

Geometria Hidráulica em Bacias Hidrográficas Paranaenses

Fernando Grison, Masato Kobiyama

Laboratório de Hidrologia – ENS/CTC/UFSC

fernando@ens.ufsc.br, kobiyama@ens.ufsc.br

Recebido: 23/10/10 - revisado: 22/03/11 - aceito: 07/04/11

RESUMO

A teoria da geometria hidráulica busca o entendimento das mudanças que ocorrem na forma dos cursos d'água naturais. A fim de contribuir com o gerenciamento dos recursos hídricos do Estado do Paraná o presente trabalho buscou analisar a geometria hidráulica nas principais bacias hidrográficas paranaenses. Para isso, a geometria hidráulica foi analisada em determinadas seções transversais e ao longo de vários rios paranaenses. Para a análise da geometria de seção foram utilizados dados de 448 estações fluviométricas. Observou-se nessa análise que as variáveis profundidade e velocidade são mais sensíveis ao aumento da vazão do que a largura das seções transversais. Com o objetivo de verificar a influência geológica nas relações matemáticas da geometria hidráulica dessas seções os expoentes obtidos foram agrupados por tipo de formação geológica, onde as respectivas seções desses expoentes encontram-se inseridas. Por meio de diagramas triaxiais desses agrupamentos a principal característica identificada foi a alta estabilidade das margens dos canais. Para a análise da geometria na direção de jusante foram consideradas apenas as seções dos rios principais das bacias de estudo. Para isso foi determinada uma vazão com tempo de retorno de 1,58 anos. Destaca-se dessa análise que com o aumento dessa vazão a velocidade de alguns rios variou negativamente ao longo dos seus canais. Também foi encontrada alta correlação dessa vazão com a área de drenagem das bacias e alta correlação das áreas das seções transversais com suas respectivas áreas de drenagem. Assim, foi mostrado que a geometria hidráulica é útil em estudos de regionalização de vazão e no apoio à consistência de dados fluviométricos.

Palavras – chave: Geometria Hidráulica; Bacias Paranaenses; Geologia; Ajuste de Canal; Vazão Dominante.

INTRODUÇÃO

O entendimento dos processos hidrológicos que ocorrem em uma bacia hidrográfica é útil para o desenvolvimento da sociedade. Com base neste entendimento, se pode quantificar e analisar riscos ambientais, instalar empreendimentos, estações de captação e tratamento de água e promover o uso adequado dos recursos naturais.

Os processos de drenagem de uma bacia hidrográfica fazem parte do conjunto dos processos hidrológicos, e por isso o seu entendimento também é importante. Um sistema de drenagem de uma bacia é altamente influenciado por sua forma que é determinada por vários fatores como regime climático e hidrológico, formações geológicas e morfológicas, solos, vegetação, entre outros. Além disso, dentro do sistema de drenagem ocorrem os sistemas fluviais também influenciados por esses fatores. Em um sistema fluvial a forma de uma seção transversal é determinada por outros fatores como o fluxo d'água, quantidade e característica do material sedimentar de suas margens e leito. Segundo Christo-

foletti (1981), o fluxo d'água é o principal agente modificador de um canal de um rio. Assim, a ação exercida por ele sobre os materiais rochosos componentes do leito e das margens dos rios aluviais é a principal responsável pelo equilíbrio entre as forças erosivas e os processos de deposição de material no leito e nas margens.

Uma das ferramentas que visam contribuir para o entendimento das mudanças que ocorrem na forma de um sistema de drenagem e principalmente de um sistema fluvial é a teoria da geometria hidráulica de canais naturais, introduzida por Leopoldo & Maddock (1953). Eles a definiram como uma medida quantitativa das variáveis hidráulicas (largura, profundidade média, velocidade e carga sedimentar) que ajudam a determinar a forma de um curso d'água natural. Essas variáveis sofrem mudanças com a variação da vazão de uma determinada seção transversal de um rio como simples funções potenciais diferidas apenas em seus coeficientes e expoentes.

Basicamente, a geometria hidráulica pode ser estudada de duas formas: em determinada seção transversal (ou estação de medição) e/ou em dire-

ção a jusante do rio (ao longo do curso d'água). Em determinada seção transversal a geometria hidráulica prevê as mudanças na largura, profundidade e velocidade com a variação da vazão, enquanto a geometria hidráulica em direção a jusante prevê a adaptação do tamanho e da forma do canal para uma vazão imposta (Ferguson, 1986).

Entre várias aplicações dos estudos de geometria hidráulica em seções pode-se citar: auxílio no monitoramento da vazão de um rio (por meio da curva-chave), modelagem da recuperação de rios em pontos de poluição (Stout, 1979), estimativa de fluxo mínimo para passagem de peixes e atividades recreacionais como remo (Mosley, 1982) e avaliação de habitat disponível para peixes (Mosley & Jowett, 1985). Com relação às aplicações para estudos de geometria de jusante pode-se citar: projetos de canais de irrigação e canalização de rios, prever respostas do rio para regulação ou transferência de fluxo e estimação de vazões presentes ou passadas das dimensões do canal (Riggs, 1978). Assim, o estudo relacionado à geometria hidráulica exige a medição de vazões e seções do rio ao longo do tempo.

O Estado do Paraná, Brasil, possui um período relativamente longo de medições fluviométricas e em vários locais. Isto facilita o desenvolvimento de novos estudos nas bacias paranaenses. Por isso, os recursos hídricos das bacias hidrográficas do Estado do Paraná vem sendo estudados por vários pesquisadores. Por exemplo, Kobiyama et al. (2009) investigaram os mecanismos fluviais da Bacia Hidrográfica do Rio Iguaçu, particularmente na sub-bacia do Alto Rio Negro, cabeceira da bacia do Iguaçu. Lima et al. (2004) investigaram o comportamento hidrossedimentológico da Bacia Hidrográfica do Rio Piquiri. Fernandez & Bortoluzzi (2008) estimaram e compararam as vazões dominantes em nove estações fluviométricas nas regiões oeste e sudoeste do Estado do Paraná, distribuídas nas bacias dos rios Piquiri e Iguaçu. Gibertoni et al. (2009) estudaram produção hidrossedimentológica da bacia hidrográfica do Rio Nhundiaquara, drenante à Baía de Antonina, litoral do Estado do Paraná. Mesmo assim, os dados obtidos ao longo do tempo no Estado não foram bem explorados em termo de geometria hidráulica.

Portanto, a fim de contribuir com o gerenciamento dos recursos hídricos do Paraná, o presente trabalho buscou analisar a geometria hidráulica nas principais bacias Paranaenses com base principalmente em aspectos geológicos.

Encontra-se uma ampla variedade de formações geológicas no Estado do Paraná. Acredita-se que essa variedade pode influenciar na forma de muitos rios do estado. Em rios onde as margens são

formadas por rochas fracas, por exemplo, como argilitos, folhelhos e arenitos, a erosão pode acontecer mais facilmente do que onde a formação é de quartzitos, uma rocha forte. Canais com leito rochoso podem ser mais resistentes à erosão do que canais com leitos aluviais. Portanto, geologia é um dos fatores que podem influenciar na forma de um curso d'água.

MATERIAIS E MÉTODOS

Área de estudo

A área de estudo desse trabalho envolve nove bacias hidrográficas dentro do Estado do Paraná (Figura 1). Localizado na Região Sul do Brasil, o Estado do Paraná ocupa uma área de aproximadamente 199.314 km².



Figura 1 - Localização das bacias de estudo no Estado do Paraná.

O relevo do território paranaense caracteriza-se pela frequência de terrenos de baixada no litoral, onde predominam as planícies de aluvião, e a existência de planaltos e serras de formações rocho-

Tabela 1 – Caracterização das bacias de estudo

Nome	Área (km ²)	Vazão máxima (m ³ /s)	Litologia
Bacia Hidrográfica do Rio Iguaçu	54.818	37.181	Serra Geral, Itararé, Sedimentos Recentes
Bacia Hidrográfica do Rio Ivai	36.594	7.855	Serra Geral, Depósitos Aluvionares
Bacia Hidrográfica do Rio Tibagi	25.239	6.828	Serra Geral, Depósitos Aluvionares, Furnas, Ponta Grossa.
Bacia Hidrográfica do Rio Piquiri	24.731	6.258	Serra Geral, Caiuá. Depósitos Alúvio-fluviais
Bacia Hidrográfica do Rio Ribeira	9.129	3.115	Atuba Unidade Gnáissica, Capiru Unidade Metapelítica e Unidade Carbonítica, Granito Arrieiros, Quartzo Monzonito São Sebastião, Complexo Três Córregos
Bacia Hidrográfica do Rio das Cinzas	9.658	1.681	Serra Geral, Itararú, Rio do Rasto.
Bacia Hidrográfica do Rio Itararé	5.187	752	Itararú, Furnas
Bacia Hidrográfica Litorânea	5.766	250	Depósito Litorâneos Indiferenciados, Depósitos Aluvionares, Complexo Granulítico SC, Granito Morro Inglês, Serra Negra
Bacia Hidrográfica do Rio Pirapó	5.025	490	Caiuá, Serra Geral

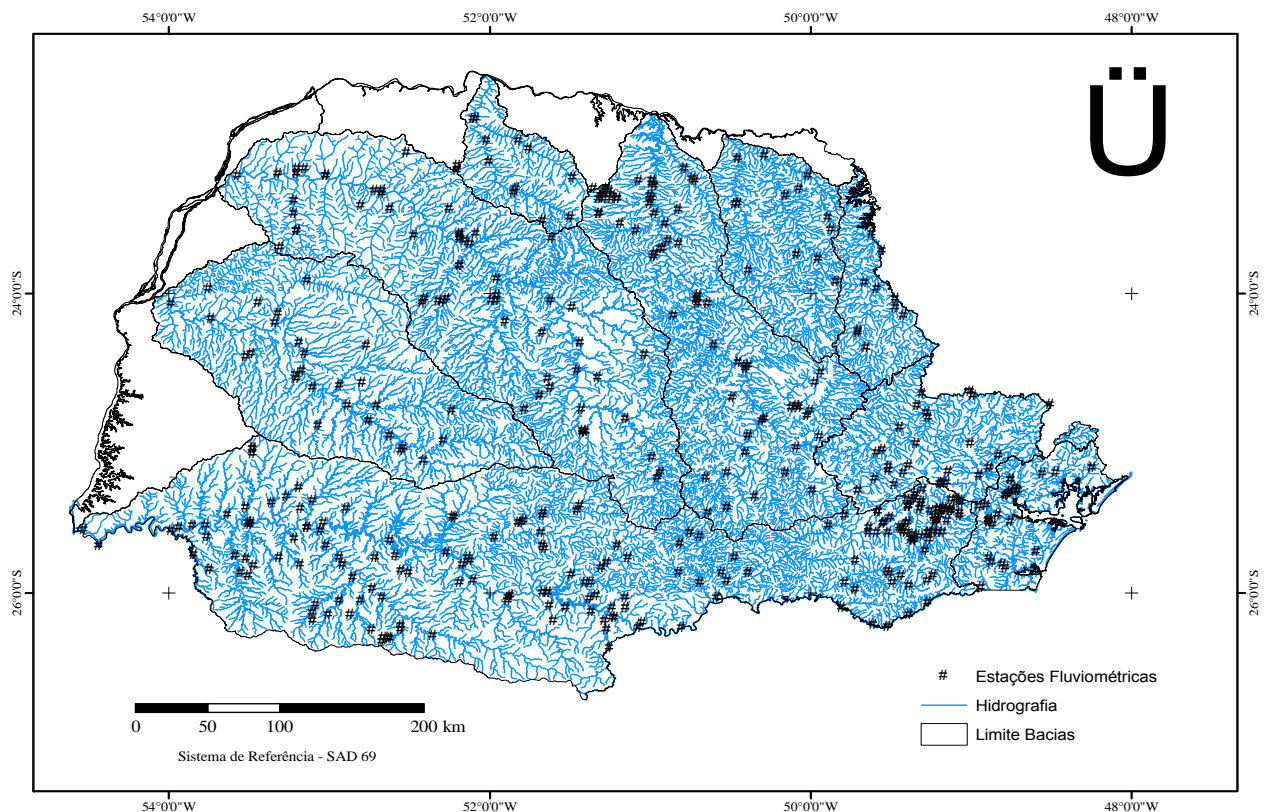


Figura 2 – Localização das estações fluviométricas utilizadas para o estudo de geometria hidráulica

sas cristalinas, como a Serra do Mar. Em direção ao interior, nas regiões central e oeste, o relevo se divide em três tipos de planaltos distintos. O primeiro planalto, onde está localizada a cidade de Curitiba, capital do Estado, apresenta formações de rochas cristalinas; no segundo predominam as rochas sedimentares, folhetos, arenitos e calcários; e no terceiro planalto, onde estão quase 135 mil km² da área total do Estado, encontram-se formações geológicas basálticas que compõem os solos originados de rochas vulcânicas e os solos argilosos de rochas sedimentares.

