-Dingman and Sharma differences are not significant, but they accompany the decrease of the hydraulic radius inversely. As the Jarrett's (1984) model is more sensitive to the values of hydraulic radius, the Dingman and Sharma's (1994) model seems to be more consistent.

Key-words: bankfull discharge; mixed bedrock-alluvial channel; roughness coefficient; empirical equations.

Introdução

A vazão de margens plenas é considerada como a responsável pela esculturação dos canais aluviais (Leopold et al., 1964). Para os canais rochosos ou mistos (rochoso-aluvial) há certa tendência em se considerar as vazões infreqüentes e de excepcional magnitude como geomorfologicamente mais efetivas (e.g. Baker e Kale, 1998). Outros estudos, porém, enfatizam a noção da complementaridade entre uma grande gama de vazões na efetividade do trabalho fluvial em sistemas mistos (e.g. Hartshorn et al, 2002; Lague et al., 2005). Isso recoloca a importância da vazão de margens plenas para a erosão em canais mistos.

Os canais mistos são ambientes geomorfológicos diferentes dos ambientes de canais aluviais. Freqüentes exposições do leito rochoso aparecem entremeadas com trechos recobertos por uma fina capa aluvial. Geralmente possuem alta declividade e são dominantes os processos de incisão diretamente no substrato rochoso (Tinkler e Wohl, 1998). A hidráulica dos rios com canais mistos é, por conseguinte, mais complexa (Richardson e Carling, 2006). Condicionado pelas grandes declividades e pela grande rugosidade imposta pela carga de sedimentos na qual predominam granulometrias como cascalhos e matacões, o fluxo é turbulento. Em tais condições, o cálculo de vazões pode enfrentar grandes dificuldades e ocasionar imprecisões significativas, da ordem de 30% (Bathurst, 2002).

Muitos rios do Planalto Basáltico Paranaense possuem ambientes mistos. O comportamento geomorfológico desses rios é ainda pouco conhecido e as conexões processuais com os fluxos de cheia é um caminho a ser investigado nesse sentido. Considerando a falta de informação sobre a vazão de margens plenas e as impossibilidades de obtenção direta dessas vazões, faz-se necessário o uso de equações empíricas. Porém, equações diferentes geram resultados diferentes. O presente artigo relata os resultados iniciais de um teste comparativo de algumas dessas equações, aplicadas em um pequeno rio de leito misto desenvolvido sobre basaltos.

1. Área de estudo

O Rio Guabiroba (Figura 1) foi escolhido para esta análise, sendo que ao seu longo foram verificadas seis seções transversais (Tabela 1). Esse rio possui muitas características comuns dos rios do Planalto Basáltico Paranaense. A principal dessas características é o leito misto. Trechos rochosos entremeiam-se a trechos com fina e transiente cobertura aluvial, cuja granulometria varia de areia grossa a matacões.

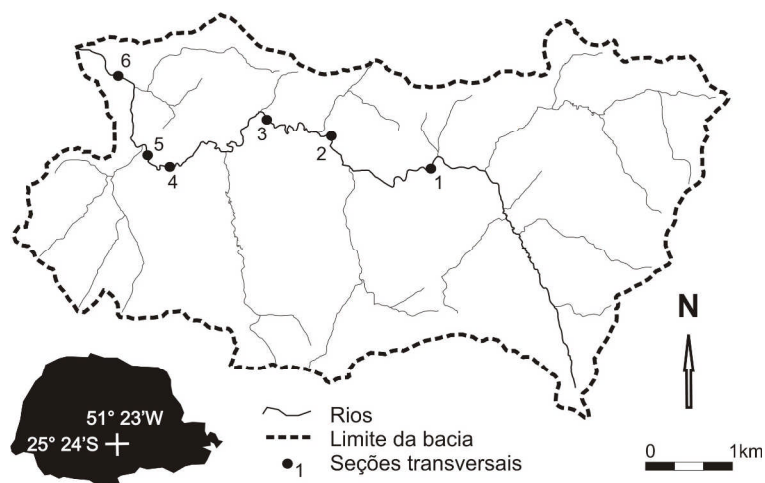


Figura 1. Localização da área de estudo e das seções analisadas.

