

Geometria Hidráulica: Algumas Considerações Teóricas e Práticas

*Ederson Dias de Oliveira*¹

Resumo

Por meio de uma linguagem simples, foram realizadas algumas considerações sobre o conceito teórico e prático da geometria hidráulica relacionado à geomorfologia fluvial. O artigo se pautou numa revisão bibliográfica, com a apresentação de alguns estudos de casos, a fim de tornar uma leitura acessível. Os estudos envolvendo a geometria hidráulica são fundamentais para determinar o equilíbrio dinâmico do sistema fluvial. As pesquisas sob esta perspectiva permitem a análise das alterações e ajustes em canais fluviais sejam em ambientes naturais ou antropizados dado a sua dinâmica alométrico-sistêmica.

Palavras-chaves: Geomorfologia Fluvial; Planejamento Ambiental; Alometria Fluvial.

Hydraulic geometry: some considerations theoretical and practical

Abstract

Through of the simple language, were performed some considerations on the theoretical concept and practical of hydraulic geometry related to fluvial geomorphology. The article was based on a literature review, with the presentation of case studies in order to make reading accessible. The studies involving hydraulic geometry are essential to determine the dynamic equilibrium of the river system. The research from this perspective for examining the changes and adjustments in river channels are in natural and anthropogenic dynamics given its Allometric-systemic.

Keywords: Fluvial Geomorphology; Environmental Planning; Allometry River.

Introdução

Na atualidade os trabalhos envolvendo a rede de drenagem têm se ampliado a partir de uma visão multidisciplinar, sendo focados os processos e mecanismos observados no canal fluvial. Uma das temáticas constante dos estudos tem sido a relacionada com as alterações fluviais potencializadas pelas ações antrópicas como obras de engenharia no canal e uso indevido do solo nas bacias hidrográficas. Dessa maneira, a análise das características fluviais é importante não somente no que dizer respeito aos recursos hídricos, tanto do ponto de vista da hidráulica e do controle da erosão, como também do ponto de vista geomorfológico, sedimentológico, e do planejamento regional (SUGUIO e BIGARELLA, 1990).

1 Mestrado em Geografia (UNICENTRO). Contato: edersonjandaia@hotmail.com

Portanto faz-se necessário os debates científicos envolvendo os cursos fluviais, a fim de poder compreender os processos da dinâmica fluvial e contribuir para seu planejamento e manejo sustentável. Dessa maneira, o conhecimento da fisiografia fluvial envolvendo a geometria hidráulica (os tipos de leito, de canal, dos elementos das seções transversal e longitudinal, dos débitos fluviais, da rede de drenagem e etc.) é de suma importância para análise da dinâmica fluvial. Um dos pesquisadores pioneiros a trabalhar com a geometria hidráulica foram Leopold e Maddock em 1953 nos Estados Unidos, sendo amplamente utilizada na literatura geomorfológica. Para Christofolletti (1981) a geometria hidráulica se refere ao estudo das características geométricas e da composição dos canais fluviais, considerados a partir das relações alométricas que se estabelecem no perfil transversal fluvial.

As propriedades geométricas do canal fluvial apresentam formas distintas que são condicionados pela dinâmica das vazões, sendo vários os responsáveis pelas variações do regime fluvial. Entre os principais cabe destacar a variabilidade climática que favorece entradas desiguais no sistema fluvial, variando a descarga ao longo do ano. Também, a magnitude do débito fluvial e conseqüentemente todas as propriedades envolvidas na seção transversal se alteram ao longo do perfil longitudinal. Neste ínterim, o presente artigo objetiva discutir a dinâmica morfológica dos canais fluviais, a partir da teoria da geometria hidráulica, a fim de analisar sua aplicabilidade nos trabalhos envolvendo os canais fluviais e conseqüentemente suas contribuições para os estudos ambientais.

Vazão Fluvial

Como um dos principais responsáveis pela dinâmica morfológica dos rios, faz-se necessário um debate envolvendo a vazão fluvial. Essa se refere a uma das propriedades presentes nos cursos d'água que mais influencia nos processos agradacionais/degradacionais sendo responsável pela construção e manutenção das propriedades geométricas contidas na seção transversal. Para Penteado (1978), a água no seu percurso trata-se do agente mais efetivo nos processos de esculturação dos canais fluviais, sendo a carga sólida uma das ferramentas mais importantes nesse processo.

As principais entradas no sistema fluvial ocorrem por meio das águas superficiais e subterrâneas. Durante os períodos de chuvas predominam os fluxos superficiais (input), condicionando magnitudes de vazões elevadas (cheias e inundações), o que favorece

significativa energia aos processos morfogenéticos no canal. Já nas épocas em que as chuvas são menos frequentes o que predomina é o escoamento de base, período em que as vazões são menores (vazante) condicionando uma baixa energia do fluxo e dos processos deposicionais. Portanto, a variação do nível das águas no canal durante o ano determina o regime fluvial. O mesmo se mostra de maneira não uniforme, apresentando ciclos diferentes, que se comporta de acordo com os distintos períodos do ano (regime de vazante – cheia – vazante) (GUERRA, 1993).

O deflúvio pode ser quantificado, uma vez que o volume de água pode ser determinado pela unidade de tempo que passa sob determinada seção transversal constituindo a vazão, descarga ou débito do rio. Os monitoramentos das vazões geralmente são feitos em estações fluviométricas, que dispõem de históricos de monitoramento e das respectivas análises dos regimes fluviais de cada seção.

Para Christofolletti (1981) sob a perspectiva geomorfológica, três aspectos são significativos na análise da frequência e magnitude dos débitos fluviais: a frequência das cheias, a distribuição dos fluxos diários e a definição dos débitos de margens plenas. Para analisar a frequência das cheias são levados em consideração os históricos das estações fluviométricas referentes ao monitoramento do débito fluvial diário em determinada seção transversal. Dessa forma, é estabelecida a vazão que corresponde às cheias, analisando os débitos mais elevados que ocorrem no ano. Além da definição das vazões de cheias também são definidos os tempos de retorno referente a cada gradiente de vazão.

