

ALTERAÇÃO DE CURVA-CHAVE DEVIDO A ASSOREAMENTO: CASO DA ESTAÇÃO DE FLÓRIDA, MS

Luiz Henrique Maldonado¹; Paulo Everardo Muniz Gamaro²; Jéssica Martins dos Santos³; Francisco de Athaydes Martins⁴.

RESUMO --- As correlações nível x vazão, ou curvas-chave, são amplamente utilizadas na área de Recursos Hídricos para estimativa de vazão, sendo um modo de baixo custo, contínuo e aplicável a qualquer estação fluviométrica. Entretanto, modificações do leito interferem diretamente na validade das curvas-chave. Assim, para determinar o impacto de um assoreamento sobre uma curva-chave, foi utilizada como estudo de caso a Estação de Flórida, rio Amambai. Por intermédio de medições de vazão e levantamentos batimétricos de 1989 a 2014, nota-se que a área molhada da seção reduziu em 43%, redução da vazão de 42% e aumento do nível médio de 1,96m para 2,80m. Assim, a partir das variações identificadas, foi necessária a determinação de três curvas-chave para a Estação, sendo que cada curva corresponda a um período. Aplicando cada curva-chave para o respectivo período, nota-se que houve uma diminuição da vazão média, conclusão contrária se aplicada uma única curva-chave para todo o período. A representação da realidade hidrológica e hidráulica de uma seção fluviométrica só foi possível de se obter em função das coletas contínuas de campo. Deste modo, nota-se a importância do monitoramento hidrométrico, assim como a relação intrínseca entre assoreamento de uma seção e a validade de uma curva-chave.

ABSTRACT --- Correlations level x discharge, or rate curves, are widely used in water resources area, to estimate discharge for any Gauge Station. However, modifications of the bedstream, in the cross section of gauge stations, affect directly at the validity of the rate curves. Thus, to determine the impact of sedimentation on a rate curve, was used the Florida Station, in Amambai River – MS, for a case study. Through flow measurement and bathymetric surveys in a period of 1989 to 2014, it was observed that the wet section area reduced by 43% and there was a reduction in flow of 42%, considering the average water level 2,31m. Furthermore, were observed an increase in the average level of 1.96m to 2.80m, caused by sedimentation. Through the changes of flow and area at cross section, there were proposed three rate curves for the Station, each curve corresponding to a period. Therefore, to represent the hydrological and hydraulic reality of a fluviometric section, it requires constant field sampling, continuously, and that geometric changes, such as sedimentation, generate large impacts on the application of rate curves.

Palavras-Chave: Sedimento, vazão, monitoramento hidrológico.

¹ Engenheiro da UHE Itaipu Binacional; Av. Tancredo Neves, 6731, Foz do Iguaçu, PR. E-mail: lhmaldo@itaipu.gov.br

² Engenheiro da UHE Itaipu Binacional; Av. Tancredo Neves, 6731, Foz do Iguaçu, PR. E-mail: pemg@itaipu.gov.br

³ Estagiária de Engenharia Ambiental da UHE Itaipu Binacional; Av. Tancredo Neves, 6731, Foz do Iguaçu, PR. E-mail: martinsj@itaipu.gov.br

⁴ Técnico da UHE Itaipu Binacional; Av. Tancredo Neves, 6731, Foz do Iguaçu, PR. E-mail: fmartins@itaipu.gov.br

1. INTRODUÇÃO

O planejamento e a gestão de recursos hídricos dependem de informações confiáveis tanto no que diz respeito à demanda como à oferta de água. Em relação à disponibilidade de água, só poderá ser adequadamente estimada se existirem redes de monitoramento que gerem dados sobre variáveis que indiquem a qualidade e quantidade disponível, conhecendo também a variabilidade espacial e temporal das águas superficiais (Braga *et.al.*, 2006).

A vazão de um rio é uma das principais variáveis utilizadas na gestão dos recursos hídricos. Essa variável indica a quantidade de água que é possível obter da bacia hidrográfica em função do tempo, sendo importante para determinar a disponibilidade hídrica para os usos múltiplos da água (Tucci, 2013).

De acordo com Tucci (2013), existem diversos métodos para medir a vazão de um curso d'água. Porém em alguns casos, não é possível, na prática, conhecer diretamente a descarga em um dado instante, sendo os monitoramentos demorados e caros o que impede frequentes medições de vazão de uma seção. Segundo a Resolução Conjunta da Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL e Agência Nacional de Águas - ANA Nº 3/2010, parágrafo 3º, “o monitoramento fluviométrico compreende em um conjunto de ações e equipamentos destinados ao levantamento de dados do nível d'água, bem como medições de descarga líquida”. Ao contrário da medição de vazão, o nível d'água é considerado uma variável de fácil medição e de baixo custo.

Em função disso, as medições de vazão são realizadas com o objetivo de determinar a relação entre o nível da água do rio em uma seção e a sua vazão. Esta relação é denominada curva-chave, sendo possível transformar medições diárias de cota, que são relativamente baratas, em medições diárias de vazão (Collischonn & Dornelles, 2013).