Tabela 1. Características geométricas das seções transversais analisadas.

Geometria	Seções					
	1	2	3	4	5	6
w (m)	9,78	4,90	7,80	9,13	13,30	8,70
D (m)	0,92	1,24	0,36	1,13	1,59	1,41
S (m/m)	0,01548	0,00337	0,00623	0,01134	0,00751	0,01269
A (m ²)	7,938	6,415	2,964	10,565	9,530	12,678
P	16,78	15,90	15,90	19,83	17,20	19,80
R	0,473	0,403	0,186	0,533	0,554	0,640

w = largura; D = profundidade média; S = declividade do trecho; A = área; P = perímetro molhado; R = raio hidráulico.

Localizado no município de Guarapuava, centro-sul do Estado do Paraná, o Rio Guabirola possui extensão de 11,5 km e área de drenagem de aproximadamente 23 km². Flui para oeste no reverso da escarpa arenito-basáltica, localmente denominada de Serra da Esperança (Escarpa da Serra Geral). O rio faz parte da bacia do Rio Jordão, que por sua vez é um dos integrantes principais da grande bacia do Rio Iguçu.

A bacia do Rio Guabirola é esculpida em basaltos toleíticos da unidade básica inferior da Formação Serra Geral. A rede de canais apresenta uma notável assimetria, com os maiores canais situando-se no lado esquerdo. Tal assimetria é indicativa de basculamento tectônico de blocos para NNW. O canal principal flui axialmente no reverso dos blocos basculados e isso condiciona, em parte, a formação de trechos aluviais no seu curso médio.

A precipitação anual média na região é em torno de 1200 mm, sem registro de uma estação seca definida. As médias mensais estão acima de 100 mm, com os meses mais

chuvosos sendo outubro e janeiro e os menos chuvosos, julho e agosto (Thomaz e Vestena, 2003).

2. Metodologia

Comumente, o primeiro requisito para cálculo da vazão é a área da seção transversal do canal. Foram selecionadas seis seções ao longo do Rio Guabiroba (Figura 1 e Tabela 1), nas quais se executou o levantamento da geometria ao nível de margens plenas. O segundo requisito para cálculo da vazão é a velocidade média do fluxo. Para cálculo indireto da velocidade (v) optou-se pela equação de Manning:

$$v = \frac{1}{n} R^{0,67} S^{0,5} \quad (1)$$

onde n é o coeficiente de rugosidade, R é o raio hidráulico e S é o gradiente de energia. O gradiente de energia foi substituído pela declividade do canal medida em carta topográfica na escala 1: 10.000.

Em cada seção aplicou-se o método de Cowan (1956) para levantamento do coeficiente de rugosidade:

$$n = (n_b + n_1 + n_2 + n_3 + n_4)m \quad (2)$$

Neste método as características do canal em cada seção são classificadas conforme valores de n previamente tabelados, onde: n_b é o valor base, n_1 refere-se à irregularidade da superfície, n_2 refere-se às variações na forma e tamanho das seções transversais, n_3 relaciona-se ao efeito de obstruções, n_4 avalia as condições de fluxo e vegetação e m é o fator de correção para meandramento do canal.

Embora o método de Cowan (1956) crie um bom ordenamento da análise da rugosidade em campo, a multiplicidade de situações que podem ser encontradas torna o levantamento subjetivo. Jarrett (1984), tendo em conta as dificuldades inerentes à obtenção do coeficiente de rugosidade em rios de alto gradiente (entre 0,002 e 0,052), desenvolveu uma equação para cálculo de n baseada apenas em parâmetros hidráulicos:

$$n = R^{-0,16} S^{0,38} \quad (3)$$

Esta equação foi utilizada como alternativa de cálculo de n para as seções do Rio Guabiroba, fazendo as substituições de S tal como na equação (1).