Vários fatores influenciam a variabilidade da magnitude e frequência das vazões na seção transversal e ao longo do perfil longitudinal. Essa dinâmica do regime fluvial possui importantes relações com a erosão, o transporte da carga sedimentar e a esculturação das propriedades geométricas da seção transversal. Portanto, as análises das cheias e o monitoramento dos débitos diários se constituem em um elemento de importante significado no setor de manejo e planejamento dos recursos hídricos e na instalação de obras setoriais nos canais fluviais.

Com relação à vazão de margens plenas, para Wolman e Leopold (1957) o seu nível corresponde a um plano horizontal no qual a descarga líquida preenche na medida justa a seção do canal fluvial antes de ultrapassar em direção à planície de inundação (Figura 1).

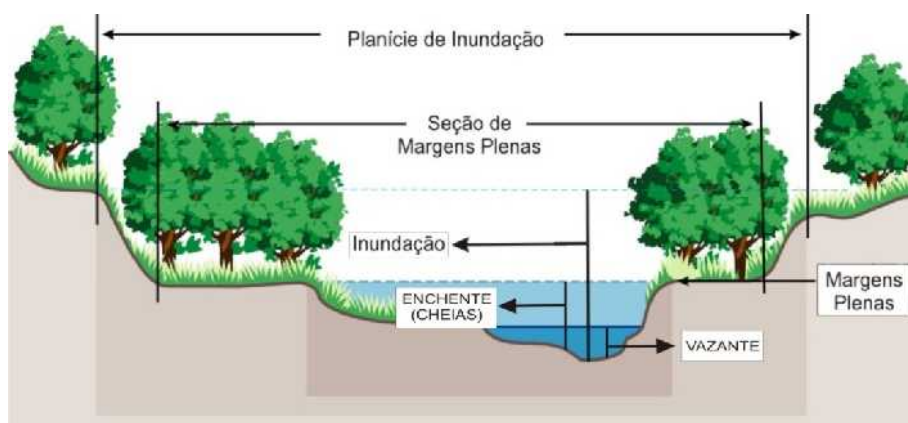


Figura 1 – Propriedades morfológicas da seção transversal

Fonte: Adaptado de FISRWG (1998).

O nível de margens plenas ou “*bankfull*” se refere a uma das características mais importantes presentes na seção transversal de um canal fluvial. Para Fernandez (2003) esse nível demarca o limite entre os processos fluviais que modelam o canal e os que constroem a planície de inundação. Trata-se de um nível com grande significado hidrológico e morfológico, sendo possível identificar em campo, pois ao contrário do nível do fluxo fluvial as margens plenas possuem certa “estabilidade”, sendo, portanto apropriado os estudos que as levem em consideração. Fernandez (2004) salienta que as margens plenas, bem como a sua vazão correspondente são de grande importância prática (obras de engenharia) e científica já que, nesse estado, o rio controla suas dimensões físicas devido aos processos erosivos e deposicionais.

A importância geomorfológica do estágio de margens plenas decorre da premissa de que a forma e o padrão dos canais fluviais estão ajustados ao débito, aos sedimentos fornecidos pela bacia de drenagem e ao material rochoso componente das margens. Dada à variabilidade dos fluxos, Leopold e Maddock (1953) consideram que os eventos de magnitude moderada e de ocorrência relativamente frequente controlam a forma do canal. Nessa categoria, os débitos de margens plenas surgem como os de maior poder efetivo na esculturação do modelado do canal, pois as ondas de fluxo escoam com ação morfogenética ativa sobre as margens e fundo do leito possuindo competência suficiente para movimentar o material detrítico.

Se, a princípio, a definição de margens plenas é relativamente simples, no entanto quando busca interpretar sua aplicabilidade e delimitação precisa no campo surgem muitas dificuldades. Na literatura há vários critérios cada qual com suas

vantagens e desvantagens, sendo que a escolha de um em detrimento de outro reside na prioridade do pesquisador e na finalidade da pesquisa. Williams (1978) *apud* Fernandez (2010) com base em inúmeros trabalhos definiu onze possíveis maneiras para determinar o nível de margens plenas (Quadro 1).

Quadro 1 - Relação dos critérios adotados para identificação do nível de margens plenas

Critérios baseados nas superfícies deposicionais	
1. A superfície do fundo do vale	(Nixon, 1959; Woodyer, 1968; Kellerhals et. al., 1972; Dury, 1973).
2. O nível da planície de inundação ativa	(Wolmam e Leopold, 1957; Leopold e Skibitzke, 1967; Emmmett, 1975).
3. O nível do patamar inferior	(Schumm, 1960).
4. O nível do patamar intermediário	(Woodyer, 1968).
5. O nível do patamar superior	(Kilpatrick e Barner Jr., 1964).
6. O nível médio das partes mais altas nas barras de canal	(Wolmam e Leopold, 1957; Hickin, 1968; Lewis e McDonald, 1973).
Critérios baseados nas características botânicas ou sedimentológicas	
7. Limite em que a vegetação se estabelece de maneira contínua e definitiva	(Schumm, 1960; Sigafos, 1964; Speigh, 1965; Nunnally, 1967; Leopold, 1994; Radecki-Pawlik, 2002).
8. O nível do limite superior de deposição de sedimentos tamanho areia	(Nunnally, 1967; Leopold e Skibitzke, 1967).
Critérios baseados na característica da seção transversal do canal	
9. Estágio associado com o valor mais baixo da relação entre a largura e a profundidade (W/D),	(Wolman, 1955; Harvey, 1969; Pickup e Warner, 1976).
10. Nível correspondente ao primeiro máximo no índice de Riley (bench index, BI)	(Riley, 1972).
11. O nível correspondente ao brusco aumento da relação área da seção transversal e largura do canal	(Williams, 1978).

