

Geometria hidráulica de seções transversais do rio dos Bugres

Fernando Grison

Universidade Federal da Fronteira Sul – UFFS/Campus Chapecó - fernando.grison@uff.edu.br

Aline de Almeida Mota

Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS/Instituto de Pesquisas Hidráulicas - aline.mota@ufrgs.br

Masato Kobiyama

Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS/Instituto de Pesquisas Hidráulicas - masato.kobiyama@ufrgs.br

Recebido: 17/02/14 - revisado: 17/03/14 - aceito: 07/05/14

RESUMO

O presente trabalho teve por objetivo aplicar a teoria da geometria hidráulica no rio dos Bugres, localizado no norte do estado de Santa Catarina. Após um reconhecimento em campo da área da bacia foram determinados 11 pontos de estudo ao longo do rio dos Bugres. Nesses pontos foram instaladas estações fluviométricas para a realização do estudo. Medidas de vazão e de topobatimetria foram realizadas para a construção das relações matemáticas da geometria hidráulica. Também foi identificado o nível de margens plenas das seções transversais de estudo. A análise das relações matemáticas da geometria hidráulica encontradas mostrou que a variável largura é a menos sensível à mudança de vazão, e que há uma tendência da profundidade média e a velocidade sofrerem maior variação do que a largura com o aumento da vazão. Pela análise dos expoentes da geometria hidráulica no diagrama triaxial de Rhodes constatou-se que, de um modo geral, uma tendência, com o aumento de vazões, nas seções transversais, do leito ser mais erodido do que as margens. Isso implica que as margens das seções, utilizadas para essa análise, são estáveis.

Palavras Chave: Geometria hidráulica. Seção transversal. Rio dos Bugres.

INTRODUÇÃO

Os processos de vazão sólida e líquida que ocorrem em uma bacia hidrográfica são resultantes da interação entre os mecanismos da hidrologia, geologia e fisiografia da bacia que promovem um equilíbrio entre esses processos. Indicadores desse equilíbrio podem ser as formas das seções transversais dos rios as quais são função da vazão sólida e líquida transportada e também da característica do material componente de suas margens e leito (LEOPOLD, 1994). Além disso, as formas das seções transversais são influenciadas pela zona ripária, importante na estabilização das margens dos rios (KOBBIYAMA, 2003).

Nesse sentido, estudos sobre a variação das seções transversais de rios naturais são importantes, pois podem contribuir com sua preservação ambiental, dando suporte a projetos de renaturalização e revitalização de cursos de água. A compreensão da estabilidade natural de um rio é necessária para garantir sua preservação e manter suas funções (ROSGEN, 1996).

A teoria da geometria hidráulica introduzida por Leopold e Maddock (1953) pode ser considerada uma ferramenta essencial para o entendimento das mudanças que ocorrem na forma de uma seção transversal de um canal natural. Eles a definiram como uma medida da largura, profundidade, velocidade e carga sedimentar de um curso d'água natural, que descreve a maneira pela qual as propriedades do canal fluvial mudam com a vazão líquida. Segundo Rhodes (1977), apesar dessa teoria tratar mais especificamente com os parâmetros largura, profundidade e

velocidade, muitos outros fatores morfológicos e dinâmicos são considerados implicitamente, porque influenciam a continuidade desses três elementos. Assim, as equações matemáticas da geometria hidráulica (Equações 1, 2 e 3) resumem de maneira simplificada as complicadas relações entre características do canal e o fluxo.

Muitos estudos já foram e continuam sendo realizados com a aplicação da teoria da geometria hidráulica. Como por exemplo, nos EUA (LEOPOLD; MADDOCK, 1953; WOHL, 2005), na Austrália (DE ROSE et al., 2008) na Nova Zelândia (GRIFFITHS, 1980), entre outros países.

Grison e Kobiyama (2011b), mostraram que apesar dessa teoria já ter sido bastante explorada ainda há muito a ser compreendido. Eles apresentaram uma revisão de diversos tipos de trabalhos sobre geometria hidráulica, em vários rios do mundo. Os principais focos de estudo discutidos nessa revisão foram: (1) análise da geometria hidráulica de seção e/ou em direção à jusante do rio; (2) análise da vazão dominante na geometria hidráulica; (3) geometria hidráulica relacionada ao transporte de sedimentos; (4) comportamento dos expoentes das relações matemáticas da geometria hidráulica; e (5) modelagem matemática na geometria hidráulica.

Aqui no Brasil poucos estudos foram realizados (THORNES, 1970; LATRUBESSE; AQUINO, 1998; AQUINO et al., 2005; FERNANDEZ; BORTOLUZZI, 2008; GRISON et al., 2009). Grison e Kobiyama, (2011a), analisaram a influência de vários tipos de formações geológicas nos expoentes das relações

matemáticas da geometria hidráulica desenvolvidas em rios paranaenses. Portanto, ainda pouco se sabe sobre a geometria hidráulica dos rios brasileiros, especialmente rios de pequeno porte. É importante considerar que os rios brasileiros podem apresentar geometria hidráulica diferentes de outros países, pois, o Brasil possui geologia, pedologia e clima diferente dos países onde se tem mais estudos de geometria hidráulica. Isso justifica mais estudos dos rios brasileiros com essa teoria.

Portanto, o objetivo do presente trabalho foi estudar a geometria hidráulica do rio dos Bugres em várias seções transversais desse rio. O rio dos Bugres está localizado no município de Rio Negrinho/SC e é protegido ambientalmente pela Lei Municipal nº 1093, que criou a APA (área de proteção ambiental) do rio dos Bugres tendo em vista que esse rio é considerado uma futura fonte de abastecimento de água potável para o município. Nesse sentido um estudo sobre geometria hidráulica no rio dos Bugres é importante e, além disso, complementa outros estudos dessa teoria em rios brasileiros.