A Tabela 1 mostra os valores de área, vazão máxima histórica e um resumo das características litológicas de todas as bacias de estudo. Esses valores foram obtidos da série “Bacias Hidrográficas do Paraná – Uma Série Histórica” da Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (SUDERHSA), entidade autárquica vinculada a Secretaria Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (SEMA) do Estado do Paraná.

Banco de dados fluviométricos

Os dados utilizados nesse estudo foram todos obtidos pela SUDERHSA. Foram selecionadas todas as estações fluviométricas de nove bacias do Estado do Paraná, que estão sob os cuidados operacionais da SUDERHSA. Para cada estação foram obtidos bancos de dados de curva-chave, medições de vazão, seções transversais e série histórica de cotas. A Figura 2 mostra um mapa de localização de todas as estações utilizadas. Além das estações da Figura 2 também foram consideradas duas estações da SUDERHSA que estão localizadas no Estado de Santa Catarina. Devido às falhas encontradas no banco de dados não foi possível utilizar todas as estações disponibilizadas pela SUDERHSA.

Geologia

As bacias de estudo possuem ampla variedade de formações geológicas. Com base em Bizzi et al. (2003) e num mapa geológico, elaborado pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM) foram identificados 143 tipos de formações geológicas entre as nove bacias. As maiores variações geológicas ocorrem nas porções média e superior das bacias estudadas. Com o mapa geológico foi feita a identificação do tipo de formação geológica em que se encontra inserida cada estação fluviométrica considerada para o estudo. Entre as várias formações geológicas algumas foram descartadas devido a pouca ou

nenhuma estação localizada nessas formações. Assim, foram selecionados 22 tipos de formação geológica. A Figura 3 mostra um mapa das formações geológicas consideradas e a Tabela 2 mostra os tipos de rocha e classe dessas formações.

Geometria hidráulica

Em uma determinada seção transversal

A geometria hidráulica em uma seção transversal (ou geometria de seção) mostra que com o aumento da vazão na seção ocorre um aumento de mesma taxa na profundidade e na velocidade do fluxo. Também, o aumento da vazão provoca um leve aumento na largura da seção, uma pequena diminuição da rugosidade hidráulica e alguma mudança na declividade superficial da água. Entretanto, a maior mudança que ocorre com o aumento da vazão é na carga de sedimentos em suspensão que aumenta rapidamente e em maior proporção que qualquer outra variável (Leopold & Maddock, 1953). Para a geometria de seção as variações ocorrem devido as configurações de um determinado local do canal do rio e devido ao modo em que fluxo d’água atravessa a seção (Gordon et al., 1992).

As principais variáveis da geometria hidráulica de seções são representadas como:

$$w = aQ^b \tag{1}$$

$$d = cQ^f \tag{2}$$

$$v = kQ^m \tag{3}$$

$$L = pQ^j \tag{4}$$

$$s = rQ^z \tag{5}$$

onde Q é a vazão (m³/s); w é a largura (m); d é a profundidade (m); v é a velocidade (m/s); L é a carga sedimentar (ton/dia); s é a declividade superficial da água (m/m); a, c, k, p, e r são coeficientes; e b, f, m, j, e z são expoentes.

$$Q = ackQ^{b+fm} \tag{6}$$

então,

$$b + f + m = 1 \tag{7}$$

$$ack = 1 \tag{8}$$

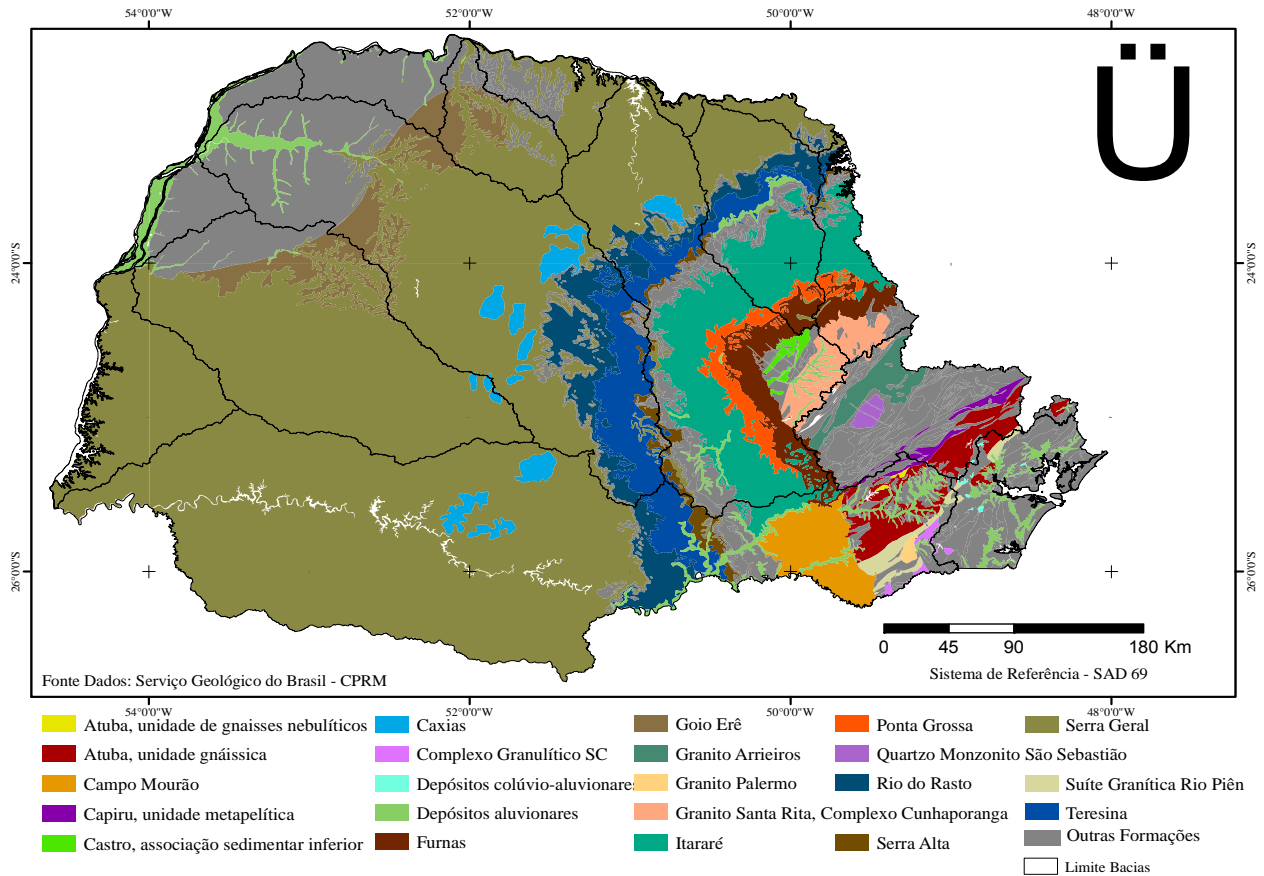


Figura 3 – Formações geológicas consideradas nas bacias de estudo (Fonte: CPRM)

Se a largura, profundidade e velocidade forem plotadas contra a vazão em escala logarítmica as relações resultantes serão expressas por linhas retas, o que matematicamente facilita a interpretação. Por isso, os expoentes das Equações 1, 2 e 3 representam a inclinação de suas respectivas retas de ajuste. Os coeficientes representam interseção das retas quando a vazão é a unidade e por isso não são muito importantes para a geometria hidráulica (Leopold & Maddock, 1953).

Para a análise da geometria hidráulica das seções transversais foram selecionadas 448 estações em 214 rios das bacias de estudo. Para cada estação foi utilizado um arquivo de medições de vazão que é composto pelas variáveis (cota, vazão, velocidade, área molhada, profundidade média e largura) correspondentes a cada medição. Assim, as variáveis (velocidade, profundidade média e largura) foram plotadas em função da vazão e por meio de uma regressão linear simples foram obtidos os expoentes e coeficientes das relações da geometria hidráulica (Equações 1, 2 e 3). As relações da geometria hi-

dráulica relacionadas ao transporte de sedimentos (Equação 4) e a declividade superficial da água (Equação 5) não foram consideradas no presente trabalho.

Efeito geológico na geometria hidráulica de seção

A fim de verificar a influência das formações geológicas na geometria hidráulica das estações fluviométricas foi gerado e interpretado um diagrama triaxial para cada formação. Esses diagramas foram feitos conforme o modelo proposto por Rhodes (1977) (Figura 4). Por meio da aplicação da teoria da geometria hidráulica de seção transversal foram gerados os expoentes b , f e m das Equações 1, 2 e 3 para cada estação fluviométrica. Após isso, as estações com seus respectivos expoentes foram agrupadas por tipo de formação geológica e por classe geológica. Para cada grupo foi criado um diagrama triaxial. A Figura 5 mostra um esquema de como foi criado cada diagrama.