Fonte: WILLIAMS, 1978 *apud* FERNADEZ, 2010.

Christofolletti (1981) com base em numerosos estudos envolvendo a geomorfologia fluvial salienta que o tempo de retorno de 1,58 anos de intervalo no sistema fluvial, corresponde ao estágio das cheias, sendo definido como o nível de margens plenas. Isto significa que em num determinado ano há uma chance de 67% de o rio ocupar sua capacidade máxima.

Assim, o nível de margens plenas e a vazão correspondente se mostram extremamente variadas, sendo sua definição dependente do critério adotado. Essa

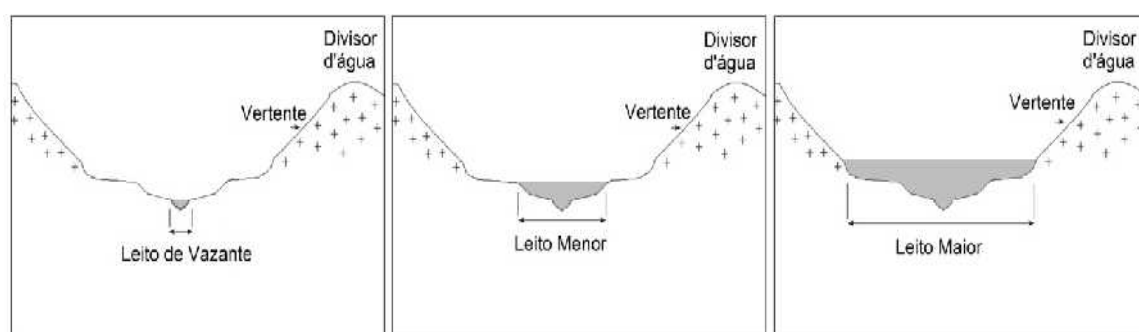
variação se deve a cada grandeza dos valores que podem apresentar disparidades dependendo do critério adotado, portanto os mesmos devem ser interpretados de maneira cautelosa. Dessa forma, ao se aplicar determinado critério, é necessário antes de tudo uma análise cuidadosa do objetivo do trabalho, com o propósito de apresentar dados os mais fidedignos possíveis.

Enfim, as margens plenas se tratam de um conceito muito complexo exigindo uma boa fundamentação do pesquisador para definir os critérios na sua aplicação teórica e prática. Pois, muitos desses termos teóricos quando aplicados no campo, podem apresentar dificuldade de mensuração, haja vista alguns empecilhos como: dificuldade de identificação das margens plenas, desequilíbrio da morfologia dos canais que altera a dinâmica do processo fluvial ou falhas no levantamento em campo.

Leitos fluviais

Os leitos fluviais se referem a uma feição morfológica com uma dinâmica própria, que podem ser identificados ao longo dos perfis longitudinais e transversais. Considerando a frequência das descargas e a consequente topografia dos canais, os leitos fluviais são classificados de acordo com o nível que ocupam na seção transversal (CUNHA, 2009). Considerando os espaços ocupados pelo escoamento das águas ao longo do curso fluvial, podem ser individualizados os seguintes leitos: vazante, menor (cheia) e maior (inundação). Na Figura 2, é possível notar por meio do perfil transversal, a maneira como estão dispostos os leitos no sistema fluvial (TRICART, 1966; ENOMOTO, 2004; ECKHARDT, 2008; CUNHA, 2009).

Figura 2 – Tipos de leito de um canal fluvial



a) Leito de vazante: se trata do leito de mais fácil visualização sendo aquele ocupado pelo débito fluvial de baixa magnitude. Este leito se refere à calha onde o rio percorre a maior parte do ano, sendo utilizado para o escoamento das águas baixas. O mesmo serpenteia entre as margens do leito menor acompanhando o talvegue (linha que une os pontos de maior profundidade ao longo do leito).

b) Leito menor: também denominado de calha principal, este leito se refere à área de abrangência das cheias, trata-se de um leito bem delimitado e encaixados entre as margens. A vegetação nesse leito é impedida de se desenvolver haja vista a frequência da vazão ser expressiva.

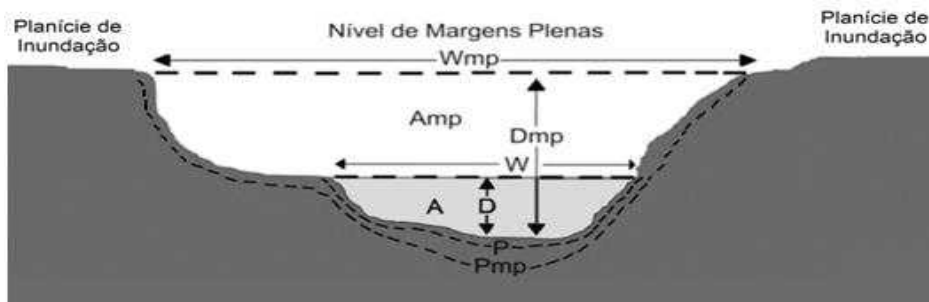
c) Leito maior: se refere ao leito que ocupa uma área mais abrangente que o leito menor, sendo também denominada de calha secundária, área marginal, planície de inundação, leito periódico ou sazonal, planície aluvial ou várzea. Esse leito é ocupado pelas inundações, que se referem às grandes vazões com período de retorno maiores. Considerando os tipos de leitos destacados, o limite entre o leito menor e maior corresponde ao nível de margens plenas, sendo este teoricamente o limite entre as enchentes e inundações.