MATERIAIS E MÉTODOS

Área de estudo

A Bacia Hidrográfica do rio dos Bugres (BHRB) está localizada no norte do estado de Santa Catarina e inserida em sua totalidade no município de Rio Negrinho (Figura 1). A BHRB possui área de 66,41 km².

A Figura 1 demonstra o modelo digital de elevação do terreno (MDT) da BHRB e a altimetria da bacia que varia aproximadamente de 800 a 980 m. Nota-se que a altimetria é bastante variada nas proximidades da cabeceira, e o talvegue principal se mostra bastante encaixado, com exceção do trecho mais próximo do exutório da bacia.

Com relação a aspectos geomorfológicos, a BHRB faz parte da Unidade Geomorfológica Patamar de Mafra. Essa unidade corresponde a uma superfície regular, quase plana. No conjunto é individualizado como um patamar intermediário,

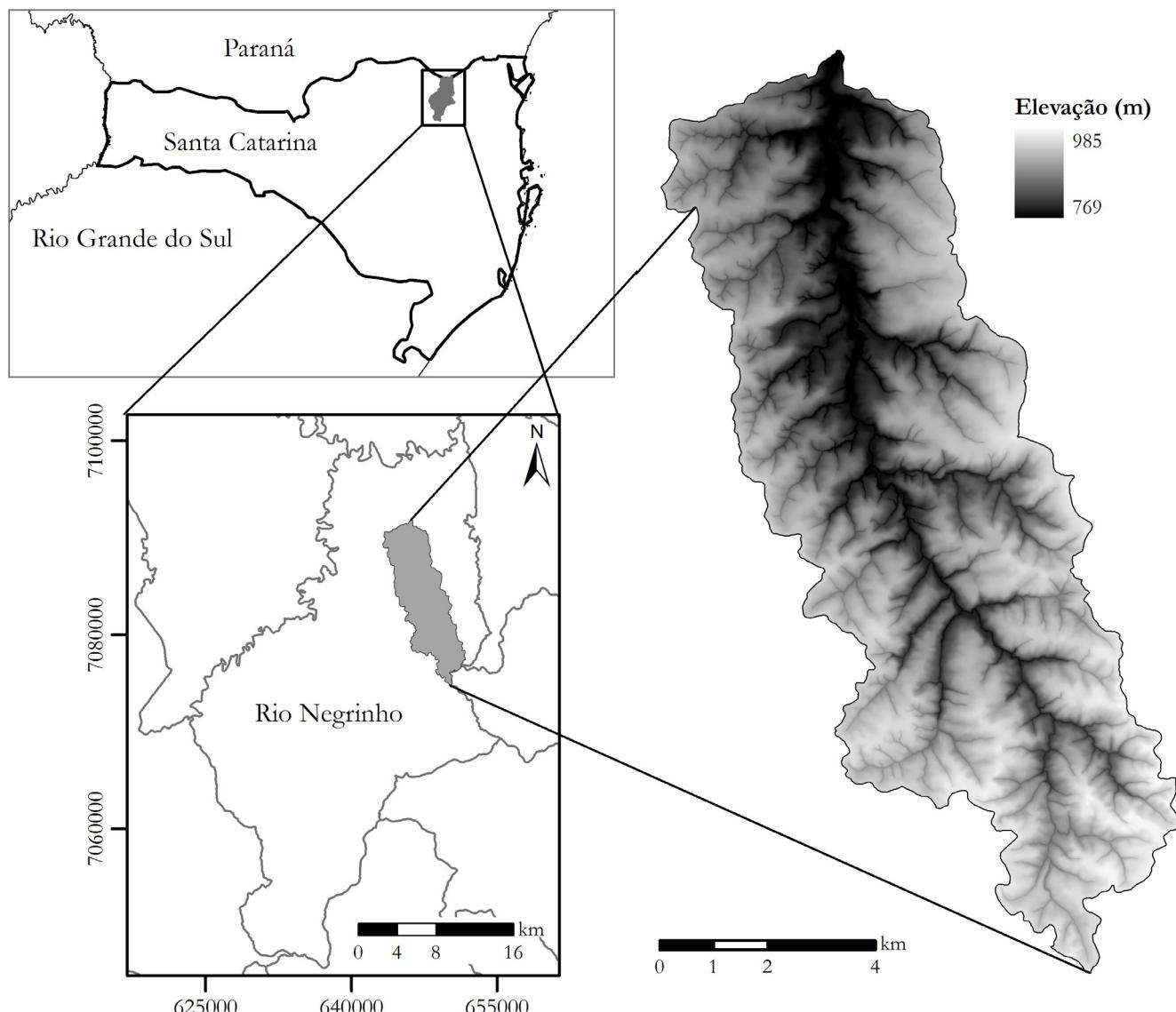


Figura 1 - Localização da bacia do rio dos Bugres

Geometria hidráulica de seções transversais do rio dos Bugres

constituído predominantemente por uma superfície colinosa que resultou de um modelado de dissecação homogênea, ou seja, erosão constante e homogênea ao longo do tempo em praticamente toda a bacia (SANTA CATARINA, 1986). Os solos predominantes da BHRB são Cambissolos.

Quanto ao uso do solo a BHRB é caracterizada em sua maior parte por mata nativa, composta por Floresta Ombrófila Mista. Em seguida, se destaca a atividade de reflorestamento de pinus, atividade bastante explorada na região do município

de Rio Negrinho. A Figura 2 apresenta um mapa de uso do solo da BHRB elaborado a partir de uma imagem de satélite obtida através do sensor Landsat 5 (7 bandas), com data de 19 de novembro de 2010, obtida do site do INPE.

A Tabela 1 mostra as áreas e suas respectivas porcentagens correspondentes aos diferentes usos de solo mostrados na Figura 2.

Determinação dos pontos de estudo

Após um reconhecimento da BHRB em campo foram determinados 11 pontos de estudo (pequenos trechos de canal) ao longo do rio dos Bugres, com base principalmente nos critérios: facilidade de acesso aos locais das seções; proximidades dos principais afluentes; localização em cursos superior, médio e inferior do curso de água; mudança significativa de declividade do canal do rio e segurança quanto a possíveis atos de vandalismo aos aparelhos de monitoramento a serem instalados.