Tabela 2 – Formações geológicas selecionadas para análise de geometria hidráulica

Formação geológica	Litologia	Classe
Atuba, unidade de gnaisses nebulíticos	Gnaisse, Hornblenda Gnaisse, Biotita Gnaisse	Metamórfica
Atuba, unidade gnáissica	Gnaisse, Migmatito, Hornblenda Gnaisse, Gnaisse Tonalítico, Biotita Gnaisse	Metamórfica
Campo Mourão	Arenito, Folhelho	Sedimentar
Capiru, unidade metapelítica	Filito, Metarenito Quartzoso, Metarritmito, Metassiltito	Metamórfica
Castro Associação Sedimentar Inferior	Arenito Arcoseano, Lamito, Siltito	Sedimentar
Caxias	Riodacito	Ígnea
Complexo Granulítico Santa Catarina - Unidade de rochas orto e paraderivadas	Gnaisse, Granulítico, Gnaisse Granulítico	Metamórfica
Depositos Coluvio-Aluvionares	Areia, Argila, Cascalho	Sedimentar
Depósitos Aluvionares	Areia, Cascalho	Sedimentar
Furnas	Arenito	Sedimentar
Goio Eru	Arenito	Sedimentar
Granito Arrieiros	Granodiorito, Monzogranito	Ígnea
Granito Palermo	Monzogabro, Quartzo-Monzonito, Quartzo-Sienito, Sienomonzogranito	Ígnea
Granito Santa Rita, Complexo Cunhaporanga	Monzogranito	Ígnea
Itararu	Arenito, Diamictito, Folhelho, Ritmito	Sedimentar
Ponta Grossa	Folhelho, Arenito Fino	Sedimentar
Quartzo Monzonito São Sebastião, Complexo Três Córregos	Quartzo-Monzonito	Ígnea
Rio do Rasto	Argilito, Argilito Siltico, Siltito	Sedimentar
Serra Alta		
Serra Geral	Basalto, Dacito	Ígnea
Suíte Granítica Rio Pien Granitóides	Granodiorito, Monzogranito, Quartzo-Monzodiorito	Ígnea
Teresina	Siltito Argiloso	Sedimentar

Sendo a soma dos expoentes igual a 1 (Equação 7) o diagrama (Figura 4) permite que os três expoentes sejam representados em um único ponto. Isso facilita a comparação dos pontos das estações com as subdivisões do diagrama. Por exemplo, o ponto P na Figura 4 representa os valores $b = 0,5$, $f = 0,2$ e $m = 0,3$ de uma seção de um rio que por consequência tem canal tipo 3. Além disso, o ponto P está situado à esquerda da subdivisão $b = f$, acima da subdivisão $m = f$, e abaixo da subdivisão $b + f = m$. Dessa forma foi analisado cada ponto, ou seja, observando a localização do ponto em relação às subdivisões dentro do diagrama.

A subdivisão $b = f$ do diagrama está relacionada à taxa de mudança da relação w/d (largura por profundidade, Equações 2 e 3 respectivamente) com o acréscimo da vazão. Dessa subdivisão é possível obter informações sobre a estabilidade do leito e das margens, da forma do canal e do ajuste do canal para o transporte de carga sedimentar no leito. A subdivisão $m = f$ ou $m/f = 1$ está relacionada à taxa de mudança da relação v/d (velocidade por profundidade, Equações 3.8 e 3.7 respectivamente) com o acréscimo da vazão. Wilcock (1971) concluiu que a capacidade de transporte de sedimentos de um rio com o acréscimo da vazão aumenta somente quando

$m/f \geq 1$. A subdivisão $m = f/2$ é baseada no número de Froude. Simons et al. (1965) mostraram que se o número de Froude diminui com o acréscimo da vazão o canal não possui grande capacidade para transportar sedimentos. A subdivisão $b + f = m$ ou $m = 0,5$ indica que a taxa de aumento da velocidade do fluxo é igual a taxa de aumento da vazão. Quando $m > 0,5$ (pontos acima dessa subdivisão) e a taxa w/d é baixa o canal pode ser completamente estável. A subdivisão $m/f = 2/3$ está relacionada com a rugosidade do canal. Segundo Rhodes (1977), a rugosidade é o fator que mais se altera com a mudança de vazão. Vários trabalhos (Leopold & Maddock, 1953; Leopoldo et al., 1992) mostram que a declividade é pouco influenciada pela vazão. A Tabela 3 mostra um resumo do diagrama proposto por Rhodes (1977), no qual a competência do canal está relacionada com capacidade para transporte de sedimentos.

Em direção à jusante

Na geometria hidráulica em direção a jusante (ou ao longo de um rio) é feita uma comparação das variáveis hidráulicas entre várias seções transversais dentro de um curso d'água. Para fazer essa comparação é importante que as vazões tenham um mesmo tempo de retorno, ou seja, uma mesma frequência. Isso, porque devido ao aumento da área de drenagem e do número de afluentes essas vazões têm tendência a aumentar na direção de jusante. Como esse aumento de vazão provoca um aumento proporcional da largura e da profundidade do rio e da velocidade do fluxo, as equações utilizadas nesse tipo de geometria são as mesmas da geometria de seção (Leopold & Maddock, 1953).

A análise da geometria hidráulica em direção à jusante foi realizada nos rios principais das bacias de estudo. Porém, apenas os rios Cinzas, Ivaí, Piquiri, Ribeira, Tibagi e Iguazu tiveram quantidade suficiente de estações para esse tipo de análise. Os demais rios foram descartados. Para cada rio principal foram selecionadas suas estações e para cada estação foi calculada uma vazão dominante. A vazão dominante é considerada a vazão modificadora ou modeladora de um canal fluvial. Carling (1988) definiu a vazão dominante como a vazão que mais transporta sedimentos do leito de um curso d'água próximo a um estado estacionário. Pickup & Warner (1976) sugeriram que a vazão dominante pode ser estabelecida por meio de um determinado período de retorno. Dury et al. (1963), Hickin (1968), Dury (1973, 1976) e Riley (1976) mostraram que o período de retorno de 1,58 anos é o mais adequado para determinar a vazão dominante. Para obtenção dessa vazão primeiramente foi feita uma análise de frequência de vazões máximas anuais, conforme o método proposto por Dalrymple (1960). Com arquivos contendo séries históricas de vazões máximas anuais de cada estação ordenou-se cada vazão da maior para a menor. O tempo de retorno para cada vazão máxima foi calculado como:

$$T = (N+1)/i \tag{9}$$

onde T é o tempo de retorno em anos de cada vazão máxima; N é o número de anos considerados para cada série histórica de dados; e i é o número da ordem de cada vazão máxima.

Depois da estimativa do tempo de retorno de cada estação plotaram-se as vazões máximas em função de seus respectivos tempos de retorno e estabeleceu-se uma regressão linear simples. Com a equação da regressão foi calculada a vazão dominan

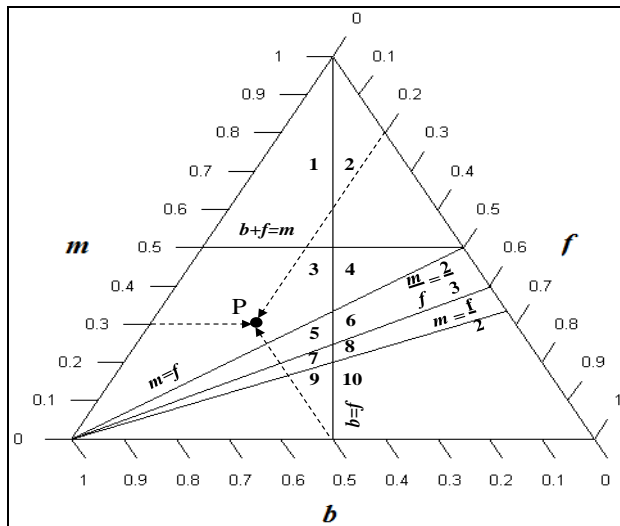


Figura 4 - Diagrama triaxial com suas subdivisões e tipos de canais (1 a 10) (adaptado de Rhodes, 1977).

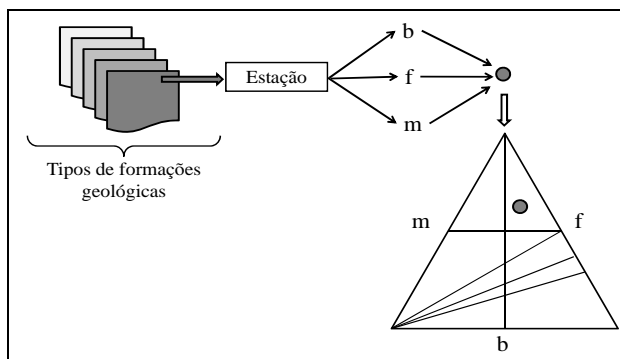


Figura 5 - Esquema de análise do efeito geológico na geometria hidráulica das estações fluviométricas

Tabela 3 – Resumo do diagrama de Rhodes (1977). w/d é a relação entre largura e profundidade, F é o número de Froude, v/A é a relação entre velocidade e área da seção transversal e $S^{1/2}/n$ é a relação entre a declividade e a rugosidade de Manning

Tipo de canal	w/d	Competência	F	v/A	$S^{1/2}/n$
1	Aumenta	Aumenta	Aumenta	Aumenta	Aumenta
2	Diminui	Aumenta	Aumenta	Aumenta	Aumenta
3	Aumenta	Aumenta	Aumenta	Diminui	Aumenta
4	Diminui	Aumenta	Aumenta	Diminui	Aumenta
5	Aumenta	-	Aumenta	Diminui	Aumenta
6	Diminui	-	Aumenta	Diminui	Aumenta
7	Aumenta	-	Aumenta	Diminui	Diminui
8	Diminui	-	Aumenta	Diminui	Diminui
9	Aumenta	-	Diminui	Diminui	Diminui
10	Diminui	-	Diminui	Diminui	Diminui

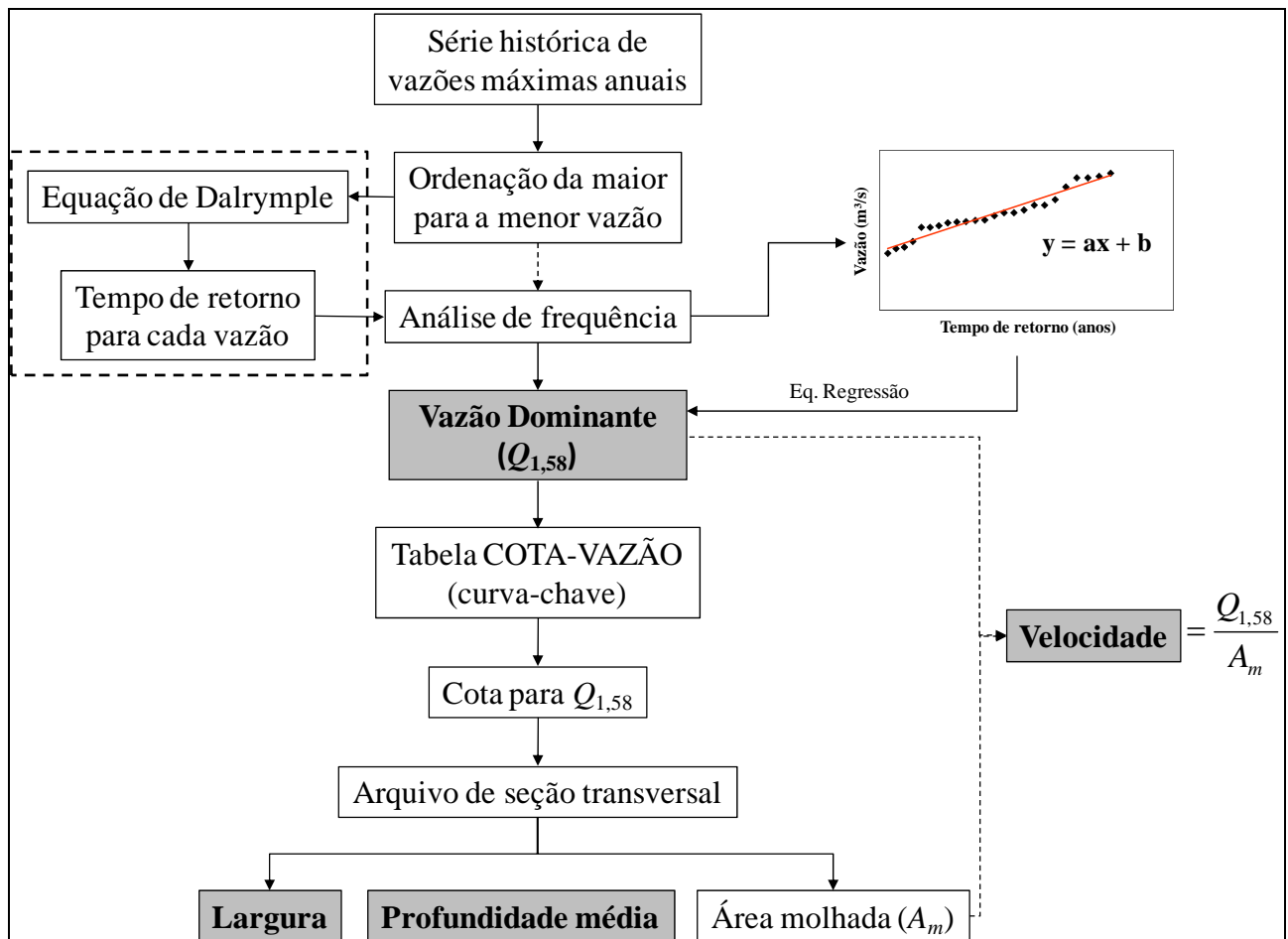


Figura 6 - Esquema de análise da geometria hidráulica em direção à jusante do rio