Propriedades Geométricas da Seção Transversal

A seção transversal de um canal fluvial se trata da linha imaginária que intersecta um plano vertical com o vale do rio, perpendicular ao leito (Figura 03). Esse perfil é facilmente elaborado por meio de cartas topográficas onde é possível visualizar o talvegue, as margens do canal e as planícies adjacentes do curso principal. A seção transversal apresenta elementos geométricos de importância fundamental para os estudos abrangendo o sistema fluvial, sendo os mesmos estruturados pelo fluxo e o material sedimentar.

Os estudos envolvendo as variáveis de geometria hidráulica são amplamente utilizados nos estudos que tratam dos projetos de manejo e planejamento dos cursos fluviais. A Figura 3 e o Quadro 2 apresentam os principais elementos geométricos presentes na seção transversal e suas descrições.

Figuras 3 - Variáveis morfológicas presentes na seção transversal



Fonte: Fernandez (2004).

Quadro 2 - Variáveis geométricas que descrevem a morfologia de uma seção transversal

Variável	Símbolo	Definição	Observações	Unidade
Referência: nível d'água				
Largura superficial	W		Comprimento da linha horizontal da área molhada.	Metros
Profundidade média do fluxo	D	$(\sum D_i)/n$	D_i são valores da profundidade do fluxo obtidos ao longo da seção transversal e n o número de medições.	Metros
Área molhada	A	W. D	Área da seção transversal ocupada pela água.	Metros ²
Perímetro molhado	P		Comprimento da linha de contato entre a superfície molhada e o leito.	Metros
Raio hidráulico	Rh	A/P	Quociente da área molhada pelo perímetro molhado.	Metros
Declividade da linha d'água	S		Declividade da linha d'água no sentido longitudinal em metros por metros	Metros
Referência: cota do nível de margens plenas				
Largura do canal	Wmp		Wmp é medida em nível de margens plenas.	Metros
Profundidade média do canal	Dmp	$(\sum D_i)/n$	D_i são valores de profundidade do canal medidos com referência ao nível de margens plenas e n o número de medições.	Metros
Área da seção transversal	Amp	$W_{mp} \cdot D_{mp}$	Amp indica a área da seção transversal em nível de margens plenas.	Metros ²
Perímetro do canal	Pmp		Comprimento do leito ao longo da seção transversal, medido abaixo do nível de margens plenas.	Metros
Raio hidráulico	Rhmp	A_{mp}/P_{mp}	Quociente da área da seção de margens plenas pelo perímetro em nível de margens plenas.	Metros

Fonte: Fernandez (2004).

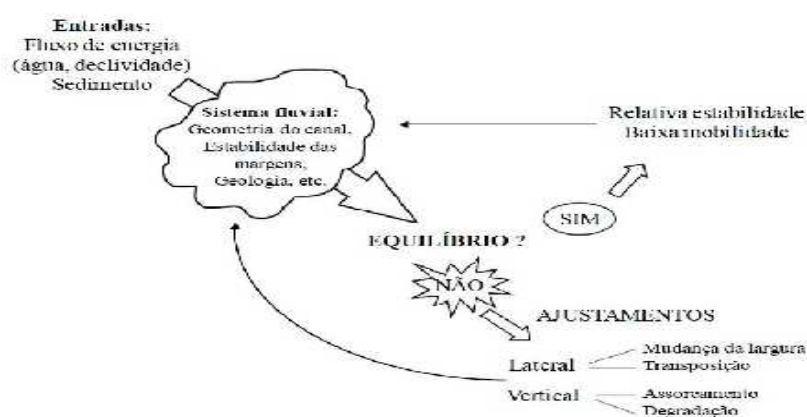
As dimensões das variáveis geométricas contidas na seção transversal não são arbitrárias, ou seja, resultam da interação de fatores relacionados à carga de detritos,

suas dimensões médias, quantidade, litologia, formas deposicionais e fluxo d'água. Os estudos envolvendo as variáveis geométricas consideram dois níveis de análise. O nível da linha d'água que corresponde ao débito do canal e varia ao longo do ano de acordo com o regime fluvial. E também o nível que margens plenas que se refere à área compreendida entre as margens das seções transversais estabilizadas que são estruturadas pelas vazões de maior magnitude.

Destarte, quando as características das águas ou detritos de um canal são alteradas, antropicamente por mudanças da proteção da cobertura vegetal no solo da bacia ou por mudanças climáticas, o sistema do canal se ajusta para o novo conjunto de condições. Portanto, o canal fluvial é formado e mantido pelo fluxo que ele transporta, porém, nunca está ajustado o suficiente para transportar sedimentos sem que ocorra uma inundação. Com isso a variação do equilíbrio do canal é uma das condicionantes para o avanço do débito fluvial na direção das planícies adjacentes ao leito principal (DUNNE e LEOPOLD, 1978).

O ajustamento da calha fluvial é definido pela resistência do leito, a estabilidade das margens e a geometria do canal. Seu equilíbrio está atrelado aos ajustes das entradas no sistema que se acomodam por meio dos movimentos laterais e verticais da geometria do canal. Pela Figura 04, é possível observar o comportamento de um sistema fluvial em equilíbrio e desequilíbrio, sendo que quaisquer que for a dinâmica que atuar no canal, esse sempre buscará um novo equilíbrio por meio de ajustes nas suas margens e leito (RICHARD, 2001).

Figura 4 - Ciclo de ajustamento de um canal fluvial - adaptado de Richard (2001)



Portanto o ajuste do canal segue uma ciclicidade, para Christofolletti (1981) a erosão e a deposição fluvial são dois processos que atuam na modificação da forma do rio. O canal passa a ser erodido a partir do momento em que há o aumento gradativo do nível d'água incrementando a velocidade do fluxo e a força de cisalhamento. Se ocorrer o contrário, há uma diminuição gradativa no volume do fluxo na seção ocorrendo o incremento de carga detrítica vindo da área de montante. Dessa forma, a deposição dessa carga conseqüentemente promove a elevação do nível do leito. Segundo Rosgen (1996) o equilíbrio do canal, ocorre quando a dinâmica envolvendo a vazão e a carga de sedimentos produzidos na bacia sucede de tal forma que os processos agradacionais e degradacionais do canal se equivalem.