A Figura 3 mostra um mapa da rede de drenagem da BHRB com a localização dos pontos de estudo. Seguindo a classificação de Strahler, por esse mapa da Figura 3, os pontos RB01 e RB02 são classificados como de 5^a ordem e os demais de 4^a ordem.

Tabela 1 - Uso do solo da BHRB

Uso/Manejo do solo	Área (km ²)	%
Água	0,14	0,21
Solo exposto	6,29	9,47
Área urbana	0,67	1,01
Mata nativa	37,93	57,11
Reflorestamento	15,26	22,98
Agricultura	3,96	5,96
Pastagem	2,17	3,26
Total	66,41	100

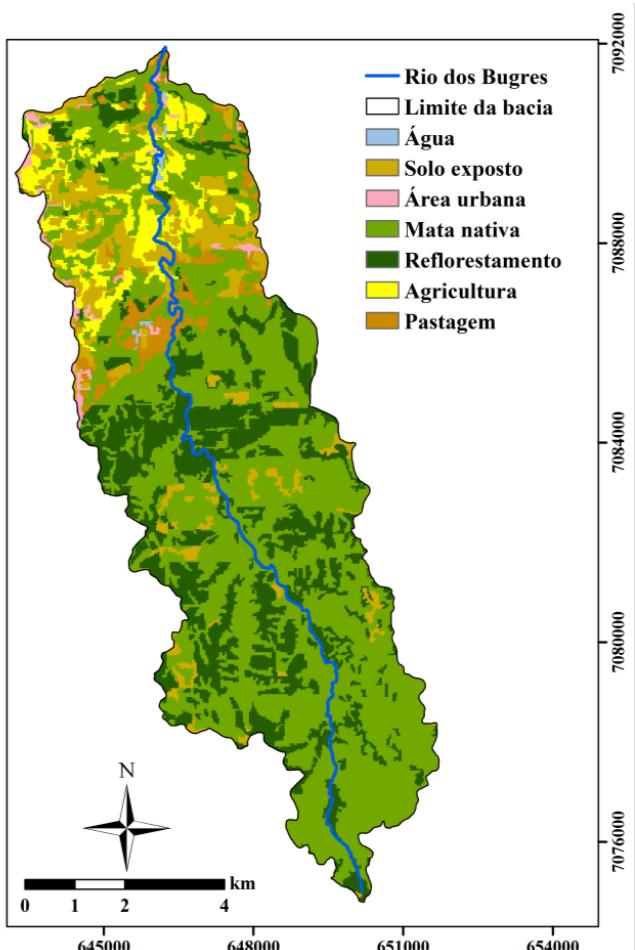


Figura 2 - Mapa de uso do solo da BHRB

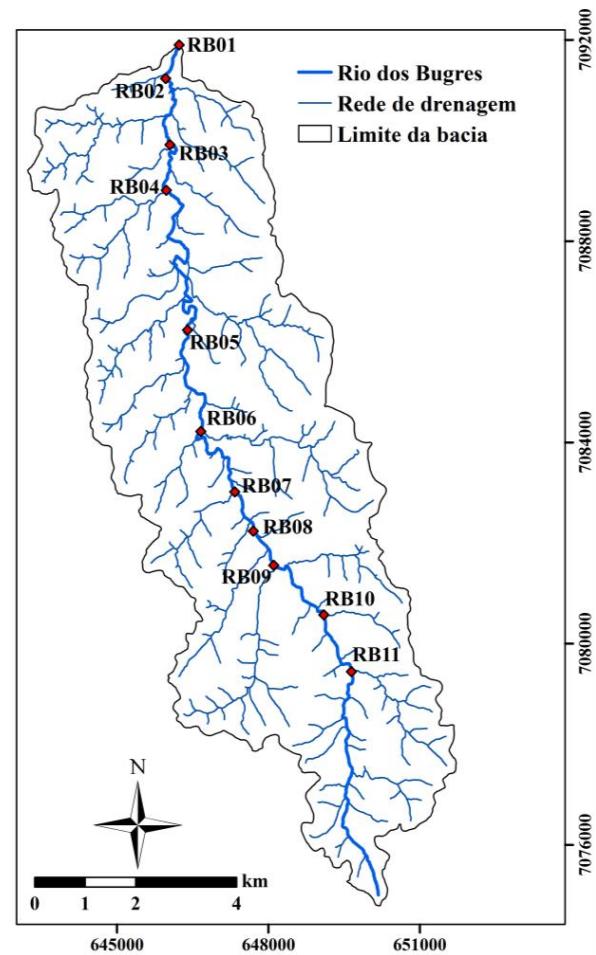


Figura 3 - Mapa da rede de drenagem com a localização dos pontos de estudo na bacia do rio dos Bugres

A Figura 4 apresenta o perfil longitudinal do Rio dos Bugres, com os pontos de estudo (RB01 a RB11).

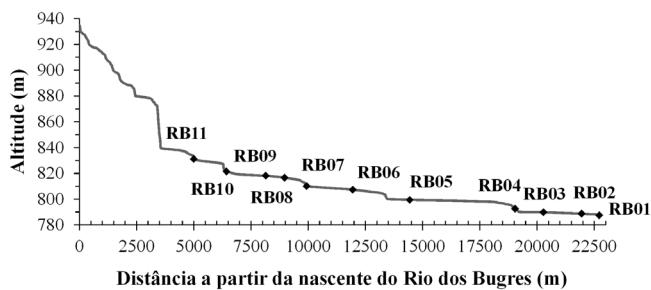


Figura 4 - Perfil longitudinal do rio dos Bugres

Por esse perfil nota-se que existe uma grande variação de altitude no trecho mais à montante. Ao considerar que a variação total de altitude do perfil é de aproximadamente 150 m, em uma distância de aproximadamente 22700 m, a partir da nascente do rio, observa-se que 95 m de altitude variam em apenas 3700 m de distância da nascente do rio. Ou seja, 63,3% da altitude varia em apenas 16,3% de distância.