Os dados de vazão assumem grande importância para se obter a previsão de vazões futuras e para estimar a frequência de eventos que possam dificultar o gerenciamento dos recursos hídricos. Sendo então, necessário conhecer o comportamento das velocidades e vazão do rio em função da sua cota. A curva-chave é uma ferramenta capaz de suprir essa necessidade.

No entanto, mesmo supondo-se que o método da curva-chave forneça resultados satisfatórios, julga-se necessário fazer aferições com dados medidos, pois a relação que existe entre a vazão e a cota é uma função muito complexa que envolve características geométricas e hidráulicas (Jacon & Cudo, 1989).

Segundo Jacon & Cudo (1989), o leito define as condições do escoamento por meio da sua forma geométrica e pela rugosidade. Um dos problemas essenciais para a relação cota-descarga tem sido o desconhecimento da variabilidade no tempo destas duas características.

As alterações no meio físico, como o assoreamento na seção transversal, interferem na qualidade dos dados hidrológicos oriundos da curva-chave. Na busca de aumentar a confiabilidade da curva-chave e minimizar as incertezas referentes às informações hidrológicas, faz-se necessário o estudo das alterações e interferências no leito ao longo do tempo, que podem ser observadas através das medições de vazão em uma determinada estação fluviométrica, assim como por intermédio de levantamentos topobatimétricos.

Portanto, tendo em vista a necessidade e importância do conhecimento da vazão dos cursos d'água, definiu-se como objetivo deste estudo avaliar as mudanças em uma curva-chave devido ao aporte de sedimentos, a partir de medições de vazão realizadas no período entre 1989 a 2014 na Estação de Flórida, no rio Amambai, no estado do Mato Grosso do Sul – Brasil.

2. METODOLOGIA

2.1. Área de estudo

A bacia hidrográfica do rio Amambai possui 7.252 km² e drena a região onde se encontram os municípios sul mato-grossenses de Amambai, Aral Moreira, Caarapó, Iguatemi, Itaquiraí, Juti, Laguna Carapã, Naviraí, e Ponta Porã. A rede hidrográfica é constituída pelo rio Amambai que percorre aproximadamente 340 km até sua foz no rio Paraná.

O presente estudo foi realizado na Estação de Flórida, código ANA 64.715.001, está localizada no rio Amambai, Latitude 22° 97' 04,1"S, Longitude 54° 56' 41,3"W (WGS84), na cota de 261 metros, na altura do Município de Juti, Estado de Mato Grosso do Sul (Figura 1).

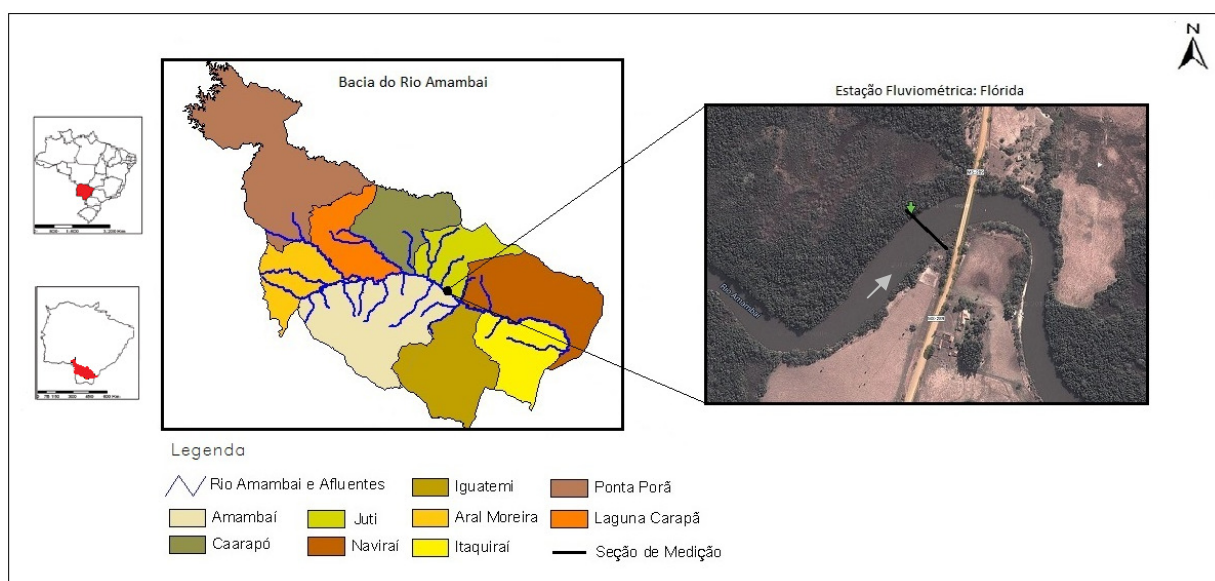


Figura 1 - Localização da área de estudo

Fonte: Vasconcelos & Paranhos Filho (2010), Adaptado.