Aspectos da Geometria Fluvial

Os primeiros trabalhos teóricos e práticos objetivando analisar as características de comportamento do canal foram desenvolvidos por Leopold e Maddock (1953). Eles definiram a geometria hidráulica como uma medida quantitativa das propriedades da seção transversal; largura, profundidade média, velocidade, carga sedimentar e rugosidade que ajudam a determinar a forma de um curso d'água natural (GRISON, 2010). Essas propriedades são alteradas quando há variação do débito fluvial numa determinada seção transversal de um rio como simples funções potenciais diferidas apenas em seus coeficientes e expoentes.

Os métodos de trabalhos envolvendo a geometria hidráulica podem ser estudados de duas maneiras: em determinada seção transversal (estações fluviométricas) ou ao longo do perfil longitudinal do curso d'água. A primeira prevê as mudanças na largura, profundidade e velocidade com a variação da vazão, enquanto a geometria hidráulica ao longo do perfil longitudinal prevê a adaptação do tamanho e da forma do canal de acordo com a vazão ao longo do rio (FERGUSON, 1986).

A geometria hidráulica em uma seção transversal

A dinâmica do regime fluvial ao longo do ano implica em ajustamentos e alterações na largura, profundidade, velocidade, concentração de sedimentos, rugosidade entre outras variáveis da seção transversal. Dessa forma, com o aumento da vazão na seção ocorre um incremento na profundidade, na velocidade do fluxo, na largura da seção, uma pequena diminuição da rugosidade hidráulica e mudança na declividade superficial da água. A maior alteração, entretanto ocorre na carga de sedimentos em

suspensão que aumenta rapidamente e em maior proporção que qualquer outra variável (LEOPOLD e MADDOCK, 1953). As principais variáveis da geometria hidráulica de seções são representadas pelas seguintes equações:

$$w = {}_a Q^b \quad (01)$$

$$d = {}_c Q^f \quad (02)$$

$$v = {}_k Q^m \quad (03)$$

$$l = {}_p Q^j \quad (04)$$

$$s = {}_r Q^z \quad (05)$$

onde Q é a vazão (m^3/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 a declividade superficial da água (m/m); a, c, k, p, r são coeficientes; e b, f, m, j, z são expoentes.

Nos trabalhos envolvendo a geometria hidráulica, os parâmetros mais empregados é a vazão, dada pelo produto da velocidade pela área da seção. Dessa forma, as equações 1 e 3 são as mais utilizadas podendo ser relacionadas da seguinte forma:

$$Q = {}_{ack} Q^{b+f+m} \quad (06)$$

então:

$$b + f + m = 1 \quad (07)$$

$$a \cdot c \cdot k = 1 \quad (08)$$

Os valores das vazões ao serem plotados em gráficos numa escala logarítmica com as outras variáveis geométricas da seção transversal resultam em relações 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 dessas equações representam interseção das retas quando a vazão é a unidade e por isso não são muito importantes para a geometria hidráulica (LEOPOLD e MADDOCK, 1953).

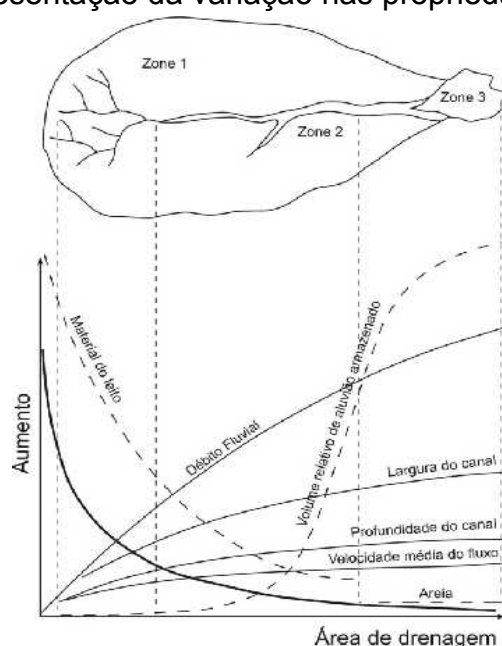
A geometria hidráulica no perfil longitudinal

A geometria hidráulica ao longo do perfil longitudinal prevê a adaptação do tamanho e da forma do canal de acordo com a vazão ao longo do rio. As comparações entre as diversas seções transversais devem ser feitas considerando os débitos com frequência ou intervalo de recorrência similar. Como já visto na morfologia fluvial, o débito de maior significância é o de margens plenas (*bankfull*), que constrói e mantém a forma do canal. Com isso a geometria hidráulica no perfil longitudinal pode ser estabelecida somente para uma frequência constante de vazão, sendo comumente empregada à vazão no nível de margens plenas (LEOPOLD et. Al, 1964; LEOPOLD, 1994).

Portanto, a análise da geometria hidráulica ao longo do perfil longitudinal em nível de margens plenas é muito valiosa para engenheiros, hidrólogos, geomorfólogos e biólogos, que participam dos processos de restauração e proteção dos rios (DOLL et. al. 2003). Seus estudos foram realizados comparando as variáveis hidráulicas entre varias seções transversais dentro de um curso d'água, sendo que as descargas aumentam no sentido de montante - jusante, progressivamente, com uma maior área de captação.

As correlações envolvendo o estudo da geometria hidráulica podem ser feito a partir das relações vazão x propriedades geométricas da seção transversal e também, área de drenagem x propriedades geométricas da seção transversal. Charlton (2008), por meio de um modelo demonstrou a relação entre a área de drenagem e as propriedades geométricas do canal (Figura 5).