Em cada um dos pontos de estudo foram instaladas estações fluviométricas. Foram observados locais do trecho do rio próximos a seções de controle. Seguiram-se as orientações de Jaccon e Cudo (1989): o trecho do rio em que se instala uma estação deve permitir a medição de vazão em todos os níveis d'água de uma determinada seção transversal desse trecho; e a estação fluviométrica deve ficar próxima e à montante de controles hidráulicos.

Levantamento topobatimétrico e nível de margens plenas

Foram feitos levantamentos topobatimétrico de todas as seções transversais estudadas. Para isso foi utilizado um nível topográfico.

Juntamente com os levantamentos topobatimétrico, foi identificado o nível de margens plenas de cada seção transversal, que ocorre quando a água preenche completamente o canal do rio (também chamado de nível de *bankfull*). Segundo Rosgen (1996), a definição para nível de margens plenas, universalmente aceita, foi proposta por Dunne e Leopold (1978): “O nível de margens plenas corresponde à vazão na qual a manutenção do canal é mais efetiva, isto é, a vazão em que a movimentação de sedimentos, formação ou remoção de depósitos aluviais, formação ou mudança de curvas e meandros resulta na média das características morfológicas do canal”. A vazão correspondente ao nível de margens plenas também é comumente chamada de vazão dominante.

Para identificação do nível de margens plenas seguiram-se as orientações de Rosgen (1996), que sugeriu observar alguns indicadores como: depósitos de cascalho ou areia nas margens ou dentro do canal; mudanças no tamanho das partículas dos sedimentos, sendo que o material mais fino é geralmente depositado em casos de inundação da planície; coloração das rochas no interior ou adjacente ao canal; exposição de raízes abaixo

de uma camada intacta de solo nas margens, o que indica um processo de erosão pelo fluxo; nível abaixo do qual os líquens, ou certas espécies de vegetação ripária estão ausentes.

Medições e estimativas de vazão

As medições de vazão foram feitas a vau com o aparelho FlowTracker, indicado para medições em níveis d'água de 0,02 a 1,2m. O método para estimar a velocidade média de vertical foi o mesmo geralmente utilizado para molinetes hidrométricos, ou seja, segue o Método Detalhado descrito por Santos et al. (2001).

As estimativas de vazão com dados medidos pelo FlowTracker foram feitas da mesma forma que se faz a estimativa com dados de um molinete, ou seja, pelo método da Meia Seção e pelo método da Seção Média. O método da Meia Seção consiste em calcular vazões parciais de várias subseções. Isso é feito através da multiplicação da velocidade média da vertical pela área do segmento retangular, definido pelo produto da profundidade média pela soma das semi-distâncias às verticais adjacentes (SANTOS et al., 2001). O método da Seção Média consiste em calcular as vazões parciais para as subseções formadas entre as verticais. Considera-se nas extremidades subseções triangulares e as demais trapezoidais. A velocidade é a média aritmética das verticais (SANTOS et al., 2001).

As medições de vazão foram feitas durante campanhas de campo entre o período de 16/12/2011 à 04/10/2012.

Análise de geometria hidráulica

Leopold e Maddock (1953) mostraram que as variáveis hidráulicas largura (ou largura de topo), profundidade média e velocidade correlacionam-se com as grandezas geométricas que definem a forma da seção transversal. Essas variáveis sofrem mudanças com a variação da vazão em uma determinada seção transversal e são representadas matematicamente por simples funções potenciais:

$$w = a \cdot Q^b \quad (1)$$

$$d = c \cdot Q^f \quad (2)$$

$$v = k \cdot Q^m \quad (3)$$

onde Q é a vazão líquida (m^3/s); w é a largura (ou largura de topo) (m); d é a profundidade média (ou profundidade hidráulica) (m); v é a velocidade, determinada pela razão entre vazão líquida e área molhada da seção (m/s); a , c , e k são coeficientes; e b , f , e m são expoentes.

Pela equação da continuidade as Equações 1, 2 e 3 podem ser unidas, e obtém-se:

$$Q = w \cdot d \cdot v \quad (4)$$

$$Q = a \cdot c \cdot k \cdot Q^{b+f+m} \quad (5)$$

então,

$$b + f + m = 1 \quad (6)$$

$$a \cdot c \cdot k = 1 \quad (7)$$

Para a construção das relações da geometria hidráulica os dados de w , d , e v medidos em campo a cada medição de vazão

em determinada seção transversal, foram plotados em função dos respectivos dados de vazão. Posteriormente, foi ajustada uma regressão linear simples para cada relação e estabelecidos os expoentes e coeficientes da geometria hidráulica para cada uma das 11 seções transversais.

Para a determinação das variáveis largura, profundidade média e área molhada, correspondentes a cada nível de água em que foi medido vazão, as seções transversais, levantadas em campo, foram plotadas no software AutoCAD.

Depois de construídas as relações da geometria hidráulica, para as 11 seções, os expoentes b , f e m foram analisados também pelo diagrama triaxial proposto por Rhodes (1977) (Figura 5). Esse diagrama é muito útil na interpretação dos expoentes b , f e m e, consequentemente, no entendimento dos resultados da geometria hidráulica, pois é formado por subdivisões com base somente em considerações hidráulicas e morfológicas. Cada subdivisão está explicada e discutida nos resultados desse trabalho.