A estação fluviométrica foi instalada pelo Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica - DNAEE/CPRM em 1972, e por se tratar de um afluente do rio Paraná sendo uma área de interesse energético da UHE Itaipu Binacional, a estação é operada pela empresa desde 1989.

A seção de medição possui aproximadamente 78 metros de largura e está situada a 150 metros a montante da seção de réguas, localizada na margem esquerda do rio Amambai. Estão instaladas 8 lances de réguas para a leitura do nível d'água.

De 1972 a 1988, o DNAEE realizou 122 medições de vazão nesta estação, e partir de 1989 até o ano de 2014 foram realizadas 98 medições pela Itaipu Binacional. As vazões medidas variaram de 52 a 477 m³.s⁻¹.

2.2. Medições de vazão

Para se determinar as curvas-chave é necessário conhecer um certo número de pares cota-vazão medidas em condições reais. Existem diversas formas para se obter a vazão em um corpo hídrico, realizadas sob procedimentos distintos. Segundo Tucci (2013), a medição das velocidades do fluxo da água é o método mais utilizado, representando mais de 80% das medições de vazão realizadas no mundo, e no Brasil em particular. Os equipamentos medidores utilizados na Estação de Flórida no período em estudo foram: Molinete, ADCP 600 kHz, ADCP 1200 kHz e ADP M9. Foram realizadas 98 medições de descargas líquidas entre junho de 1989 a setembro de 2013.

Até o ano de 2000 as medições de velocidade do fluxo foram obtidas apenas com o método tradicional (molinete), totalizando 48 medições com esse equipamento. A partir de 2001, os equipamentos *Doppler* foram inseridos no monitoramento desta estação, somando 42 medições acústicas, sendo: 30 medições com ADCP 600 kHz, 6 com ADCP 1200 kHz e 6 medições utilizando o ADP M9, e outras 8 medições com o molinete (Figura 2).

Com o uso da tecnologia *Doppler* para medição de vazão, em 2005 foi realizada a primeira verificação de fundo móvel na Estação de Flórida. O fundo móvel refere-se a uma carga de sedimento de fundo que interfere nas medições acústicas de vazão. Quanto maior a frequência do medidor acústico (ADCP), maior será o erro em função do fundo móvel e, assim, menor será a vazão final. Deste modo, foi identificado que as medições acústicas de vazão na Estação de Flórida apresentavam erros devido ao fundo móvel, sendo estes erros variáveis em função do modelo de medidor acústico *Doppler* (*e.g.*, frequência), assim como, em função das condições hidrológicas (*e.g.*, estiagens, cheias, etc). A partir da identificação do erro de fundo móvel, foi aplicado um método de correção de fundo móvel (*e.g.*, subseção e loop), obtendo, assim, a vazão real.



Figura 2 - Equipamentos: ADP M9, ADCP WHRG e Molinete.

Analisando a série histórica de dados medidos e adotando o critério de níveis com valores aproximados, foram utilizadas duas medições de vazão com o ADCP 600 kHz realizadas em março de 2002 e fevereiro de 2012, com níveis de 2,26m e 2,31m respectivamente, com o intuito de comparar a área da seção transversal e as condições de medição através do gráfico de velocidades em magnitude obtido do software de processamento do equipamento (WinRiver).

2.3. Topobatimetria

A topobatimetria consiste na determinação do formato da seção transversal ao rio. Na estação de Florida é realizada desde 1993, com uma periodicidade de 2 ou 3 anos. No levantamento topobatimétrico foi definido o relevo submerso do rio Amambai na seção transversal e a topografia do seu entorno até a cota de 6,57m (margem direita) e 5,23m (margem esquerda), consideradas como cota de extravasamento.

Dentre os levantamentos batimétricos realizados em Flórida, foram comparados os perfis transversais levantados em agosto de 1993, setembro de 2003 e abril de 2013.

2.4 Curva-chave

Para a determinação de uma curva-chave, deve-se relacionar algumas medições de vazão (Q), em diferentes condições hidrológicas, com as respectivas leituras de nível d'água (h). Toda relação $h \times Q$ (cota $\times$ vazão) pode ser representada, na sua totalidade ou por trechos sucessivos, por expressões matemáticas: forma exponencial (Eq. 1) e forma polinomial (Jacon & Cudo, 1989).

$$Q = c \cdot (h - a)^n \quad (1)$$

Sendo: Q : vazão ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$);

h : nível d'água (m);

a : altura do nível d'água correspondente a vazão nula;

c e n : coeficientes da estação.

Os coeficientes da Equação 1 (c e n) são determinados aplicando o método dos mínimos quadrados no conjunto de medições de vazão realizadas na seção, com as respectivas leituras de

nível d'água, em um gráfico logarítmico (Hershy, 1978).