Figura 5 – Representação da variação nas propriedades do canal numa bacia



Fonte: Adaptado de Charlton (2008).

Leopold e Maddock, (1953) destacam que há correlações positivas bem ajustadas entre os parâmetros geométricos do canal fluvial e a área de drenagem, portanto há um ajuste alométrico da largura, profundidade média e velocidade do fluxo com relação área de contribuição das seções transversais.

A relação das variáveis geométricas obtidas em nível de margens plenas, com a área da bacia foi denominada por Dunne e Leopold (1978) de curvas regionais ou geometria hidráulica em nível de margens plenas. Estas permitem analisar o comportamento das variáveis dependentes naquele nível de referencia em resposta ao incremento da área da bacia, sendo importantes para projetos de restauração de cursos d' água, pois demonstram as condições de equilíbrio fluvial. Dessa maneira, são apresentadas as equações gerais que representam essas correlações, abaixo:

$$Q_{mp} = \alpha_1 A_D^{\alpha_2} \quad (09)$$

$$W_{mp} = \alpha_3 A_D^{\alpha_4} \quad (10)$$

$$D_{mp} = \alpha_5 A_D^{\alpha_6} \quad (11)$$

$$A_{mp} = \alpha_7 A_D^{\alpha_8} \quad (12)$$

Onde **Qmp** é a vazão em nível de margens plenas (m³/s); **Wmp** e a largura de margens plenas (m); **Dmp** e a profundidade com margens plenas (m); **Amp** é a área da seção transversal com margens plenas (m²); **AD** e a área de drenagem (km²); α_1 , α_3 , α_5 , α_7 são coeficientes e α_2 , α_4 , α_6 , α_8 são expoentes de regressão.

A importância da geometria hidráulica

O estado de equilíbrio dos canais fluviais é um conceito que tem recebido atenção crescente por parte de vários ramos da ciência. Para analisar a dinâmica desse sistema existem variadas metodologias, que ao seu modo procuram contribuir no entendimento do equilíbrio fluvial. Na atualidade, tem sido uma constante as pesquisas envolvendo os recursos hídricos, destacando-se também os canais fluviais urbanos, haja vista o efeito que vem sofrendo em decorrência da urbanização.

Os estudos envolvendo a morfologia dos cursos fluviais são ainda incipientes no Brasil, os mesmos são essenciais para tratar da dinâmica envolvendo o débito fluvial e conseqüentemente a descarga de sedimentos. Esses trabalhos também são importantes para analisar o equilíbrio dos canais das áreas urbanas que sofreram intervenções por

obras de engenharia, sendo várias as metodologias de análise dos sistemas fluviais entre as quais se destacam a geometria hidráulica. Dessa maneira, ao se empregar a geometria hidráulica, é possível estabelecer o grau de desajuste dos canais fluviais e suas potencialidades em interferir no ambiente.

Wolman e Schick (1967) esclarecem que os cursos urbanos têm sofrido efeitos da urbanização, parte devido à produção excessiva de sedimentos provenientes das atividades de construções, potencializando o assoreamento do leito e a redução na capacidade dos canais. Amplas evidências têm indicado um aumento notável na produção de sedimentos, principalmente nas áreas desmatadas para posterior ocupação urbana.

Gregory e Park (1974) investigaram as mudanças de vazões e ajustes de um canal fluvial a jusante de um reservatório, por meio da teoria da geometria hidráulica. Ao relacionarem a área da seção e a vazão com a área de drenagem em períodos de vazante e cheia, observaram mudanças na morfologia do canal após a construção da barragem. Foi observada uma diminuição substancial da capacidade do canal (Amp) a jusante da barragem, persistindo o mesmo por cerca de onze quilômetros. Outra mudança foi à diminuição das vazões de cheias que diminuiu 40% em relação ao período anterior a construção da obra.

Harman *et al.* (1999) estabeleceram as equações regionais da geometria hidráulica para cursos d'água na área rural na Carolina do Norte. As equações mostraram uma forte relação entre o nível de margens plenas dos cursos d'água juntamente com outras variáveis como: profundidade, largura, vazão dominante e a área de drenagem dos cursos d'água. Esse estudo, apenas confirmou os estudos pioneiros de Leopold sobre a estabilidade da geometria de canais em área pouco alterada.

Fernandez (2004) empregou a geometria hidráulica de jusante em nível de margens plenas em canais urbanos na cidade de Marechal Cândido Rondon. Os resultados mensurados apresentaram baixas correlações nas relações das geométricas dos canais. Esses desajustes são influenciados pelos efeitos da urbanização que provocam alterações na forma dos canais e geram desequilíbrio nas relações entre a área da bacia hidrográfica e as variáveis presentes na seção transversal.

Vieira e Cunha (2006) ao avaliarem a capacidade dos canais da bacia do Rio Paquequer localizado na área urbana de Teresópolis identificaram grandes diferenças nas proporcionalidades do tamanho dos canais em direção à jusante causadas por obras setoriais e pela presença de pontos assoreados. Na bacia, as relações geométricas foram desajustadas em sete sub-bacias pesquisadas, sendo que destas, três apresentaram

correlações fracas e negativas. Dessa maneira, os coeficientes de relação variaram de $r^2 = -0,676$ à $r^2 = 0,285$. Os resultados demonstram o quanto os rios foram modificados pela urbanização, de maneira que não há proporcionalidade entre as seções transversais e as respectivas áreas da bacia. Cabe destacar ainda, que a área tem sofrido com inundações potencializadas pelos desajustes na geometria hidráulica dos canais.