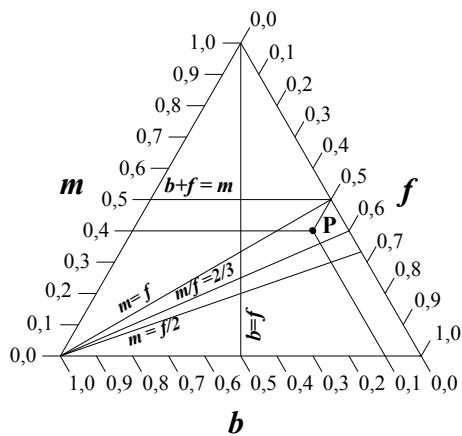


Figura 5 - Diagrama triaxial de Rhodes

Sendo a soma dos expoentes igual a um (Equação 6), o diagrama permite que os três expoentes b , f e m sejam representados em um único ponto (o que facilita a comparação com outros pontos). Por exemplo, o ponto P na Figura 5 representa os valores $b = 0,1$, $f = 0,5$ e $m = 0,4$. Cada ponto é interpretado em termos de comportamento hidráulico e de estabilidade do canal, conforme o campo em que ele se situa no diagrama. Na discussão dos resultados as subdivisões serão explicadas mais detalhadamente.

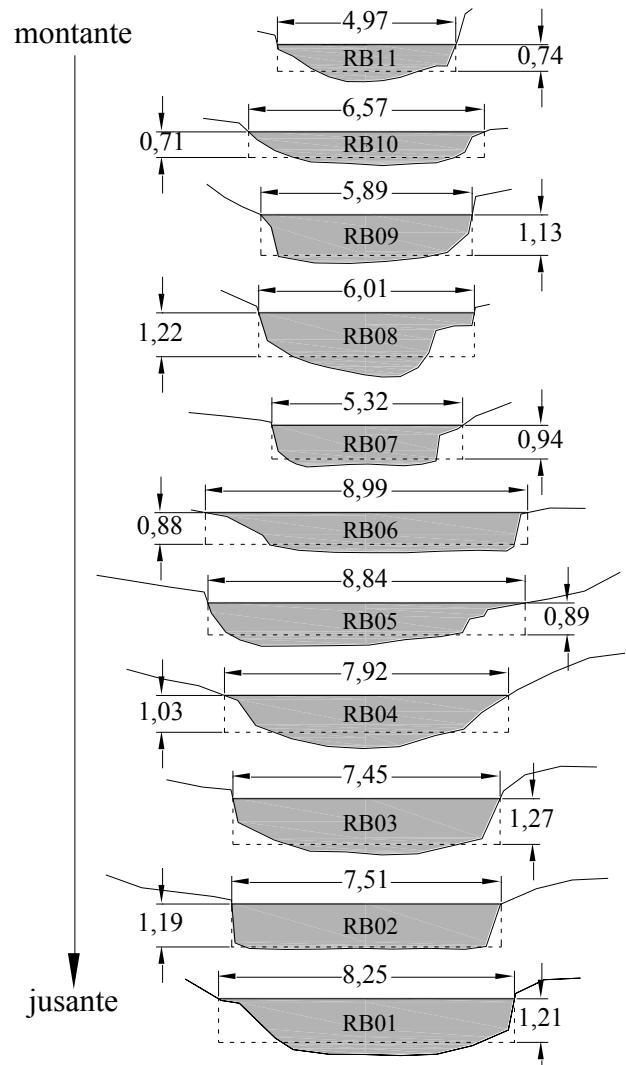
RESULTADOS E DISCUSSÃO

Modificação de seções transversais

Observou-se em campo que, em média, a largura das seções transversais, em nível de margens plenas, ao longo de alguns trechos do rio dos Bugres é pouco diferenciada. A Figura 6 demonstra todas as seções transversais de estudo no nível de margens plenas, com os respectivos valores de w e d . A seção RB10 (a montante) é mais larga que a seção RB09 (a jusante). Da mesma maneira, essa alteração é observada da seção RB08

para RB07, que além de diminuir significativamente a largura, também ficou mais rasa. Após, da seção RB06 até RB03, a largura só diminui em direção à jusante do rio. Portanto, esses processos de alargamento, estreitamento, aumento e diminuição da profundidade média e largura das seções transversais do rio dos Bugres podem ser extremamente controlados pela imposição da vazão em nível de margens plenas. Essa observação da seção RB07 ser mais estreita e rasa, ou seja, ter menor área e perímetro molhado no nível de margens plenas pode ser explicada pelo fato de a vazão no nível de margens plenas em RB07 ser menor que em RB08. Portanto, a vazão dominante, vazão modificadora do canal, é menor em RB07 e maior em RB08.

Também se observa na Figura 6 que, em geral, as seções transversais dos trechos de estudo, ao longo do rio dos Bugres, ficam mais largas e consequentemente rasas ou mais estreitas e consequentemente profundas. Com exceção de RB08 e RB01, que ficam mais largas e profundas e de RB07, que fica mais estreita e rasa.



*Medidas em metros.

Figura 6 - Seções transversais de estudo do rio dos Bugres com seus parâmetros de largura de topo e profundidade média para o nível de margens plenas

Relações da geometria hidráulica para determinadas seções transversais

A Figura 7 mostra as regressões entre largura, profundidade média e velocidade em função da vazão para a seção transversal do ponto RB01. A Tabela 2 apresenta os expoentes e coeficientes das relações matemáticas da geometria hidráulica para todas as seções transversais estudadas no rio dos Bugres, bem como as somas e produtos dos valores encontrados.

Destaca-se que em RB06 foram encontrados o maior valor de f e o menor valor de m . Já em RB08 foram encontrados o menor valor de f e o maior valor de m . O maior e o menor valor para b foram encontrados em RB10 e RB02, respectivamente. A soma dos expoentes e produto dos coeficientes resultaram em valor igual a 1 em todas as seções de estudo no rio dos Bugres. Com exceção no RB06 que a soma resultou 0,99 e o produto 0,98.