Dingman e Sharma (1997) propuseram outra equação de cálculo da vazão:

$$Q = 1,564A^{1,173} R^{0,4} S^{-0,0543\log S} \quad (4)$$

onde Q é a vazão e A é a área da seção transversal. A aplicabilidade desta equação seria para canais com uma ampla gama de áreas de seção transversal ($0,41 \text{ m}^2 \cdot A \cdot 8520 \text{ m}^2$) e declives ($0,00001 \cdot S \cdot 0,0418$). Sendo assim, essa equação também foi utilizada para verificar a vazão de margens plenas nas seções do Rio Guabiroba.

Para comparar os valores de vazão calculados pelos três métodos e para comparar as variações de diferença entre as seções, efetuou-se uma normalização dos valores, que estão sendo denominados aqui de *índice normalizado de vazão*. O procedimento envolveu, em cada seção, a divisão dos valores de vazão (num total de três) pela mediana do conjunto. Em determinada seção o valor mediano de vazão dividido por ele mesmo resulta no índice normalizado igual a 1,0.

3. Resultados e Discussão

A equação de Manning (Equação 1) tem sido amplamente utilizada para calcular, de modo indireto, a velocidade do fluxo. A maior dificuldade encontrada no uso dessa equação está na obtenção do coeficiente de rugosidade (n). A forma mais ordenada para se obter o coeficiente é atribuir valores previamente tabelados para vários aspectos do canal que influenciam a resistência ao fluxo, como é feito no método de Cowan (1956). Por outro lado, evitando a subjetividade inerente aos métodos comparativos, a obtenção da rugosidade com base em parâmetros hidráulicos mensuráveis em campo mostra-se como uma alternativa atraente. Entretanto, nesse caso a imprecisão está relacionada ao grau de eficiência da equação utilizada.

Nas seis seções do Rio Guabiroba os valores de rugosidade não diferem apreciavelmente quando comparados os dois métodos (Tabela 2). No entanto, pela equação de Jarrett a resistência tende a ser maior que a estimada por Cowan. Apenas nas seções 4 e 6 há um comportamento inverso, sendo que na seção 6 a diferença não é significativa.

Tabela 2. Coeficientes de rugosidade calculados conforme dois métodos.

Seção	Coeficiente de Rugosidade (n)	
	Cowan	Jarrett
1	0,055	0,074
2	0,040	0,043
3	0,050	0,061
4	0,083	0,065
5	0,040	0,055
6	0,070	0,065

Aparentemente a subjetividade ao utilizar o método de Cowan (1956) é contrabalançada pela variação estatística inerente à equação de Jarrett (1984), embora o número de seções analisadas seja pequeno para uma afirmação mais contundente. As pequenas diferenças indicam que, no caso das seções estudadas, um método não é preferível em detrimento de outro. Entretanto, considerando as diferentes percepções de campo de pesquisador para pesquisador, em função do grau de experiência, e considerando o igual desempenho dos métodos, o uso da equação de Jarrett (1984) seria mais recomendável. É necessário enfatizar que essa preferência surge da análise de seções pertencentes a um canal misto rochoso-aluvial. Em rios predominantemente aluviais e de baixo gradiente ($< 0,002$) a equação de Jarrett (1984) não se aplicaria.

Nas seções analisadas, há uma tendência da vazão ser menor quando utilizada a equação de Jarrett (1984). Apesar das pequenas diferenças inter-método do coeficiente de rugosidade, as vazões podem apresentar diferenças mais significativas (Tabela 3 e Figura 2), dependendo das características geométricas das seções. A maior diferença de rugosidade está na seção 1, enquanto a maior diferença de vazão está na seção 5. Em contrapartida, a menor diferença de rugosidade está na seção 2, enquanto que a menor diferença de vazão está na seção 6. A razão disso é que a velocidade do fluxo, por meio da equação de Manning (Equação 1), é sensível ao tipo de combinação entre os valores do raio hidráulico, da declividade e da rugosidade.