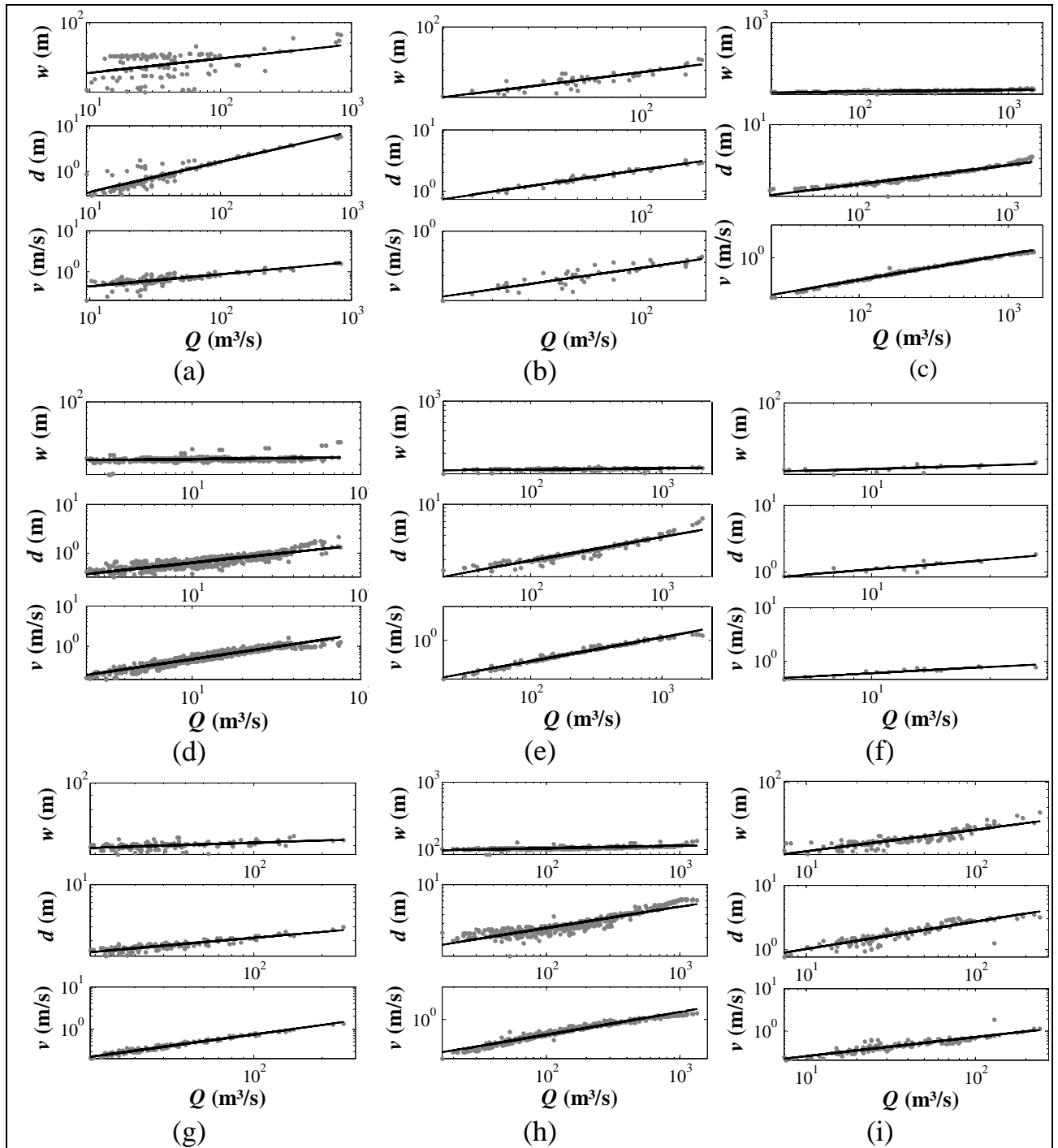


Figura 7 – Geometria hidráulica de algumas estações das bacias de estudo. (a) 64362000-Cinzas; (b) 64245000-Itararé; (c) 64660500-Ivaí; (d) 82170000-Litorânea; (e) 64799500-Piquiri; (f) 64546900-Pirapó; (g) 81335000-Ribeira; (h) 64465000-Tibagi; (i) 65025000-Iguaçu

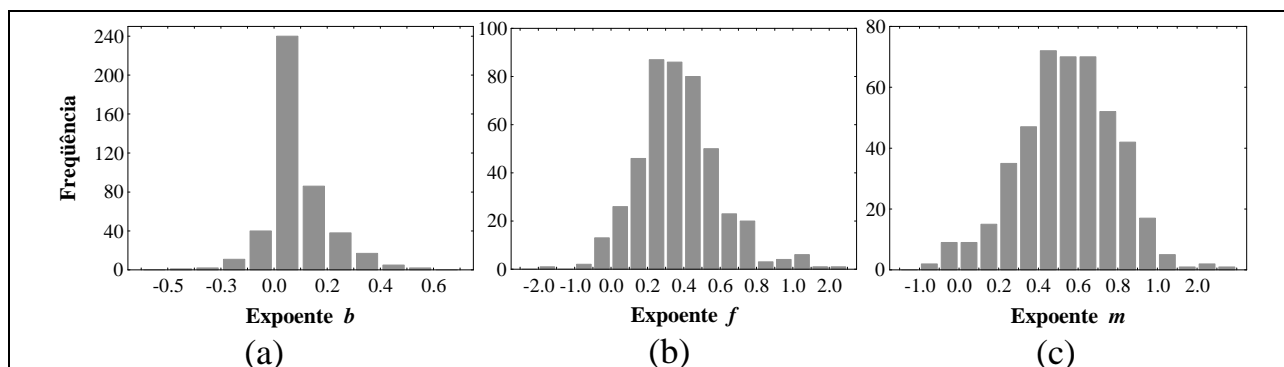


Figura 8 - Histogramas de frequência dos expoentes (a) b; (b) f; (c) m

te para um tempo de retorno de 1,58 anos (Dury et al., 1963; Hickin, 1968; Dury, 1973 e 1976; Riley, 1976).

Com uma tabela de cota-vazão de cada estação foi identificada a cota correspondente à vazão com tempo de retorno de 1,58 anos. Com um arquivo contendo as variáveis hidráulicas de cada seção transversal foi identificada a área molhada, largura e profundidade média (razão da área molhada pela largura) para cada cota correspondente a vazão com tempo de retorno de 1,58 anos. A velocidade foi calculada pela razão entre a vazão e a área molhada. Depois de obtidas todas as variáveis hidráulicas foi feita a análise de geometria hidráulica de jusante pelo método proposto por Leopoldo & Maddock (1953). A Figura 6 mostra um fluxograma dessa análise em direção à jusante do rio.

Sabe-se que em direção à jusante de um rio a vazão aumenta. O motivo é que a área de drenagem da bacia hidrográfica também aumenta. Sabe-se também que a área de uma bacia é uma variável que pode ser medida mais facilmente do que uma determinada vazão de um rio. Por causa dessa facilidade e devido a sua variação em direção à jusante a área de drenagem é muitas vezes utilizada nas relações da geometria hidráulica no lugar de uma vazão com determinado tempo de retorno. Para verificar a correlação entre as áreas de drenagem e as vazões com tempo de retorno de 1,58 anos os valores das áreas de drenagem foram plotados em função dos valores de vazão.

Como os ajustes ao longo do canal são controlados pelas variáveis da geometria hidráulica, a área da seção transversal ao nível de margens plenas pode ser uma variável indicadora da capacidade do canal (Park, 1978). Por causa desse fato foi investigada também a relação entre as áreas das seções transversais ao longo dos rios em nível de margens

plenas e a área de drenagem correspondente a cada seção.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

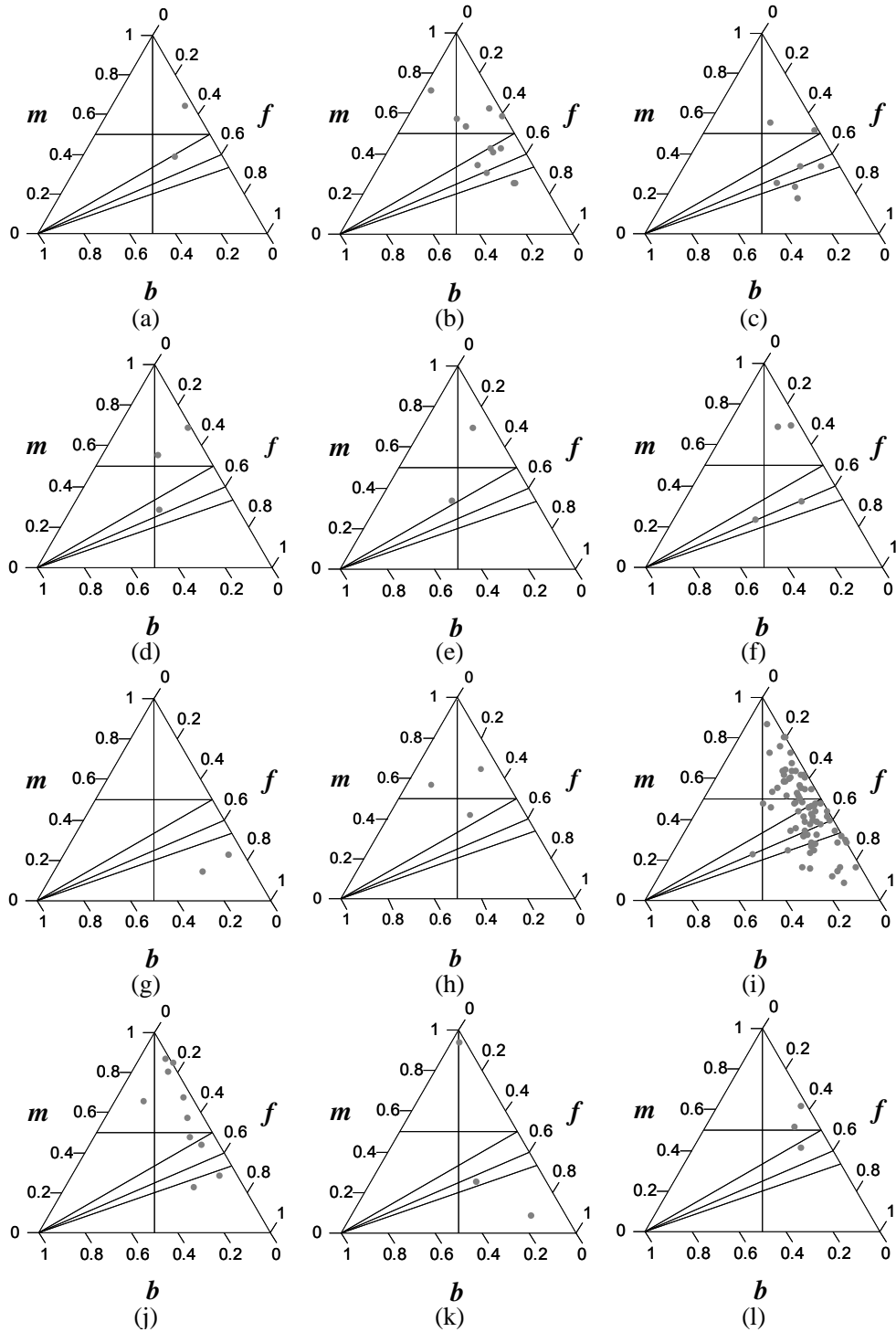
Análise da geometria hidráulica de seção transversal