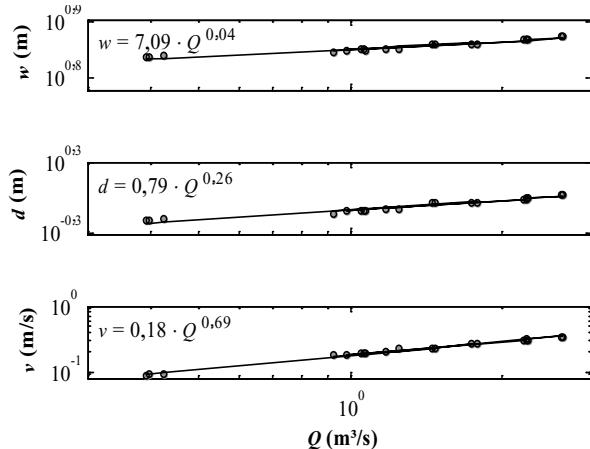


Figura 7 - Relações da geometria hidráulica para a seção transversal RB01 do rio dos Bugres

Para todas as seções estudadas b possui menor valor que f e m . Portanto, a variável largura (w) é a menos sensível à mudança de vazão. Em todas as seções f é muito maior do que b , ou seja, com o aumento da vazão a profundidade média (d) aumenta muito mais rapidamente e em maior proporção do

que w . Então, a razão w/d diminui com o aumento da vazão, o que pode ser explicada pela análise da forma das margens das seções transversais.

Observa-se na Figura 6 que as seções possuem formas que variam entre parabólicas, trapezoidais e retangulares. Quanto mais parabólica, trapezoidal ou retangular for a seção, d varia em maior proporção do que w . Ou então, quanto mais triangular for a seção, mais constante é a razão w/d . Portanto, no rio dos Bugres, devido a esse comportamento das formas das seções transversais, há tendência de d sofrer sempre maior variação do que w com o aumento da vazão.

Nas seções RB03, RB04 e RB10 do rio dos Bugres as relações da geometria hidráulica para w , d e v possuem comportamento semelhante, já que os respectivos expoentes são semelhantes. Isso significa que com o aumento da vazão a largura varia praticamente na mesma magnitude em RB03, RB04 e RB10. Da mesma maneira variam profundidade média e velocidade nesses locais.

Em geral, pela geometria hidráulica das seções transversais do rio dos Bugres estudadas, pode-se dizer que um aumento, por exemplo, de 10% na vazão é acomodado em média por 0,7% de aumento na largura, 4,0% de aumento na profundidade média e 5,3% de aumento na velocidade. Portanto, as variáveis profundidade média e velocidade são mais sensíveis ao aumento da vazão do que a largura.

Grison e Kobiyama (2011a) analisaram a geometria hidráulica em 448 seções de rios no estado do Paraná. Os valores médios encontrados para b , f e m foram 0,08, 0,36 e 0,54, respectivamente. As maiores frequências para b , f e m foram encontradas nos intervalos de 0,0 a 0,1, 0,2 a 0,5 e 0,4 a 0,7 respectivamente. Assim como nesse trabalho, a profundidade média e a velocidade foram mais sensíveis ao aumento da vazão do que a largura.

Entre as bacias analisadas por Grison e Kobiyama (2011a), foi analisada a bacia do rio Iguaçu, que tem como sub-bacia a bacia do rio dos Bugres. Para a bacia do rio Iguaçu, os valores médios de b , f e m encontrados na análise de 175 seções transversais, em vários rios, foram 0,11, 0,36 e 0,53, respectivamente. Portanto, valores muito próximos aos encontrados

Tabela 2 - Valores dos expoentes e coeficientes das relações da geometria hidráulica de seções transversais do rio dos Bugres. Nº medições é o número de medições de vazão realizadas em cada seção e ΔQ é a variação das vazões medidas

Pontos	Nº medições	ΔQ (m³/s)	b	f	m	$b+f+m$	a	c	k	$a \cdot c \cdot k$
RB01	21	0,397 – 2,683	0,04	0,26	0,69	1,00	7,09	0,79	0,18	1,00
RB02	18	0,682 – 3,719	0,02	0,53	0,45	1,00	7,20	0,53	0,26	1,00
RB03	16	0,631 – 2,198	0,10	0,47	0,43	1,00	6,66	0,57	0,26	1,00
RB04	12	0,682 – 2,340	0,11	0,49	0,40	1,00	5,84	0,42	0,40	1,00
RB05	12	0,483 – 3,771	0,05	0,34	0,61	1,00	6,80	0,40	0,37	1,00
RB06	16	0,261 – 3,586	0,06	0,71	0,23	0,99	7,10	0,32	0,44	0,98
RB07	16	0,191 – 3,531	0,07	0,22	0,71	1,00	4,87	0,74	0,28	1,00
RB08	13	0,125 – 1,149	0,03	0,14	0,83	1,00	4,90	0,95	0,22	1,00
RB09	12	0,189 – 3,092	0,06	0,44	0,50	1,00	5,20	0,51	0,38	1,00
RB10	12	0,113 – 2,208	0,12	0,47	0,41	1,00	6,05	0,51	0,32	1,00
RB11	12	0,085 – 0,996	0,10	0,35	0,55	1,00	5,02	0,75	0,27	1,00
		Média.	0,07	0,40	0,53	1,00	6,07	0,59	0,31	1,00
		Desv. Pad.	0,03	0,16	0,17	0,00	0,95	0,19	0,08	0,00
		Coef. Var.	0,47	0,40	0,33	0,00	0,16	0,33	0,27	0,00

no rio dos Bugres (Tabela 2). Com isso, pode-se dizer que as formas das seções transversais no rio dos Bugres tendem a ser semelhantes às dos rios da bacia do rio Iguaçu.

Grison e Kobiyama (2011b), apresentaram uma tabela com valores dos expoentes encontrados em vários trabalhos sobre geometria hidráulica de seções transversais, sendo os valores médios: 0,21, 0,37 e 0,42 para b , f e m respectivamente. Segundo esses autores, entre muitas pesquisas, realizadas para investigar o comportamento dos expoentes $b-f-m$, a maioria procurou buscar alguma explicação para a variação dos valores, por exemplo, buscaram explicações do porque os valores de b não são sempre iguais, ou próximos, independente do rio estudado. Outras pesquisas mostraram alguns cuidados com relação à interpretação dos valores de b , f e m .