Essa problemática é comum nas cidades, sendo nítido o aumento das vazões máximas devido ao processo de urbanização. Essas alterações se devem ao grande volume de água e sua grande energia que escoam da área urbana principalmente nos eventos de chuvas concentradas. Dessa maneira os canais fluviais têm suas características morfológicas alteradas, estando seu gradiente de efeito relacionado com a proximidade da área urbana. Cabe destacar também, o incremento da densidade de drenagem artificial, que lança nos rios toda água acumuladas nas áreas impermeabilizadas.

Chin (2006) salienta que após estudo detalhado de diversos trabalhos sobre as alterações da urbanização nos ambientes fluviais em diferentes partes do planeta se notou profundas alterações nas características morfológicas dos canais fluviais. Para o autor os núcleos urbanos têm alterado os regimes hidrológicos e sedimentológicos, causando uma série de adaptações morfológicas, sendo que em 75% dos trabalhos se observou o alargamento dos canais. Outra consequência da urbanização nítida na maioria dos grandes centros também é o aumento no tamanho do material do leito e de substâncias químicas, biológicas e ecológicas.

Cunha (2008) após analisar vários trabalhos envolvendo bacias urbanas no estado do Rio de Janeiro elencou alguns das principais alterações na rede de drenagem como: a alteração da morfologia dos canais, com a implantação de obras setoriais e o acúmulo de sedimentos/resíduos ao longo das margens e leitos; alargamento dos canais em trechos naturais além dos desastres naturais que tem sido potencializado pelo aumento na magnitude das vazões; canalização dos cursos fluviais em decorrência das obras de infraestrutura urbana que têm contribuído na alteração dos valores da densidade de drenagem dos canais fluviais.

Dias-Oliveira *et. al.* (2010), estudaram parte das alterações urbanas no ajuste da geometria hidráulica no Córrego Siriema na cidade de Jandaia do Sul, onde se notou pronunciados efeitos nos canais fluviais próximos da área urbana do município. Grande parte do trecho de montante esta impermeabilizado, o que tem potencializado mudanças nos processos hidrogeomorfológicos e, conseqüentemente, alterações na geometria e na

qualidade da água do córrego. A densidade de drenagem na área urbana da bacia apresentou-se quatro vezes maior do que a da área rural, resultante do incremento da densidade de drenagem artificial.

Dias-Oliveira (2011) por meio de estudo envolvendo geomorfologia comparativa na cidade de Guarapuava/Pr, analisou a geometria hidráulica de jusante em nível de margens plenas em arroios urbanos e rurais. Os levantamentos evidenciaram que a urbanização tem contribuído significativamente nas alterações da morfologia dos canais fluviais, sendo observados vários trechos urbanos no sentido de montante/jusante com relações geométricas desajustadas. De modo geral, tomando os valores médios da área urbana de Guarapuava foi determinada uma média de 7,0 m² de área da Amp nos trechos urbanos, ao passo que o valor médio determinado na área rural pelo modelo empírico foi de apenas 2,33 m², o que revela uma média da área da Amp urbana três vezes maiores que a Amp rural.

Apesar de ainda os estudos em nível de Brasil serem incipientes, é possível observar algumas das contribuições da temática em estudos de caso. Enfim se trata de um amplo leque de alterações complexas sentidas na dinâmica dos processos hidrológicos e conseqüentemente das propriedades geométricas dos canais fluviais. Estas têm potencializado a ocorrência de alguns fenômenos e alterações nos ambientes rurais e urbanos como: a ocorrência de enchentes e inundações cada vez mais comuns; desajustes dos canais fluviais; o desequilíbrio da carga de sedimentos fluviais; o incremento de resíduos nos rios potencializando a contaminação dos cursos fluviais; o rebaixamento das reservas subterrâneas e sua contaminação; a canalização em massa dos rios urbanos e também o incremento de doenças de veiculações hídricas (TUCCI, 2003).

Considerações finais

Pelas discussões ao longo do presente trabalho, podem-se perceber as relevantes contribuições que a geometria hidráulica pode fornecer nos estudos envolvendo os canais fluviais. Por meio de uma linguagem simples, foi analisado o conceito da geometria hidráulica bem como sua aplicabilidade na geomorfologia.

Os estudos envolvendo a geometria hidráulica se mostraram fundamentais para determinar o ajuste dinâmico do sistema fluvial. Os mesmos comportam a análise das alterações na forma do canal, sendo que esta se ajusta de maneira alométrica, já que seus valores se alteram de acordo com as transformações na bacia hidrográfica. A

comparação entre seções individualizadas do canal fluvial possibilita analisar a influência do uso da terra sobre os canais e inferir mensurações sobre os processos a partir das dimensões do canal.

Quando se trata de áreas urbanas, podem contribuir significativamente com o planejamento urbano, à medida que permitem ações no sentido de minimização dos efeitos das enchentes e inundações; e do dimensionamento e redimensionamento das seções fluviais em projetos urbanos. Além dos projetos de infraestrutura urbana, são possíveis outras várias aplicações dos estudos de geometria hidráulica tanto pelo viés ecológico como social.

Referências

CHARLTON, Ro. *Fundamentals of Fluvial Geomorphology*. New York: Madison Avenue, 2008.

CHIN, Anne. Urban transformation of river landscapes in a global context. *Geomorphology*, nº 79, p. 460-487, Set. 2006.

CHRISTOFOLETTI, Antônio. *Geomorfologia Fluvial: o canal fluvial*. São Paulo: Edgard Blucher, v.01, 1981.

CUNHA, Sandra Baptista da. Morfologia dos Canais Urbanos. In POLETO, Cristiano. (org.) *Ambiente e Sedimentos*. Porto Alegre: ABRH, 2008, p. 329-356.

CUNHA, Sandra Baptista da. Geomorfologia Fluvial. In Guerra, Antônio José Teixeira e CUNHA, Sandra Baptista da (orgs.). *Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos*. 9ª ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2009.