A curva-chave vigente da estação havia sido elaborada em junho de 2004, com auxílio do Hymos, através de 17 medições de vazão entre julho de 1997 a maio de 2004, realizadas pela Itaipu. Na sequência segue apresentada a equação da curva-chave da área de estudo para $0,50 < H < 7,50\text{m}$:

$$Q = 44,734 \cdot (H - 0,4101)^{1,239} \quad (2)$$

Entretanto, as curvas-chave são dinâmicas e podem se modificar com o tempo, como a presença de planícies de inundação, assim como modificações das seções ou canais de controle à jusante (*e.g.*, modificação do leito por assoreamento) (Kennedy, 1984). Quando forem identificadas alterações da geometria da seção, deve-se determinar uma curva-chave correspondente a cada período ao longo do tempo.

2.5 Medição do nível d'água

Uma vez determinada a curva-chave, pode-se estimar a vazão do rio apenas monitorando o nível d'água (N.A.) (Porto *et. al.*, 2001). Em Flórida são realizadas leituras manuais nas régua limnimétricas três vezes ao dia, às 7, 12 e 17 horas, desde 1982. A partir da série histórica de N.A., determinou-se a curva de permanência para o período, e o N.A. médio foi determinado como sendo o nível de 50% de probabilidade de ocorrer na curva de permanência.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para verificação da curva-chave vigente (Equação 2), foram plotadas as medições de vazão realizadas pela Itaipu, desde 1989 a 2014 (Figura 3).

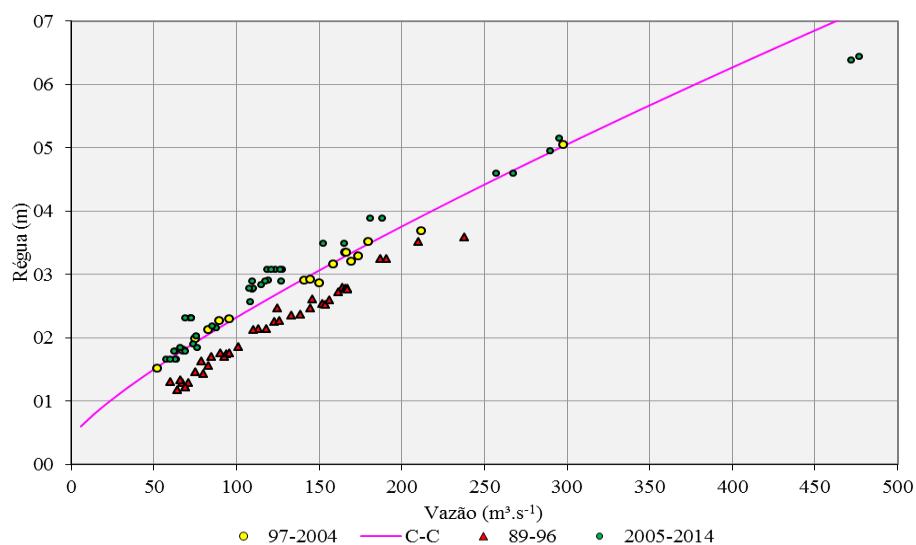


Figura 3 - Medições de Vazão (89-96, 97-2004 e 2005-2014) e Curva-chave de 2004.

Segundo a Figura 3, nota-se que está ocorrendo uma diminuição da vazão medida ao longo do tempo, considerando um nível d'água (N.A.) constante. Além disso, as vazões medidas podem ser divididas em três grupos: de 1989 a 1996; 1996 a 2010 e 2010 a 2014 (Figura 3).

De forma a verificar alteração do N.A., ao longo do tempo, foram criadas três curvas de permanência correspondentes para cada período identificado (Figura 4).

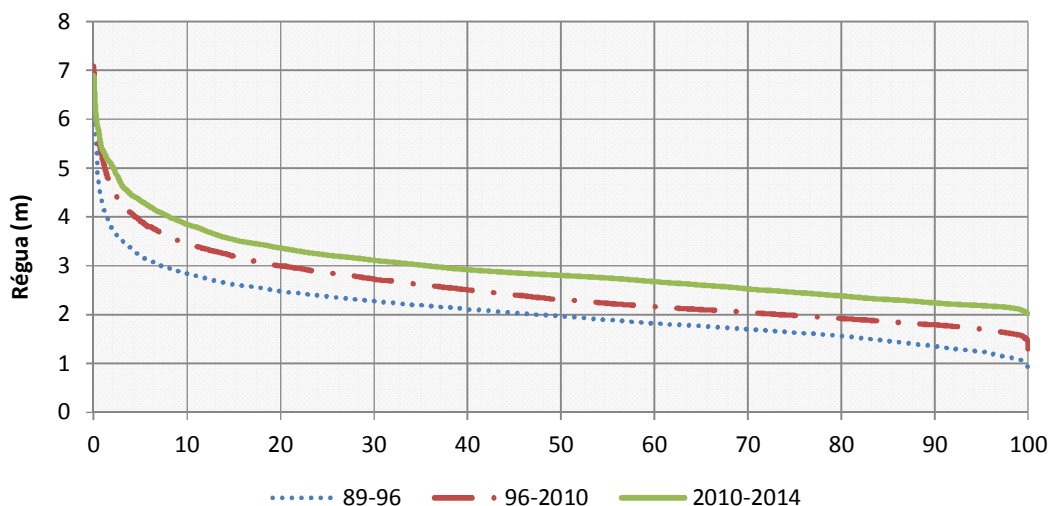


Figura 4 - Curvas de Permanência para os períodos de 1989-1996, 1996-2010 e 2010-2014.