Análise do diagrama de Rhodes

A Figura 8 apresenta o diagrama de Rhodes com os pontos referentes aos expoentes das relações da geometria hidráulica para o rio dos Bugres. Os pontos numerados se referem aos valores obtidos nas diferentes seções do rio dos Bugres.

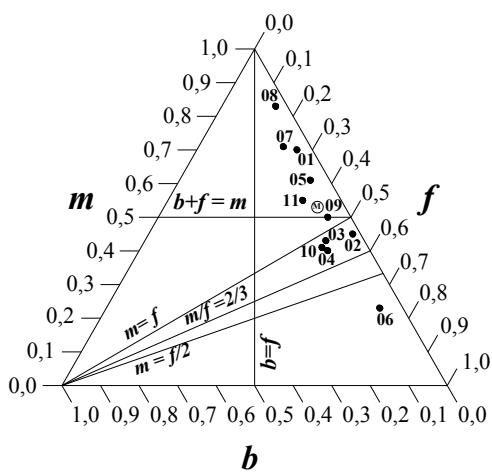


Figura 8 – Diagrama de Rhodes para o rio dos Bugres

Com relação à subdivisão $b=f$, relacionada com mudança na taxa w/d , em todos os pontos do diagrama $b < f$. Portanto, em todos os trechos a taxa w/d diminui com o aumento da vazão. Isso acontece porque as seções de estudo possuem formas que variam entre parabólicas, trapezoidais ou retangulares. Apenas as formas triangulares possuem $b > f$. De um modo geral, como $b < f$ há tendência dos leitos das seções transversais estudadas serem mais facilmente erodidos do que as margens com o aumento da vazão. Isso implica que as margens das seções, utilizadas para essa análise, são mais estáveis.

Com relação à taxa de mudança da relação v/d , relacionada à subdivisão $m=f$, nos trechos RB01, RB05, RB07, RB08, RB09 e RB11 a velocidade aumenta mais rapidamente do que a profundidade média, já que $m/f > 1$ (pontos estão acima dessa subdivisão). Portanto, nesses trechos a capacidade de transporte de sedimentos aumenta com o acréscimo da vazão. Nos demais

trechos, d aumenta mais rapidamente do que v .

No caso da subdivisão $m = f/2$, relacionada com o número de Froude, somente RB06 ficou abaixo, os demais ficaram acima dessa subdivisão. Nos trechos com pontos plotados acima o numero de Froude aumenta com o acréscimo da vazão, e em RB06 o numero de Froude diminui.

A subdivisão $b + f = m$, ou $m = 0,5$, indica nos dois diagramas que a taxa de aumento da velocidade média do fluxo é maior que a taxa da área molhada em RB01, RB05, RB07, RB08 e RB11, pois os respectivos pontos estão acima dessa subdivisão ($m > 0,5$). Como os pontos estão acima de $b + f = m$ e a direita de $b = f$, nesses trechos há tendência de estabilidade do canal do rio.

Para os trechos RB02, RB03, RB04, RB06 e RB10 $m < 0,5$, consequentemente nesses locais a taxa de aumento da velocidade média do fluxo é menor que a taxa da área molhada. Em RB09 o ponto fica plotado quase exatamente sobre a subdivisão $b + f = m$ e, portanto há uma tendência de que a taxa de aumento da velocidade média do fluxo seja igual a taxa de aumento da vazão e da área molhada.

Com relação à subdivisão $m/f = 2/3$, relacionada com a fórmula de Manning, pode-se notar nos diagramas que apenas o trecho RB06 está abaixo dessa subdivisão. Portanto, em geral, no rio dos Bugres, $S^{1/2}/n$, onde S é a declividade e n é a rugosidade, deve aumentar com o acréscimo de vazão. Rhodes (1977) mostrou que a rugosidade é o fator que mais se altera com a mudança de vazão.

Além dos pontos referentes aos trechos de estudo, verifica-se nos diagramas que também foi plotado um ponto referente à média dos expoentes, representado pelo símbolo “ \otimes ” na Figura 6. A média é representativa apenas dos trechos RB01, RB05, RB07, RB08 e RB11, já que também estão localizados à direita da subdivisão $b=f$ e acima da subdivisão $b+f = m$. Nos outros trechos a média não é representativa. Rhodes (1977) alertou que a representatividade de valores médios em seu diagrama é válida somente para pequenas bacias, com pouca dispersão dos expoentes no diagrama. Então, é preciso ter cuidado porque valores médios podem causar falsa impressão das condições do canal.

CONCLUSÕES

A teoria da geometria hidráulica foi aplicada no rio dos Bugres, no município de Rio Negrinho – SC. Foram estabelecidas relações matemáticas da geometria hidráulica para 11 seções transversais ao longo do rio.

A análise do comportamento das formas das seções transversais no rio dos Bugres mostrou que a largura é a menos sensível à mudança de vazão e que há uma tendência da profundidades média e a velocidade sofrerem maior variação do que a largura com o aumento da vazão.

Constatou-se ainda que as formas das seções do rio dos Bugres são em média mais retangulares que parabólicas, pois a d é sempre mais sensível ao aumento da área molhada do que w . Os resultados gerais obtidos pelas análises dos expoentes da geometria hidráulica do rio dos Bugres mostraram que um

aumento, por exemplo, de 10% na vazão é acomodado em média por 0,7% de aumento na largura, 4,0% de aumento na profundidade média e 5,3% de aumento na velocidade.

A comparação com outros valores de expoentes, de outros rios estudados no mundo, mostra que o estudo de geometria hidráulica no rio dos Bugres está coerente com de outros rios já estudados e que a grande variação dos valores dos expoentes ocorreu porque o estudo de geometria hidráulica foi bem detalhado, feito com 11 seções transversais.