A Figura 7 mostra exemplos dos gráficos resultantes dessa análise de geometria hidráulica de seção. Nota-se que as variáveis profundidade e velocidade são mais sensíveis ao aumento da vazão do que a largura das seções transversais. Praticamente em todas as seções analisadas observou-se esse comportamento da largura.

A Tabela 4 mostra o valor médio, mínimo, máximo, a mediana e a moda dos expoentes dessa análise. Nessa tabela também se observa o número de estações consideradas para a obtenção desses valores estatísticos. No caso do expoente b algumas estações foram descartadas devido à presença de valores negativos muito grandes, que podem ocorrer devido a erros nas séries dos dados. Para os expoentes f e m todas as estações foram consideradas. A Figura 8 mostra os histogramas de frequência dos expoentes b, f e m. Observa-se que os expoentes são normalmente distribuídos. As maiores frequências dos expoentes b, f e m ocorrem nos intervalos de 0,0 a 0,1, 0,2 a 0,5 e 0,4 a 0,7 respectivamente, próximas aos valores médios.

Tabela 4 – Valores estatísticos dos expoentes das relações da geometria hidráulica de seção

	Número	Média	Mediana	Moda	Mínimo	Máximo
b	442	0,08	0,05	0,19	-0,45	0,54
f	448	0,36	0,35	0,26	-1,71	1,71
m	448	0,54	0,54	0,53	-0,97	2,37



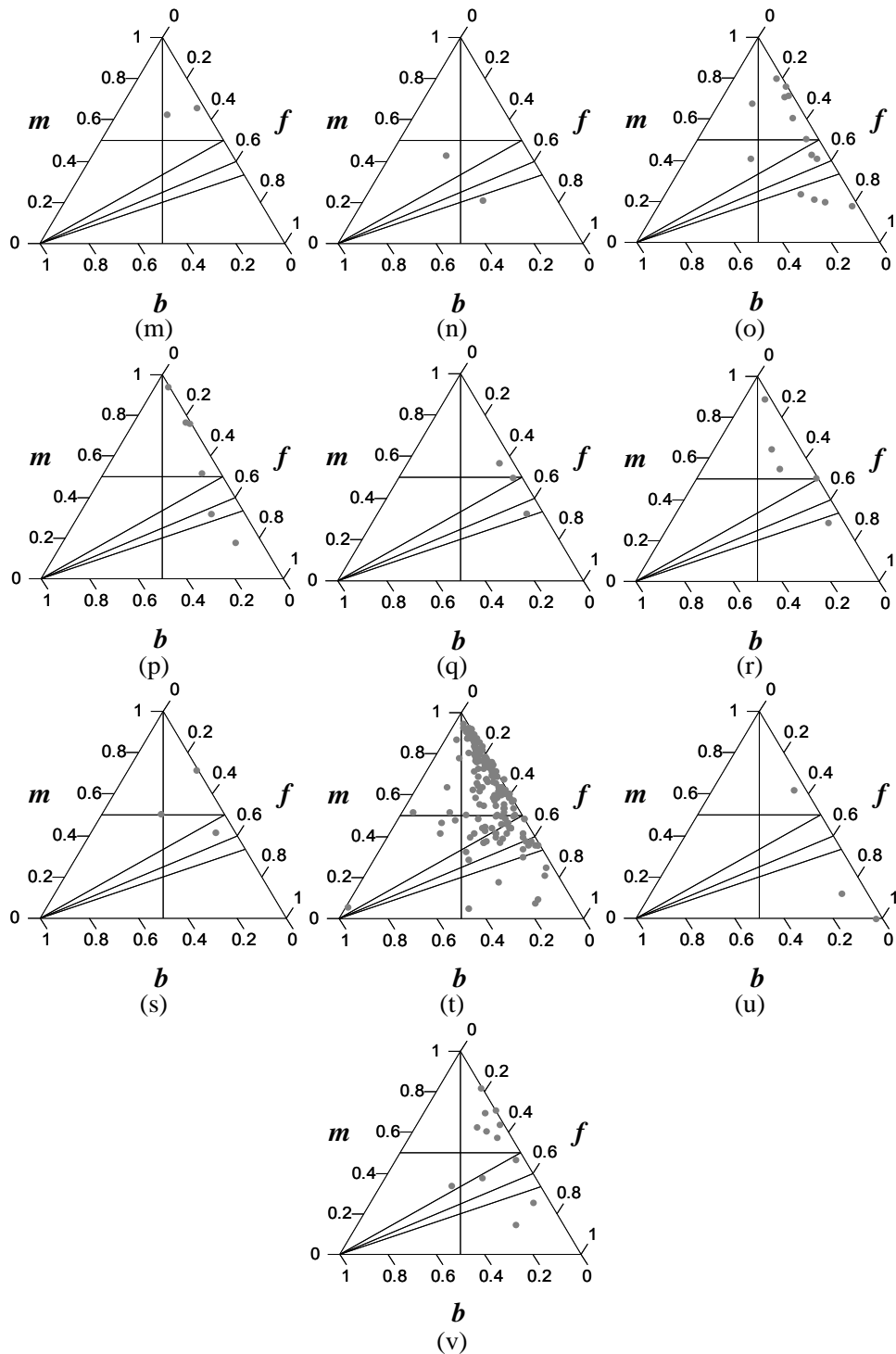


Figura 9 – Gráficos triaxiais resultantes do agrupamento dos expoentes b , f e m por formação geológica. (a) Atuba Unidade de Gnaisses Nebulíticos; (b) Atuba Unidade Gnáissica; (c) Campo Mourão; (d) Capiru Unidade Metapelítica; (e) Castro Associação Sedimentar Inferior; (f) Caxias; (g) Complexo Granulítico SC - Unidade de Rochas Orto e Paraderivadas; (h) Depósitos Colúvio-Aluvionares; (i) Depósitos Aluvionares; (j) Furnas; (k) Goio Ere; (l) Granito Arrieiros; (m) Granito Palermo; (n) Granito Santa Rita - Complexo Cunhaporanga; (o) Itararú; (p) Ponta Grossa; (q) Quartzito Monzonito São Sebastião - Complexo Três Córregos; (r) Rio do Rasto; (s) Serra Alta; (t) Serra Geral; (u) Suíte Granítica Rio Pien Granitoides; e (v) Teresina

Park (1977), em uma pesquisa feita em trabalhos publicados desde 1953 encontrou os intervalos de 0,0 a 0,59, 0,06 a 0,73 e 0,07 a 0,71 para b, f e m respectivamente e as maiores frequências desses expoentes ocorreram nos intervalos de 0,0 a 0,2, 0,3 a 0,5 e 0,2 a 0,5 respectivamente. Hadadin & Bdour (2005) analisaram 7 seções de um canal incisivo, formado por degradação geológica, e encontraram os valores médios $b = 0,09$; $f = 0,58$; e $m = 0,33$. Leopold & Maddock (1953) analisaram 20 rios localizados nas partes central e sudoeste dos Estados Unidos e encontraram os seguintes valores: $b = 0,26$; $f = 0,40$; e $m = 0,34$. Deste modo, à medida que a vazão aumenta na seção transversal, a velocidade e a profundidade aumentam mais rapidamente do que a largura.

Efeito da geologia

A Figura 9 mostra os diagramas triaxiais resultantes do agrupamento dos expoentes b, f e m por formação geológica.

Os resultados dos diagramas triaxiais mostram que com relação à taxa de mudança da relação w/d, relacionada à subdivisão $b = f$, praticamente em todas as formações ocorre um decréscimo dessa taxa com o aumento da vazão. Portanto, em geral há uma tendência de todos os rios analisados possuírem maior estabilidade das margens do que do leito. Com relação à taxa de mudança da relação v/d, relacionada à subdivisão $m = f$, apenas 5 formações (Atuba Unidade de Gnaisses Nebulíticos, Castro Associação Sedimentar Inferior, Complexo Granulítico SC - Unidade de Rochas Orto e Paraderivadas, Depósitos Colúvio-Aluvionares e Granito Palermo) demonstraram alguma tendência de aumento ou diminuição dessa taxa. O número de Froude, relacionado à subdivisão $m = f/2$, mostrou que em 9 formações os rios possuem tendência de escoamentos supercríticos. Apenas na formação Complexo Granulítico SC os rios demonstraram escoamento subcrítico. A taxa v/A , relacionada a subdivisão $b + f = m$, mostrou que em algumas formações há uma tendência de que os rios possuírem margens instáveis. Finalmente, em relação a subdivisão $m = 2/3f$ observou-se que a declividade da maioria dos canais aumenta mais rapidamente que a rugosidade.

Em geral em todos os tipos de formações geológicas os valores plotados nos diagramas da Figura 9 ficaram bastante dispersos. Park (1977), ao analisar diagramas dos expoentes da geometria hidráulica de seção e em direção à jusante, não encontrou evidências claras quanto ao comportamento desses expoentes. Ele agrupou os expoentes de dife-

rentes tipos de rios em função do tipo de clima dos locais desses rios. Devido à grande dispersão desses pontos Park concluiu que é preciso considerar mais fatores locais nesse tipo de análise. Fatores como, por exemplo, a composição do material das margens, padrão fluvial (se meândrico ou entrelaçado), presença de corredeiras, entre outros fatores.

A análise do comportamento das relações do diagrama triaxial pelos valores médios dos expoentes b, f e m para cada formação mostra uma forte tendência de estabilidade das margens dos rios de estudo (Figura 10). Isso ocorre porque todos os expoentes se concentram ao lado direito da subdivisão $b = f$, ou seja, com $b < f$. Assim, a taxa w/d diminui com o acréscimo da vazão. Além disso, dos 22 valores médios, 13 se concentram acima da subdivisão $b + f = m$ o que mostra completa estabilidade desses canais.