DIAS-OLIVEIRA, Éderson, CRESTANI-MAGALHÃES, Guilherme Aurélio, SOUZA, Patrícia de; VESTENA, Leandro Redin. A urbanização e seus impactos na densidade de drenagem e na geometria hidráulica do Córrego Siriema, Jandaia do Sul/PR. *Terra Plural*, v.4, p.257/2-271, 2010.

DIAS-OLIVEIRA, Éderson. *Impactos da Urbanização na Geometria Hidráulica de Canais Fluviais da Bacia Hidrográfica do Rio Cascavel, Guarapuava/PR*. 2011. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Programa de Pós-graduação em Geografia, UNICENTRO, Guarapuava-PR.

DOLL, Barbara A, DOBBINS, Angela. D, SPOONER, Jean, CLINTON, Daniel. R. e BIDELSPACH, David. A. Hydraulic geometry relationships for rural north Carolina coastal plain streams. *Stream Restoration Institute*, Report to N.C. Division of Water Quality, 2003.

DUNNE, Thomas; LEOPOLD, Luna B. *Water in Environmental Planning*, San Francisco: W.H. Freeman Co, 1978.

- ECKHARDT, Rafael Rodrigo. *Geração de modelo cartográfico aplicado ao mapeamento das áreas sujeitas às inundações urbanas na cidade de Lajeado/RS*. 2011. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto e Meteorologia) – Programa de Pós-graduação em Sensoriamento Remoto, UFRGS, Porto Alegre, 2008.
- ENOMOTO, Carolina Ferreira. *Método para elaboração de mapas de inundação: estudo de caso na bacia do rio Palmital, Paraná*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) - UFPR, Curitiba, 2004.
- FERGUSON, Robert I. Hydraulics and hydraulic geometry. *Progress in Physical Geography*, v.10, p.1-31, 1986.
- FERNANDEZ, Oscar Vicente Quinonez. Determinação do nível e da descarga de margem plena em cursos fluviais. *Boletim de Geografia*, UEM, nº 21, p. 97-109. 2003.
- FERNANDEZ, Oscar Vicente Quinonez. Relações da geometria hidráulica em nível de margens plenas nos córregos de Marechal Cândido Rondon, região oeste do Paraná. *Geosul*, Florianópolis, v. 19, n. 37, p. 115-134. 2004.
- FERNANDEZ, Oscar Vicente Quinonez. Determinação da descarga dominante em estações fluviométricas das regiões Oeste e Sudoeste do Paraná. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v.11, n.1, p.69-74. 2010.
- FISRWG – The Federal Interagency Stream Restoration Working Group. *Stream corridor restoration: principles, processes and practices*. Federal agencies of the US gov't, 1998.
- GREGORY, K. J. e PARK, C. Adjustment of River Channel Capacity Downstream From a Reservoir. *Water Resources Research*, v.10, p. 870-873. 1974.
- GRISON, Fernando. *Geometria Hidráulica de Bacias Hidrográficas Paranaenses*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - UFSC, Florianópolis, 2010.
- GUERRA, Antônio Teixeira. *Dicionário Geológico Geomorfológico*. 8ª ed. Rio de Janeiro: IBGE, 1993.
- HARMAN, William et al. Bankfull hydraulic geometry relationships for North Carolina streams. In: *Wildland Hydrology Symposium Proceedings*. Edited By: D.S. Olsen and J.P. Potyondy. 1999. AWRA Summer Symposium. Bozeman, MT.
- LEOPOLD, Luna Bergere. Flood Hydrology and the Floodplain, in *Coping with the Flood: The Next Phase*, White, G.F., and Myers, Mary F., ed. *Water Resources Update*. Spring issue, 1994.
- LEOPOLD, Luna Bergere, WOLMAN, M. Gordon; MILLER, John P. *Fluvial processes in Geomorphology*. San Francisco: W. F. Freeman and Co, 1964.
- LEOPOLD, Luna Bergere e MADDOCK, T. The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications. United States Geological Survey, Prof. Paper. 252, 1953, p. 56.
- PENTEADO, Margarida Maria. *Fundamentos de Geomorfologia*. Rio de Janeiro: IBGE, 1978.

- RICHARD, Gigi A. *Quantification and prediction of lateral channel adjustments downstream from cochiti dam, Rio Grande, NM*. 2001.
- ROSGEN, David L. *Applied River Morphology. Wildland Hydrology*. Pagosa Springs, CO. 1996.
- SUGUIO, Kenitiro e BIGARELLA, João José. *Ambientes fluviais*. 2ª ed. Florianópolis: Ed. UFSC. 1990, p.183.
- TRICART, Jean. Os tipos de leitos fluviais. *Notícias Geomorfológicas*, 6 (11): p. 41-49, 1966.
- TUCCI, Carlos Eduardo Morelli. Inundações e Drenagem Urbana. In: TUCCI, Carlos Eduardo Morelli e BERTONI, Juan Carlos. (orgs.) *Inundações Urbanas na América do Sul*, Porto Alegre: ABRH, p.45-129, 2003.
- VIEIRA, Viviane Torres e CUNHA, Sandra Baptista da. Mudanças na Rede de Drenagem Urbana de Teresópolis (Rio de Janeiro). In: GUERRA, Antônio José Teixeira e CUNHA, Sandra Baptista da. (orgs.) *Impactos Ambientais Urbanos no Brasil*. 4ª ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, p.111-145. 2006.
- WILLIAMS, G. P. Bankfull discharge of rivers. *Water Resources Research*, 14(6), p.1141-1154. 1978.
- WOLMAN, M. Gordon e LEOPOLD, Luna Bergere. *River flood plains: some observations on their formation*. United States Geological Survey, Prof. Paper, 1957.
- WOLMAN, M. Gordon e SCHICK, A. P. Effects of construction on fluvial sediment: urban and suburban areas of Maryland. *Water Resources Research*, 3 (2), p. 451–464. 1967.