Considerando as curvas de permanência (Figura 4), os níveis d'água correspondentes a 50% são de 1,96m (1989 a 1996), 2,30m (1996 a 2010) e 2,80m (2010 a 2014). Assim, há um aumento de 84 cm do N.A. médio. O N.A. médio de todo o período é de 2,31m (1989 a 2014).

Para o caso da Estação de Flórida, deduzir-se-ia que a vazão estaria aumentando ao longo do tempo, em função do respectivo aumento do N.A. Entretanto, o aumento de vazão não é conclusivo, visto que as vazões medidas indicam vazões inferiores às estimadas com a curva-chave vigente.

Em função das inconsistências acima verificadas, foi analisado o comportamento de uma possível variação da área molhada da seção de medição ao longo do tempo. Comparando as batimetrias realizadas em agosto de 1993, setembro de 2003 e abril de 2013, identificou-se que está ocorrendo um assoreamento na seção de medição de Flórida, no rio Amambai (Figura 5).

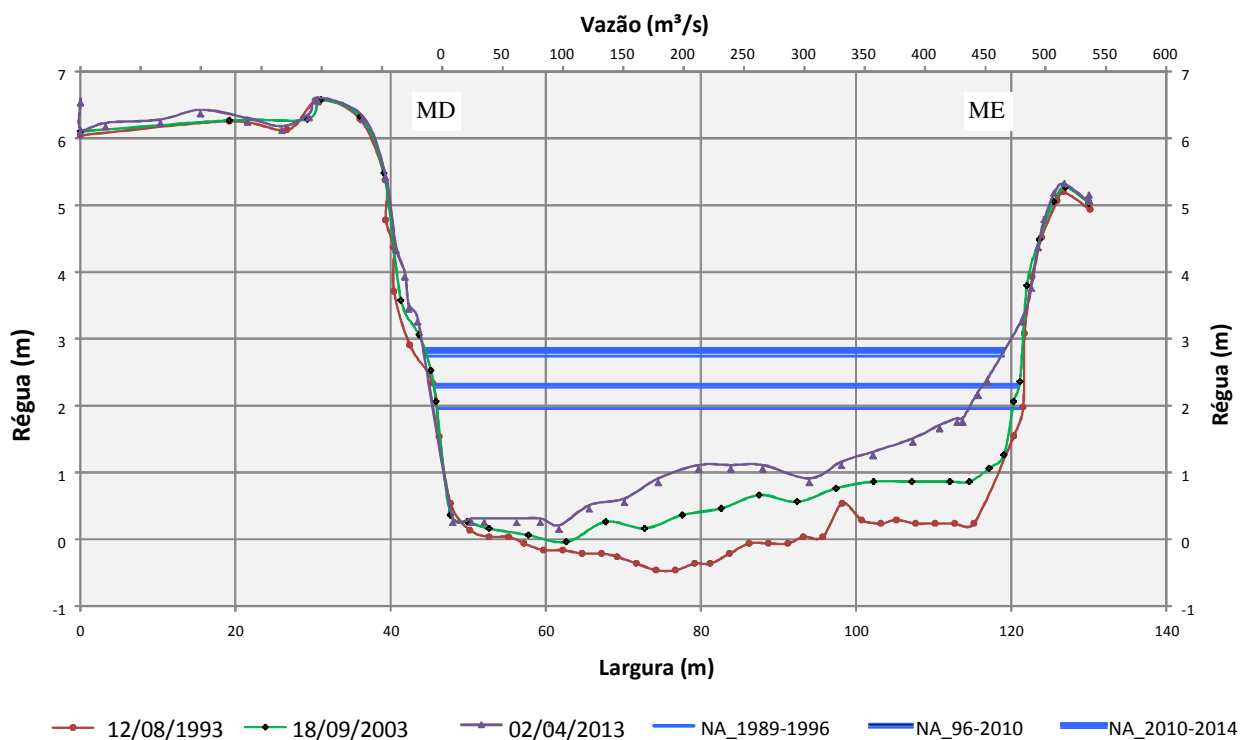


Figura 5 - Levantamentos topobatimétricos realizados na Estação de Flórida e N.A médio dos períodos determinados.