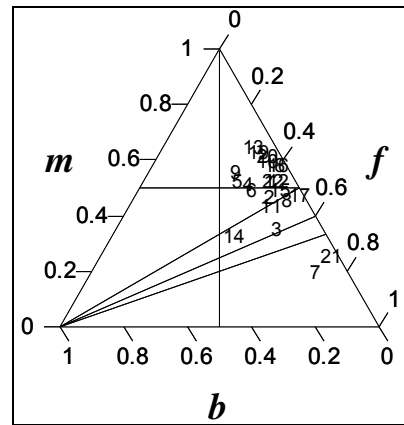


Figura 10 – Média total para cada uma das 22 formações selecionadas.

A Figura 11 mostra os diagramas triaxiais resultantes dos agrupamentos dos expoentes por classe geológica. Os valores médios dos expoentes para essas classes são: para a classe ígnea, $b = 0,60$, $f = 0,32$ e $m = 0,08$; para a classe metamórfica, $b = 0,47$, $f = 0,40$ e $m = 0,14$; e para a classe sedimentar, $b = 0,48$, $f = 0,41$ e $m = 0,10$. Observa-se também nesses diagramas que há uma tendência de os rios possuírem margens estáveis, pois novamente a maioria dos pontos se concentra ao lado direito da subdivisão $b = f$. Essa estabilidade ocorre principalmente na classe ígnea, onde os pontos também se concentraram acima da subdivisão $b + f = m$. Com relação às outras subdivisões do diagrama a grande dispersão dos pontos prejudica uma análise mais detalhada.

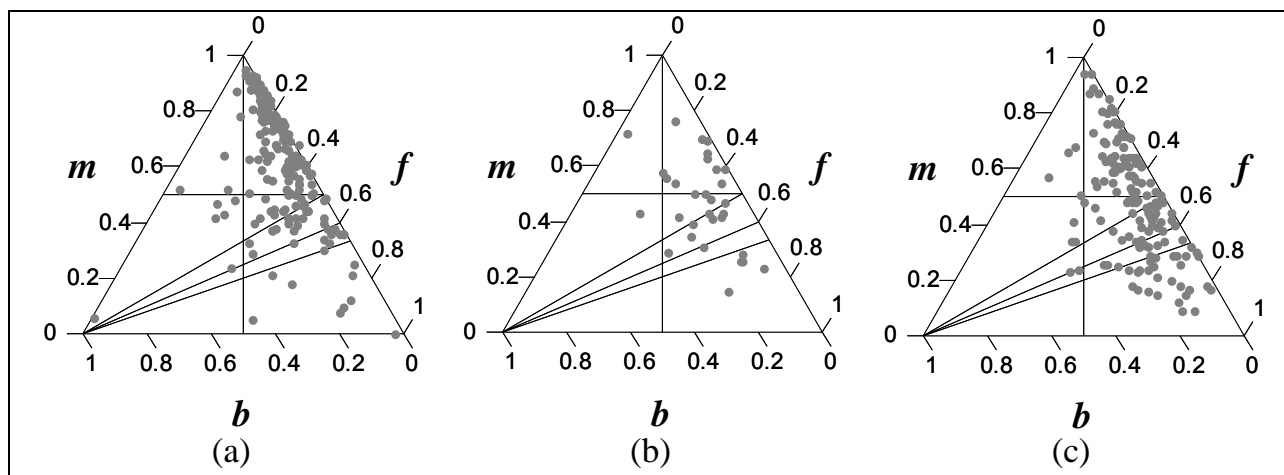


Figura 11 - Diagramas triaxiais das classes ígnea (a), metamórfica (b) e sedimentar (c)

Para melhor apresentar os resultados da Figura 11, a Tabela 5 mostra as porcentagens das classes geológicas em relação a cada tipo de canal, conforme a classificação de Rhodes (1977) (Tabela 3).

Tabela 5 – Porcentagens das classes geológicas por tipo de canal

Tipo de canal	Ígnea (%)	Metamórfica (%)	Sedimentar (%)
1	2,64	3,22	2,65
2	64,55	38,71	43,71
3	2,65	3,22	1,99
4	7,94	12,91	7,28
5	0,53	0	1,33
6	11,64	25,81	17,22
7	0	0	0
8	4,76	0	7,28
9	0	0	0
10	5,29	16,13	18,54

A Tabela 5 mostra que o canal tipo 2 tem maior porcentagem em todas as classes. Além disso, os canais tipo 4, 6 e 10 também apresentam porcentagem significativa em todas as classes. Ou seja, assim como se observa na Figura 11 em geral os rios em estudo apresentam alta estabilidade de suas margens, pois as maiores porcentagens dos tipos de canal ocorrem naqueles situados ao lado direito da subdivisão $b=f$.

Análise da geometria hidráulica na direção de jusante

A Tabela 6 mostra os valores de vazão para o tempo de retorno de 1,58 anos dos rios Cinzas, Ivaí, Piquiri, Ribeira, Tibagi e Iguaçu. Além disso, também mostra a série de dados considerados para cada estação, a equação resultante da regressão linear e a área de drenagem de cada estação. Observa-se na Tabela 6 que em todas as análises houve uma alta correlação dos dados. Os valores do R^2 (coeficiente de determinação) variaram entre 0,70 e 0,99.

Com os dados de vazão da Tabela 6 foram estabelecidas as relações da geometria hidráulica de jusante para os rios considerados nessa análise. A Tabela 7 mostra os expoentes e sua soma e os coeficientes e seu produto encontrados nessa análise. A Figura 12 mostra o comportamento das variáveis largura, profundidade e velocidade com o aumento da vazão em várias estações ao longo dos rios considerados para essa análise.

A análise do Rio das Cinzas (Figura 12a) mostra que ao contrário da largura e profundidade a velocidade é uma variável praticamente insensível à mudança de vazão. O expoente da velocidade na Tabela 7 é significativamente menor que os outros expoentes desse rio. Isso pode ser explicado devido à pequena quantidade de estações analisadas e também por essas estações se localizarem na parte baixa do rio onde existe pouca variação da declividade do leito.

No caso do Rio Ivaí (Figura 12b) observa-se que entre os pontos 4 a 7 (estações 64660500 a 64693000, conforme Tabela 6) ocorre uma grande dispersão dos pontos que é causada pelo grande au-

Tabela 6 - Resultados da análise da geometria hidráulica na direção de jusante

* Rio	Cód. Est.	Série	N	Equação	R ²	Q _{1,58}	A _D
Rio das Cinzas							
1	64360000	1926-2008	79	y = 400,36x + 103,43	0,98	182,96	2015
2	64362000	1976-2008	32	y = 514,08x + 305,61	0,91	407,74	3976
3	64370000	1931-2008	75	y = 875,11x + 352,85	0,89	526,70	5622
Rio Ivaí							
1	64625000	1956-2008	52	y = 879,42x + 585,08	0,89	759,78	3572
2	64645000	1965-2008	43	y = 1881,1x + 1122	0,94	1495,69	8600
3	64655000	1967-2008	52	y = 2322,2x + 1802	0,84	2263,32	12701
4	64660500	1985-2008	23	y = 5156,8x + 3270,3	0,88	4294,73	19300
5	64685000	1953-2008	55	y = 2842,1x + 2765,7	0,88	3330,30	28427
6	64689005	1990-2008	16	y = 1507,8x + 2937,4	0,84	3236,94	31956
7	64693000	1974-2009	33	y = 3198,9x + 3035,5	0,94	3670,98	34442
Rio Piquiri							
1	64764000	1984-2008	24	y = 656,3x + 380,57	0,95	510,95	1703
2	64767000	1981-2008	27	y = 1410,6x + 1158,7	0,90	1438,93	3620
3	64771500	1976-2008	32	y = 1438,1x + 1057,5	0,94	1343,19	4223
4	64776100	1986-2008	22	y = 3269,8x + 1968,3	0,96	2617,87	7690
5	64795000	1970-2008	38	y = 2668,7x + 1988,3	0,93	2518,46	11303
6	64799500	1978-2008	31	y = 2761,3x + 2577,8	0,81	3126,35	12124
7	64820000	1966-2008	42	y = 3565,8x + 1926,7	0,94	2635,07	17457
8	64830000	1969-2008	39	y = 3009,2x + 2221,9	0,95	2819,70	20982
Rio Ribeira							
1	81107000	1978-2008	30	y = 1199,6x + 131,27	0,94	369,58	3199
2	81135000	1930-2008	78	y = 1148,1x + 178,01	0,99	406,09	4570
3	81200000	1936-2008	72	y = 1472,9x + 281,77	0,98	574,37	7252
Rio Tibagi							
1	64430200	2002-2008	4	y = 10,848x + 45,193	0,95	47,35	546
2	64444000	1974-2008	35	y = 405,22x + 177,38	0,96	257,88	4450
3	64447000	1975-2008	33	y = 528,04x + 228,8	0,96	333,70	5731
4	64465000	1931-2004	70	y = 958,36x + 345,65	0,97	536,04	8948
5	64481200	1987-2004	15	y = 1307,1x + 554,11	0,89	813,77	11600
6	64482000	1980-2008	27	y = 1746,2x + 605,95	0,97	952,85	14000
7	64506000	1977-2008	29	y = 3125,1x + 1069,7	0,98	1690,52	21240
8	64506500	1987-2008	21	y = 3092,7x + 1163,3	0,96	1777,69	21200
Rio Iguaçu							
1	65009000	1976-2008	31	y = 53,84x + 60,25	0,77	70,95	626
2	65013005	1984-2008	19	y = 55,444x + 86,507	0,75	97,52	727
3	65017006	1976-2008	26	y = 111,94x + 57,138	0,70	79,38	1284
4	65019980	1974-1990	9	y = 42,641x + 128,71	0,83	137,18	2122
5	65020000	1974-1990	16	y = 115,55x + 120	0,85	142,95	2152
6	65025000	1976-2008	32	y = 216,18x + 120,01	0,95	162,96	2578
7	65028000	1976-2008	22	y = 339,05x + 96,141	0,92	163,50	3049
8	65035000	1935-2008	73	y = 368,25x + 148,97	0,98	222,13	3662
9	65060000	1930-2008	78	y = 679,65x + 169,74	0,97	304,76	6065
10	65220000	1963-2008	45	y = 1447,7x + 697,14	0,95	984,74	18300
11	65255000	1993-2008	15	y = 1268,6x + 944,66	0,86	1196,68	20640
12	65310000	1930-2008	78	y = 1779x + 854,02	0,95	1207,43	24211
13	65365800	1978-2008	29	y = 2461,7x + 1108,6	0,89	1597,63	24900
14	65802000	1980-1992	12	y = 4756,2x + 2154,4	0,72	3099,25	33700

Continuação Tabela 6

15	65808000	1967-1992	5	$y = 3602,7x + 1601$	0,83	2316,70	38275
16	65830000	1967-1992	21	$y = 8412,7x + 917,35$	0,96	2588,59	34100
17	65975000	1976-2008	32	$y = 12140x + 5349$	0,86	7760,70	57974
18	65986000	1985-2008	23	$y = 15386x + 5289,8$	0,88	8346,34	62900
19	65988000	1974-1993	19	$y = 8103,8x + 4141,1$	0,86	5750,98	63236
20	65993000	1942-2008	63	$y = 15526x + 3559,7$	0,95	6644,05	67317

* Número de identificação das estações na Figura 12.

mento da vazão. Isso pode significar que existem erros nas medições de vazão da estação 64660500 e que podem ser causados pela má localização dessa estação no rio. Além disso, entre os pontos 4 a 7 também ocorre grande variação da taxa w/d o que contribuiu com essa dispersão dos pontos, pois, essa taxa influencia diretamente na forma do canal e conseqüentemente na mudança da vazão.