A análise dos expoentes da geometria hidráulica do rio dos Bugres plotados no diagrama triaxial mostrou que, de um modo geral, há tendência dos leitos das seções transversais estudadas serem mais facilmente erodidos do que as margens com o aumento da vazão. Isso porque as margens das seções, utilizadas para essa análise, são estáveis.

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de estudo (Edital MCT/CNPq/CT-Hidro nº 22/2009), fundamental na construção desse trabalho.

REFERÊNCIAS

- AQUINO, S.; STEVAUX, J. C.; LATRUBESSE, E. M. Regime hidrológico e aspectos do comportamento morfohidráulico do Rio Araguaia. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 6, n. 2, p. 29-41, 2005.
- DE ROSE, R. C.; STEWARDSON, M. J.; HARMAN, C. Downstream hydraulic geometry of rivers in Victoria, Australia. *Geomorphology*, v. 99, n. 1-4, p. 302-316, July 2008.
- DUNNE, T.; LEOPOLD, L. B. *Water in Environmental Planning*. New York: W. H. Freeman, 1978.
- FERNANDEZ, O. V. Q.; BORTOLUZZI, L. N. Magnitude e frequência das descargas dominantes em rios das regiões oeste e sudoeste do Paraná. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA, 7, 2008, Belo Horizonte-MG. *Anais...* [S.l.: s.n.], 2008.
- FILHO, G. L. T.; VIANA, A. N. C.; CAETANO, G. T.; SANTOS, R. M. O Uso do ADCP em pequenos e médios cursos d'água. In: GRUPO DE TRABAJO SOBRE HIDROMECÂNICA, 5., 1999, Montevidéu, Uruguai. *Reunião...* [S.l.: s.n.] 1999.
- GRIFFITHS, G. Hydraulic geometry of some New Zealand gravel-bed rivers. *Journal of Hydrology*, v. 19, p. 106-18, 1980.
- GRISON, F.; KOBIYAMA, M. Geometria hidráulica em bacias hidrográficas Paranaenses. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 16, n. 2, p. 111-131, 2011a.
- GRISON, F.; KOBIYAMA, M. Teoria e aplicação da geometria hidráulica: revisão. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 12, n. 2, p. 25-38, 2011b.
- GRISON, F.; KOBIYAMA, M.; GIGLIO, J.N.; LARA, P.G. Análise preliminar de geometria hidráulica da bacia hidrográfica do rio Iguaçu. In: XVIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 18., 2009, Campo Grande-MS. *Anais...* Campo Grande: ABRH, 2009.
- HARRELSON, C. C.; RAWLINS, C. L.; POTYONDY, J. P. *Stream channel reference sites: an illustrated guide to field technique*. Gen. Tech. Rep. RM-245. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station, 1994.
- JACCON, G.; CUDO, K. J. *Curva-chave: análise e traçado*. Brasília, DNAEE, 1989.
- KOBIYAMA, M. Conceitos de zona ripária e seus aspectos geobiohidrológicos. In: SEMINÁRIO DE HIDROLOGIA FLORESTAL: ZONAS RIPÁRIAS, I, 2003, Alfredo Wagner. *Anais...* Florianópolis: UFSC/PPGEA, 2003. p. 1-13.
- LATRUBESSE, E. M.; AQUINO, S. Geometria hidráulica em rios da Amazônia Sul-Ocidental. *Revista Geosul*, v. 14, n. 27, p. 610-613, 1998.
- LEOPOLD, L. B. *A View of the River*. Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press, 1994.
- LEOPOLD, L. B.; MADDOCK, T. The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications. Washington: United States Geological Survey, 1953. (Professional paper, n. 252).
- RHODES, D. D. The b-f-m diagram graphical representation and interpretation of at-a-station hydraulic geometry. *American Journal of Science*, v. 277, p. 73-42, Jan. 1977.
- ROSGEN, D. L. *Applied River Morphology*. Pagosa Springs, CO: Wildland Hydrology, 1996.
- SANTA CATARINA. Gabinete de Planejamento e Coordenação Geral, Subchefia de Estatística, Geografia e Informática. In: ATLAS de Santa Catarina. Rio de Janeiro: Aerofoto Cruzeiro, 1986.
- SANTOS, I.; FILL, H. D.; SUGAI, M. R. V.; BUBA, H.; KISHI, R. T.; MARONE, E.; LAUTERT, L. F. C. *Hidrometria Aplicada*. Curitiba: Pr: Lactec, 2001.

THORNES, J. B. The hydraulic geometry of stream channels in the Xingu-Araguaia headwaters. *Geographical Journal*, v. 136, n. 3, p. 366-382, Sept. 1970.

WOHL, E. Downstream hydraulic geometry along a tropical mountain river. In: HARMON, R. S. (Ed.). *The Rio Chagres: a multidisciplinary profile of a tropical watershed*. New York: Kluwer Academic, 2005.

At-a-station hydraulic geometry of Bugres river

ABSTRACT

The present work applied the hydraulic geometry theory to Bugres river, located in the north of the state of Santa Catarina. A field survey was performed along the entire channel of Bugres river in order to establish 11 points of study. Rivergaging stations were installed at these points. Discharge measurement and a topo-bathymetric survey were performed to construct hydraulic geometry relationships. The bankfull level of cross sections studied were also identified. The analysis of the at-a-station hydraulic geometry relationships of Bugres river showed that the width is less sensitive to the change of discharge. Further, there is a tendency for the mean depth and velocity to present a greater variation than the width with increasing discharge. The analysis of hydraulic geometry exponents in the triaxial diagram showed that, in general, there is a tendency for the bed of the studied cross-sections to be more easily eroded than the banks with increasing discharge. This means that the banks of the cross sections used for this analysis are stable.

Keywords: *Hydraulic geometry; Cross-section; Bugres river.*