Com os resultados das batimetrias (Figura 5), nota-se que está ocorrendo um processo de assoreamento da calha principal do rio ao longo do tempo, e em consequência dessa redução da área molhada na seção transversal, observou-se que houve o aumento do nível d'água médio. A quantidade maior de sedimento depositado está posicionada entre o trecho central do canal e a margem esquerda (ME), entre as larguras de 80 a 120 metros. O motivo de um maior depósito de sedimento na ME é explicado em função da curva presente à montante da seção de medição (Fig.1).

Considerando o nível d'água (N.A.) médio de 2,31 metros, a área correspondente para cada batimetria é de:

1993: 168 m²;

2003: 132 m² (redução de 21% comparada com o ano de 1993);

2013: 96 m² (redução de 43% comparada com 1993 e 27% com 2003).

Considerando a cota de extravasamento de 5,23m na ME (borda plena), a área correspondente para cada período é de:

1993: 407 m²;

2003: 369 m² (redução de 38m² ou 9 % comparada com 1993);

2013: 329 m² (redução de 78m² ou 19% comparada com 1993).

As medições com os equipamentos *Doppler* também permitem a comparação do perfil batimétrico da seção em diferentes períodos. As Figuras 6 e 7 apresentam as seções transversais

obtidas pelas medições de vazão com ADCP 600 kHz, na Estação de Florida, em 2002 e 2012, respectivamente, com N.A. similares.

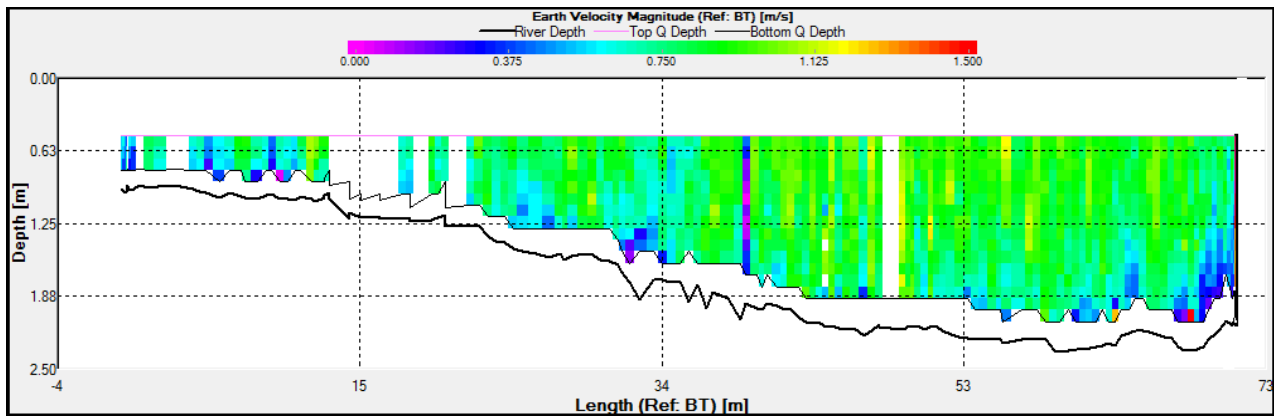


Figura 6 - Medição de vazão com ADCP 600 kHz (WS10 e WM5) para 2002 e N.A. = 2,26m.

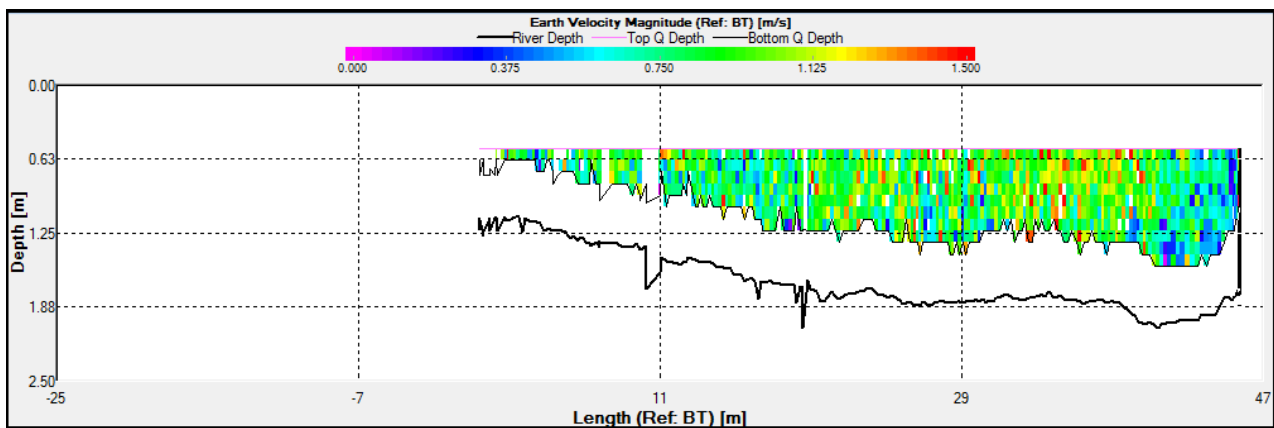


Figura 7 - Medição de vazão com ADCP 600 kHz (WS10 e WM12) para 2012 e N.A. = 2,31m.