No Rio Piquiri (Figura 12c) também ocorre uma considerável dispersão dos pontos correspondentes às estações mais a jusante do rio (pontos 4 a 8). Além disso, a velocidade varia negativamente com o aumento da vazão o que pode representar fraca competência do Rio Piquiri para o transporte de sedimentos. Na Tabela 7 observa-se que a profundidade do Rio Piquiri varia aproximadamente com a raiz cúbica da vazão.

Assim como o Rio Piquiri o Rio Ribeira (Figura 12d) também apresenta a velocidade variando negativamente com o acréscimo da vazão. Nesse caso esse comportamento negativo da velocidade pode ser explicado pela pouca quantidade de estações analisadas no Rio Ribeira. Além disso, as três estações se localizam na parte baixa do rio, na área de deposição e baixa declividade da bacia.

Park (1977), ao reexaminar o trabalho de Leopold & Maddock (1953), concluiu que o aumento da velocidade com o acréscimo da vazão não se aplica a todos os tipos de rios. Em metade dos segmentos dos rios analisados foi encontrado correlação negativa quando considerado uma vazão com tempo de retorno de até 2,33 anos. Park (1977) salientou que as diferenças nas correlações podem ser devido ao tempo de retorno utilizado para a vazão, diferenças entre os locais das estações e métodos utilizados para o ajuste dos pontos.

A análise da geometria na direção de jusante do Rio Tibagi (Figura 12e) mostra que ocorre um comportamento muito semelhante da largura, profundidade e velocidade em resposta ao acréscimo da vazão. Esse comportamento também pode ser visto pelos expoentes do Rio Tibagi na Tabela 7 onde se

observa também que a profundidade varia aproximadamente com a raiz cúbica da vazão e a velocidade com a raiz quarta.

Para o Rio Iguaçu (Figura 12f) os pontos de 1 a 9 tendem a um bom alinhamento para as três variáveis sendo a largura a variável que mais se modifica em direção à jusante com o acréscimo da vazão. Isso pode ser explicado pela baixa variação da altitude que pode impedir a ocorrência de grandes profundidade e velocidades do fluxo d'água no canal. Nesse trecho dos pontos 1 a 9 a declividade do canal é de apenas 0,0006 m/m em uma distância de aproximadamente 190 km. Portanto, pode-se dizer que nesse trecho o rio tende a se ajustar mais pela mudança de sua largura. Os pontos de 10 a 20 se mostram bastante dispersos para as três variáveis e os valores da largura aumentam significativamente em algumas estações em relação aos pontos anteriores. Destaca-se que o ponto 17 (estação 65975000) possui um valor de profundidade significativamente maior que os outros pontos das estações a jusante. Ao contrário, a velocidade dessa estação é uma das menores desde os pontos de 10 a 16, no trecho médio do rio. Ao observar a área de drenagem verifica-se que essa estação do ponto 17 possui o maior valor e esse pode ser o motivo da grande variação na profundidade. Com grande área para drenar e considerando grande estabilidade de suas margens o rio nesse ponto pode estar buscando seu equilíbrio pelo ajuste maior de sua profundidade com o acréscimo da vazão.

A Tabela 8 mostra os resultados dos expoentes e coeficientes das relações da geometria hidráulica de jusante quando a vazão com tempo de retorno de 1,58 anos foi substituída pela área de drenagem. Na ausência de dados de vazão, a área de drenagem pode ser utilizada para estudos de geometria hidráulica. Os resultados dos expoentes e coeficientes dessa tabela são valores muito próximos aos da Tabela 7, principalmente com relação ao expoente m .

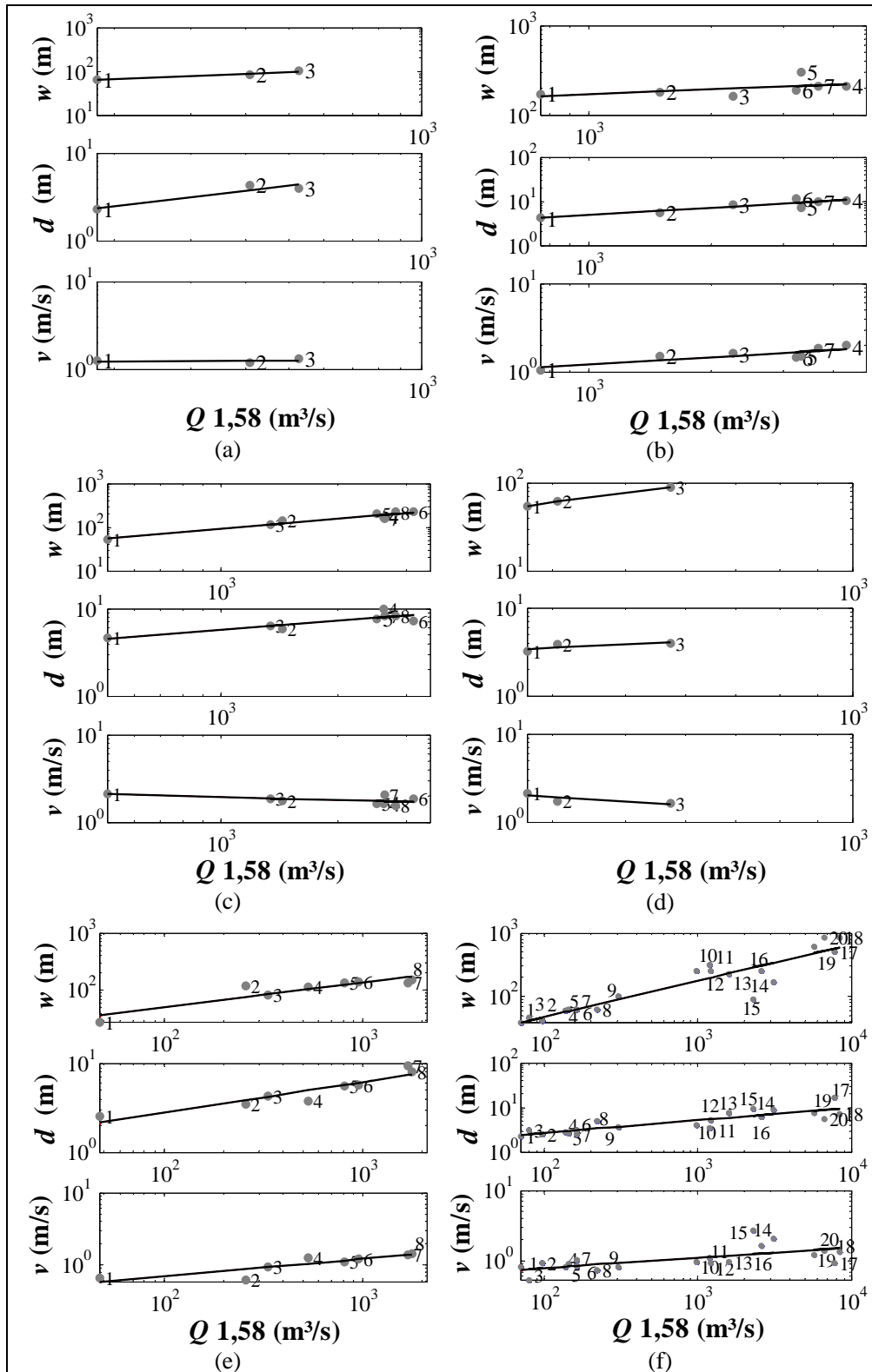


Figura 12 - Variação da largura (w), profundidade (d) e velocidade (v) com o aumento da vazão para um tempo de retorno de 1,58 anos em várias seções ao longo dos rios (a) Cinzas, (b) Ivai, (c) Piquiri, (d) Ribeira, (e) Tibagi, (f) Iguaçu.

Tabela 7 – Resultados da geometria hidráulica de jusante

Bacia	b	f	m	b+f+m	a	c	k	a·c·k
Cinzas	0,39	0,59	0,01	1,00	8,04	0,10	1,14	0,96
Ivaí	0,18	0,53	0,28	1,00	49,11	0,12	0,16	0,98
Piquiri	0,77	0,34	-0,11	0,99	0,43	0,55	4,21	1,00
Ribeira	1,12	0,38	-0,49	1,00	0,07	0,35	37,21	0,97
Tibagi	0,42	0,34	0,24	1,00	7,23	0,58	0,23	0,98
Iguaçu	0,57	0,28	0,14	1,00	3,40	0,72	0,40	0,99

Tabela 8 – Resultados da geometria hidráulica de jusante com área de drenagem

Bacia	b	f	m	b+f+m	a	c	k	a·c·k
Cinzas	0,43	0,60	0,02	1,05	2,42	0,02	1,00	0,06
Ivaí	0,14	0,38	0,17	0,70	49,45	0,19	0,29	2,85
Piquiri	0,49	0,22	-0,06	0,64	1,78	0,99	3,23	5,75
Ribeira	0,61	0,25	-0,32	0,55	0,35	0,43	27,09	4,19
Tibagi	0,43	0,32	0,22	0,98	2,05	0,28	0,13	0,07
Iguaçu	0,59	0,28	0,15	1,03	0,62	0,33	0,25	1,03

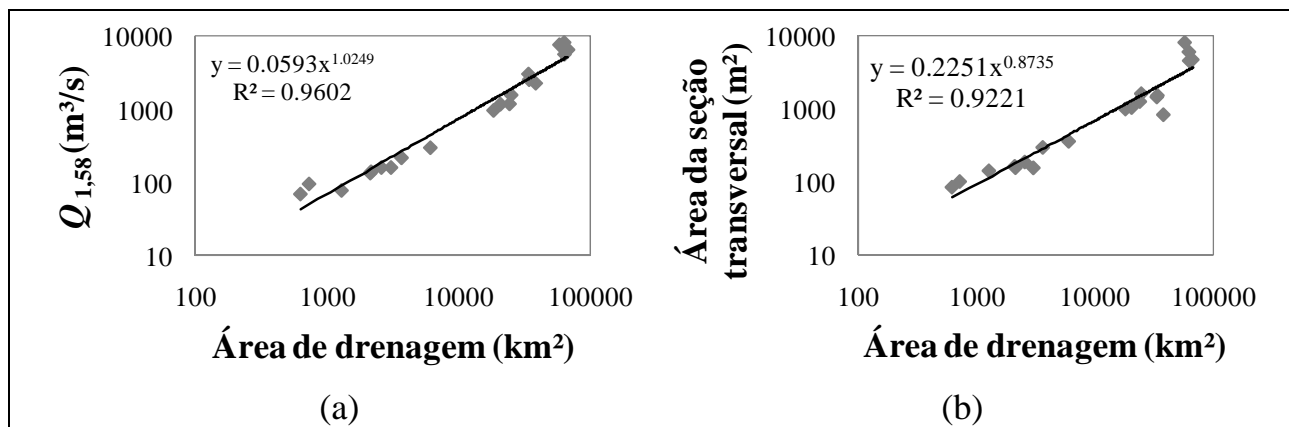


Figura 13 – Relações entre área de drenagem da bacia do Rio Iguaçu e (a) vazão com tempo de retorno de 1,58 anos e (b) áreas das seções transversais

A Figura 13 mostra um exemplo da relação entre área de drenagem e vazão com tempo de retorno de 1,58 anos e entre área de drenagem e área da seção transversal para as estações do Rio Iguaçu. Observa-se nessa figura que ocorre alta correlação entre essas variáveis. Da mesma forma essa alta correlação também foi encontrada nas demais bacias dessa análise. Isso mostra que para essas bacias a área da seção transversal pode ser uma variável indicadora da capacidade do canal quando em nível de margens plenas.