Comparando as vazões calculadas via Cowan (1956) e Dingman & Sharma (1994), não se nota tendência de um método fornecer valores maiores que outro. Por outro lado, há uma tendência aparente do modelo de Dingman e Sharma fornecer vazões mais altas que o modelo de Jarrett. Contudo, as diferenças Jarrett-Dingman e Sharma não são muito significativas. Apenas na seção 3 a diferença é mais expressiva, devido à menor dimensão do raio hidráulico. Aliás, a magnitude das diferenças Jarrett-Dingman e Sharma acompanham inversamente a diminuição do raio hidráulico.

Como o método comparativo de Cowan (1956) é mais sujeito às subjetividades, os métodos analíticos de Jarrett (1984) e Dingman e Sharma (1994) seriam os mais recomendados para o caso do Rio Guabirola. E, sendo pequena a diferença nos resultados entre esses dois métodos, não haveria preferência por um ou outro. A única questão a ser considerada é quanto à dimensão do raio hidráulico.

Tabela 3. Índice de vazão normalizada *.

Seção	Método		
	Manning		Dingman & Sharma
	Cowan	Jarrett	
1	1,270	0,926	1
2	1,063	1	0,938
3	1	0,822	1,020
4	0,777	1	1,050
5	1,370	1	0,973
6	0,934	1	1,012

* Vazão calculada em cada método dividida pela mediana dos três métodos.

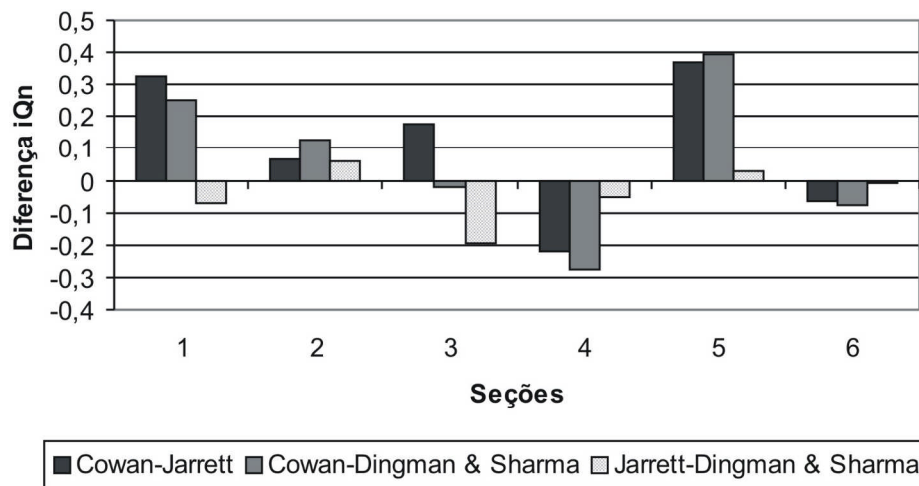


Figura 2. Diferenças dos índices de vazão normalizada (IQn) calculados por três métodos, em seis seções transversais do Rio Guabiroba.