Conforme a separação das vazões medidas em três grupos (Figura 3), em função das modificações das vazões obtidas ao longo do tempo, assim como das modificações das topobatimetrias e da série histórica de nível (N.A.), para cada período foram determinados os coeficientes (a , c e n) das respectivas curvas-chave, aplicando o método dos mínimos quadrados.

Assim, as curvas-chaves para cada período foram determinadas e estão indicadas pelas Equações 3, 4 e 5 e Figura 8, correspondentes a um intervalo de níveis d'água entre 1 m e 6,5m:

Período de: 1989 a 1996 (Desvios médios de vazão entre: -3,2 e 5,3%):

$$Q = 30,70 \cdot (h + 0,45)^{1,42049} \quad (3)$$

Período de: 1997 a 2009 (Desvios médios de vazão entre: -4,4 e 4,7%):

$$Q = 27,68 \cdot (h)^{1,50452} \quad (4)$$

Período de: 2010 até 2014 (Desvios médios de vazão entre: -3,4 e 3,6%):

$$Q = 16,45 \cdot (h)^{1,80467} \quad (5)$$

Através da representação gráfica dos dados obtidos, é possível identificar as variações das vazões e das curvas-chave em função das modificações do leito (assoreamento) (Figura 8).

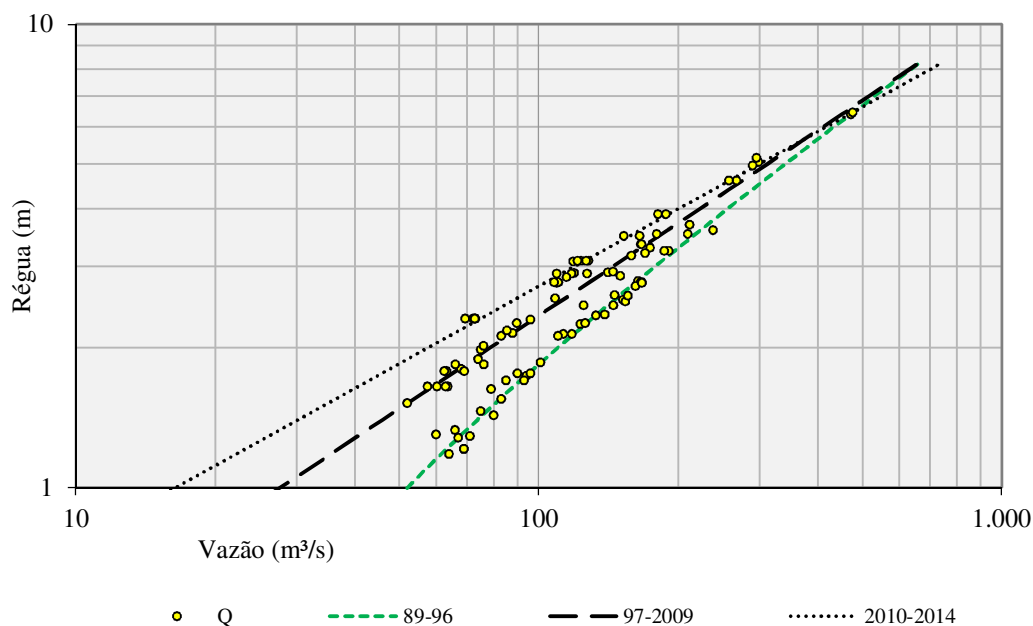


Figura 8 - Medições de vazão e as curvas-chaves dos três períodos.

Para as cotas superiores a borda plena (acima de 5,2m na ME) deve-se utilizar a curva-chave com ressalvas, pois quase não há medições de vazão nestas condições. Assim, deve-se realizar novas medições de vazão quando ocorrer uma condição de cheia e verificar, assim, a validade do tramo superior da curva-chave proposta.

Por intermédio das curvas-chave válidas para cada período (Equações 3, 4 e 5), foi determinado hidrograma para a Estação de Flórida e comparado com o hidrograma até então utilizado como vigente para todo o período (Figuras 9 e 10). A aplicação de uma única curva-chave (Figura 9) sugere um aumento de vazão ao longo do tempo. Entretanto, a aplicação de curvas-chave correspondentes, sugere uma diminuição de vazão ao longo do tempo (Figura 10).