CONCLUSÕES

A teoria da geometria hidráulica fluvial foi aplicada em nove bacias hidrográficas Paranaenses. Para isso foram estabelecidas as relações matemáticas da geometria hidráulica de seção e de direção à jusante para cada bacia.

Para análise da geometria hidráulica de seção os valores médios dos expoentes foram $b = 0,08$, $f = 0,36$ e $m = 0,54$. Essa análise mostrou que as vari-

áveis profundidade e velocidade são mais sensíveis ao aumento da vazão do que a largura das seções transversais. Portanto, pode haver uma maior influência geológica no ajuste da largura das seções dos rios de estudo. Por meio de diagramas triaxiais foi verificado que a grande variabilidade de formações geológicas e a pouca quantidade de estações na maioria das formações dificulta uma análise mais precisa da influência geológica nas seções estudadas. Porém, entre 22 tipos de formações geológicas verificou-se que os expoentes são quase todos plotados ao lado direito da subdivisão $b = f$ do diagrama e por isso pode-se dizer que os rios das bacias de estudo possuem tendência de alta estabilidade das margens.

A análise da geometria hidráulica em direção a jusante foi realizada com base nos rios Cinzas, Ivaí, Piquiri, Ribeira, Tibagi e Iguaçu. A pouca quantidade de estações e a má distribuição dessas estações ao longo de alguns rios prejudicou um pouco essa análise. Porém pode-se dizer que o Rio Ivaí possui alta estabilidade de suas margens, pois a largura sofre pouca variação ao longo do canal. Ao contrário, os rios Piquiri, Ribeira Tibagi e Iguaçu demonstram instabilidade de suas margens, pois possuem grandes variações nas larguras dos seus canais. Além disso, os rios Cinzas, Piquiri e Ribeira não são grandes transportadores de sedimentos, pois, suas velocidades sofrem pouca variação ou variam negativamente ao longo de seus canais com o aumento da vazão.

A relação entre vazão com tempo de retorno de 1,58 anos e área de drenagem mostrou que na ausência de uma série de dados de vazão a área de drenagem pode ser utilizada para estudos de geometria hidráulica de jusante nas bacias paranaenses. Assim a geometria hidráulica pode ser útil em estudos de regionalização de vazão. Além disso, pode-se dizer que os dados medidos podem ser considerados bons e confiáveis, pois, se as medições não fossem bem feitas talvez não se obtivesse uma alta correlação entre as vazões e as áreas de drenagem. Devido a isso, a teoria da geometria hidráulica fluvial pode ser utilizada também como uma ferramenta de apoio na consistência de dados fluviométricos. A alta correlação da área da seção transversal em nível de margens plenas com a área de drenagem mostrou que essas seções em nível de margens plenas são indicadoras da capacidade do canal.

Além da geologia, outros fatores como regime climático e hidrológico, formações morfológicas, usos dos solos, tipos de vegetação, entre outros, podem influenciar a geometria hidráulica dos rios no Paraná. Recomenda-se que futuros trabalhos continuem a investigar qual desses fatores que mais

influencia a forma dos canais dos rios paranaenses. Outros períodos de retorno para a vazão dominante também devem ser investigados em futuros trabalhos.

A teoria da geometria hidráulica proposta por Leopoldo & Maddock (1953) ainda pode ser muito desenvolvida e explorada. Apesar de pouco conhecida e aplicada no Brasil o presente trabalho demonstrou que essa teoria pode contribuir com o avanço da ciência hidrológica e conseqüentemente com gerenciamento dos recursos hídricos brasileiros.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Engenheiro Edson Sakae Nagashima (Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental do Estado do Paraná – SUDERHSA) pela disponibilização do banco de dados fluviométricos utilizados no desenvolvimento de parte desse trabalho. Ao Laboratório de Hidrologia da UFSC por todo o apoio e atenção na pesquisa desse trabalho. Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) pelo auxílio financeiro durante a construção desse trabalho.

REFERENCIAS

- BIZZI, L. A.; SCHOBENHAUS, C.; VIDOTTI, R. M.; GONÇALVES, J. H. Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil: texto, mapas & SIG. CPRM – Serviço Geológico do Brasil, Brasília – DF, 2003. 692 p.
- CARLING, P. The concept of dominant discharge applied to two gravel-bed streams in relation to channel stability thresholds. *Earth Surf. Process. Landforms*, v.13, p.355-367, 1988.
- CHRISTOFOLETTI, A. Geomorfologia Fluvial. Editora Edgard Blucher, São Paulo – SP, 1981. 313p.
- DALRYMPLE, T. Manual of Hydrology: Part 3. Flood-frequency analyses. Geological Survey Water-Supply, Paper 1543-A, 1960. 80p.
- DOLL, B. A.; DOBBINS, A. D.; SPOONER, J.; CLINTON, D.R.; BIDELESPACH, D.A. Hydraulic geometry relationships for rural north carolina coastal plain streams. NC Stream Restoration Institute, Report to N.C. Division of Water Quality for 319 Grant Project No. EW20011, www.ncsu.edu/sri, 11 p., 2003.

- DURY, G.H. Magnitude-frequency analysis and channel morphology. *Fluvial Geomorphology*. Allen and Unwin, p.91-121, 1973.
- DURY, G.H. Discharge prediction, present and former from channel dimensions. *Journal of Hydrology*, v.30, p.219-245, 1976.
- DURY, G.H.; HAILS, J.R.; ROBBIE, H.B. Bankfull discharge and magnitude-frequency series. *Australian Journal of Science*, v.26, p.123-124, 1963.
- FERGUSON, R. I. Hydraulics and hydraulic geometry. *Progress in Physical Geography*, v.10, p.1-31, 1986.
- FERNANDEZ, O. V. Q.; BORTOLUZZI, L. N. Magnitude e frequência das descargas dominantes em rios das regiões oeste e sudoeste do Paraná. In: VII Simpósio Nacional de Geomorfologia, Belo Horizonte-MG, Anais, 2008.
- GIBERTONI, R. F. C.; SANTOS, I.; MÜLLER, I. I.; PEREIRA, P. S. Modelagem da produção e transporte de sedimentos em bacias hidrográficas do litoral paranaense: o caso da bacia do Rio Nhundiaquara. In: XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Campo Grande-MS, UFMS, Anais, 18p., 2009.
- GORDON, N. D.; MCMAHON, T. A.; FINLAYSON, B. L. *Stream hydrology: an introduction for ecologists*. John Wiley & Sons Ltd, New York, 1992. 526p.
- HADADIN, N.; BDOUR, A. At-station hydraulic geometry for incised channels. *Journal of Applied Sciences*, v.5, p.1606-1612, 2005.
- HICKIN, E. J. Channel morphology bankfull stage and bankfull discharge of streams near Sydney, Australia. *Journal of Science*, v.30, p.274-275, 1968.
- KOBIYAMA, M.; CHAFFE, P.L.B.; ROCHA, H.L.; CORSEUIL, C.W.; MALUTTA, S.; GIGLIO, J.N.; MOTA, A.A.; SANTOS, I.; RIBAS JUNIOR, U.; LANGA, R. Implementation of school catchments network for water resources management of the Upper Negro River region, southern Brazil. In: Taniguchi, M.; Burnett, W.C.; Fukushima, Y.; Haigh, M.; Umezawa, Y. (Orgs.). *From Headwater to the Ocean: Hydrological changes and watershed management*. London: Taylor & Francis, p.151-157, 2009.
- LEOPOLD, L. B. *A View of the River*. Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, 1994. 290p.
- LEOPOLD, L.B.; MADDOCK, T. The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications. *United States Geological Survey, Prof. Paper*. 252, 56p, 1953.
- LEOPOLD, L. B.; WOLMAN, M. G.; MILLER, J.P. *Fluvial Processes in Geomorphology*. W.H. Freeman and Company, San Francisco, 1992. 522p.
- LIMA, J. E. F. W.; LOPES, W. T. A.; SILVA, E. M.; VIEIRA, M. R. Diagnóstico hidrossedimentológico da bacia do Rio Piquiri. *Boletim de pesquisa e desenvolvimento, Embrapa Cerrados*, n.134, 2004. 25p.
- MOSLEY, M. P. Critical depths for passage in braided rivers, Canterbury, New Zealand. *New Zeal. J. Mar. Freshwat. Res.*, v.16, p.351-357, 1982.
- MOSLEY, M. P.; JOWETT, I. G. Fish habitat analysis using river flow simulation. *New Zeal. J. Mar. Freshwat. Res.*, v.19, p.293-309, 1985.
- PARK, C. C. World-wide variations in hydraulic geometry exponents of stream channels: an analysis and some observations. *Journal of Hydrology*, v.33, p.133-146, 1977.
- PARK, C. C. Allometric analysis and stream channel morphology. *Geographical. Analysis*, v.10, p.211-228, 1978.
- PICKUP, G.; WARNER, R.F. Effects of hydrologic regime on magnitude and frequency of dominant discharge. *Journal of Hydrology*, v.29, p.51--75, 1976.
- 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, 1977.
- RIGGS, H.C. Streamflow characteristics from channel size. *Journal of the Hydraulics Division*, n.104, p.87-96 d, 1978.
- RILEY, S. J. Aspects of bankfull geometry in a distributary system of eastern Australia. *Hydrological Sciences Journal*, v.21, p.545-560, 1976.
- SIMONS, D. B.; RICHARDSON, E. V.; NORDIN, C. J. Sedimentary structures generated by flow in alluvial channels. *SEPM Special Publication*, v.12, p.34-52, 1965.
- STOUT, H. P. Prediction of oxygen deficits associated with effluent inputs to the rivers of the Forth catchment. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, v.2, p.51-64, 1979.
- SUDERHSA (Org.) *Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental*. Disponível em: <<http://www.suderhsa.pr.gov.br/>>.
- WILCOCK, D. N. Investigation into the relations between bed load transport and channel shape. *Geol. Soc. America Bull*, v.82, p.2159-2176, 1971.

Hydraulic Geometry in River Basins in Paraná

ABSTRACT

The theory of hydraulic geometry looks at changes in the shape of natural watercourses. This study analyzed the hydraulic geometry of the main river basins in the state of Paraná to assist in water resources management. For this purpose, hydraulic geometry was analyzed in certain cross-sections and along several Paraná rivers. Data from 448 rivergauging stations were used to analyze the section geometry. In this analysis it was observed that depth and velocity are more sensitive variables to increased flow than

cross-section width. In order to verify the influence of geology on mathematical relations of the hydraulic geometry of these sections, the exponents obtained were grouped according to type of geological formation, where the respective sections of these exponents are inserted. The main characteristic identified by means of triaxial diagrams of the group was the high stability of the channel banks. Only the sections of the main river in the basins studied were considered for analysis of the geometry in the downstream direction. A flow with a return time of 1.58 years was determined for this purpose. Outstanding in this analysis is that as the flow increased, the velocity of some rivers varied negatively along their channels. A high correlation of this flow was also found with the drainage area of the basins and a high correlation of the cross-section areas with their respective drainage areas. Thus, it was shown that hydraulic geometry is useful in flow regionalization studies and in supporting the consistency of rivergauging data.

Keywords: *Hydraulic geometry, Parana state basins, Geology, Canal adjustment; Dominant flow.*