Marcus et al. (1992) observaram que o modelo de Jarrett (1984) superestima a resistência ao fluxo em pequenos rios de montanha (raio hidráulico < 0,25 m), o que implica em valores de vazão menores que o real. Quanto menor o raio hidráulico maior é a interferência das características do leito sobre o fluxo e sobre o desempenho dos modelos em prever a vazão. No caso do Rio Guabiroba as vazões calculadas são de margens plenas e, conseqüentemente, o raio hidráulico é grande o suficiente para submergir plenamente os maiores clastos transportados, exceto na seção 3. Provavelmente, nessas condições o modelo de Jarrett melhora seu desempenho, embora a eventual presença de vegetação e outras obstruções nas margens possa aumentar a resistência. O modelo de Dingman e Sharma (1994) é menos sensível ao raio hidráulico que o modelo de Jarrett (1984). Neste sentido, a tendência

de aumento da diferença Jarrett-Dingman e Sharma seria resultado mais da variação em Jarrett. Isso tornaria o modelo de Dingman e Sharma mais consistente.

4. Conclusões

O uso da metodologia de Cowan (1956) para o cálculo da resistência de um canal ao fluxo (rugosidade) apresenta grau elevado de subjetividade. Nos casos das seções analisadas o método de Cowan (1956) teve o mesmo desempenho que a equação de Jarrett (1984). Porém, dado a subjetividade do método comparativo é recomendável o uso do método analítico, pois pequenas diferenças na rugosidade (n) podem resultar em grandes diferenças no cálculo da vazão.

O uso do modelo de Jarrett (1984) tende a fornecer vazões menores que o método de Cowan (1956) e que o modelo de Dingman e Sharma (1994). As diferenças Jarrett-Dingman e Sharma não são muito significativas e acompanham inversamente a diminuição do raio hidráulico. Como o modelo de Jarrett (1984) é mais sensível aos valores do raio hidráulico, o modelo de Dingman e Sharma (1994) aparenta ser mais consistente.

Os resultados aqui apresentados devem ser observados com cautela, pois são preliminares e baseados em poucas seções. Mais seções deverão ser analisadas para verificar se as tendências observadas permanecem.

4. Referências

Baker, V. R.; Kale, V.S. (1998) The role of extreme floods in shaping bedrock channels. In: Tinkler, K. J.; Wohl, E.E. *Rivers over rock: fluvial processes in bedrock channels*. p.1-18. American Geophysical Union: Washington, DC.

Bathurst, J.C. (2002) At-a-site variation and minimum flow resistance for mountain rivers. *J. Hydrology*, 269: 11-26.

Cowan, W.L. (1956) Estimating hydraulic roughness coefficients. *Agricultural Engineering*, 37 (7): 473-475.

Dingman, S.L.; Sharma, K.P. (1997) Statistical development and validation of discharge equations for natural channels. *J. Hydrology*, 199 (1-2):13-35.

Hartshorn, K.; Hovius, N.; Dade, W.B.; Slingerland, R.L. (2002) Climate-driven bedrock incision in an active mountain belt. *Science*, 297: 2036-2038.

Jarrett, R.D. (1984) Hydraulics of high-gradient streams. *J. Hydraulic Engineering*, 110 (11): 1519-1539.

Lague, D.; Hovius, N.; Davy, P. (2005) Discharge, discharge variability, and the bedrock channel profile. *J. Geophys. Res.*, 110, F04006, doi:10.1029/2004JF000259.

Leopold, L.B.; Wolman, M.G.; Miller, J.P. (1964) *Fluvial processes in geomorphology*. San Francisco: Freeman.

Marcus, W.A.; Roberts, K.; Harvey, L.; Tackman, G. (1992) An evaluation of methods for estimating Manning's n in small mountain streams. *Mountain Research Development*, 12 (3): 227-239.

Richardson, K.; Carling, P.A. (2006) The hydraulics of a straight bedrock channel: Insights from solute dispersion studies. *Geomorphology*, 82: 98-125.

Thomaz, E.L.; Vestena, L.R. (2003) *Aspectos climáticos de Guarapuava – PR*. Guarapuava: Unicentro,

Tinkler, K. J.; Wohl, E.E. (1998) A primer on bedrock channels. In: Tinkler, K. J.; Wohl, E.E. *Rivers over rock: fluvial processes in bedrock channels*. p.1-18. American Geophysical Union: Washington, DC.