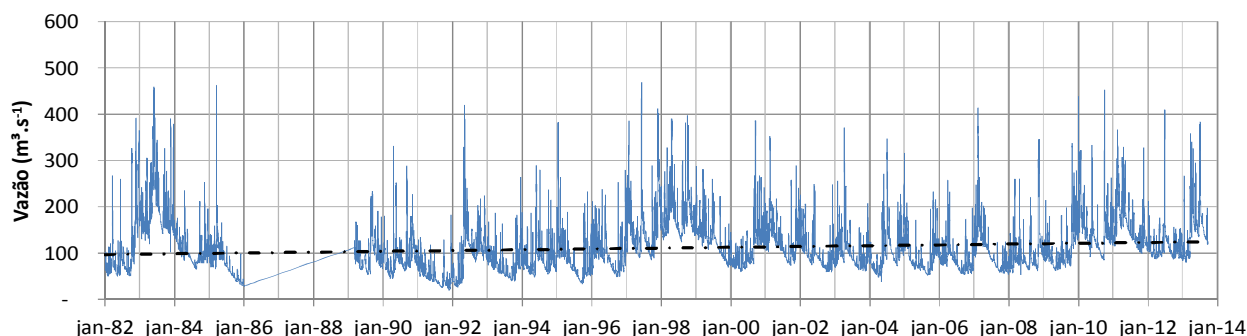


Figura 9 – Hidrograma para a Estação de Flórida, considerando uma única curva-chave (Eq.2).

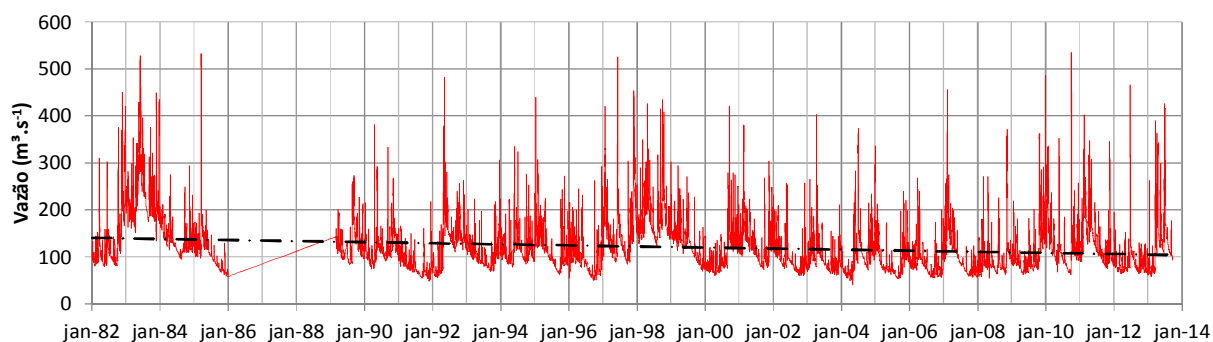


Figura 10 – Hidrograma de Flórida, considerando três curvas-chave (Eq. 3,4 e 5).

Entretanto, considerando os eventos extremos (cheias), nota-se que o hidrograma da Figura 10 indica vazões superiores ao da Figura 9. Assim, o assoreamento ocorrido na seção, modificou as condições hidráulicas da seção, com aumento do N.A. médio, redução da vazão média ao longo do tempo e aumento da vazão na condição de cheia.

4. CONCLUSÃO

A decisão de escolher a melhor curva comparada a outra existente (ou a uma tabela de calibragem) é baseada nos desvios de vazão estimados pela curva comparada à vazão medida. A melhor equação que descreve o comportamento hidráulico da seção é aquela que apresenta os menores desvios de vazão ao longo do período.

Uma curva-chave pode apresentar mais de uma equação, em função das características hidráulicas e geométricas, assim como possa haver mais de uma curva-chave na série histórica de vazão (hidrograma) para uma mesma estação. Como a Estação de Flórida está passando por um processo de assoreamento ao longo do tempo, deve-se aplicar uma curva-chave para cada período do hidrograma (mudança da curva ao longo do tempo).

Considerando o nível médio de 2,3m foi verificado que há uma redução da área molhada de 43%, por intermédio das batimetrias (período de 1993 a 2013) e uma redução de 42% da vazão, de $130 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ para $75 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (período de 1989 a 2013). Entretanto, verificou-se que o nível médio para cada período aumentou de 1,96m (1989 a 1996) para 2,80m (2009 a 2014). Além disso, o aumento do nível d'água ocasiona aumento da probabilidade de ocorrência dos extravasamentos.

Assim, o assoreamento ocorrido na seção de Flórida, rio Amambai, modificou as condições hidráulicas da seção, ocasionando aumento do N.A. médio, redução da vazão média ao longo do tempo e aumento da vazão na condição de cheia.

A variação de vazão identificada (40%), em função da aplicação de uma única equação para todo o período de tempo, indica a importância de constantes coletas de dados de campo, como medições de vazão e batimetrias. Sem as coletas de campo ao longo do tempo, conclusões errôneas podem ser geradas, prejudicando o gerenciamento dos recursos hídricos.

BIBLIOGRAFIA

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA; AGÊNCIA NACIONAL DE Águas (2010). *Resolução conjunta nº 3 de 10 de agosto de 2010*. Brasil. 6p

BRAGA, B.; PORTO, M.; TUCCI, C.E.M. (2006). *Águas doces do Brasil: capital ecológico, uso e conservação*. Org. por Rebouças, A. C, Braga, B. e Tundisi, J. G. 3.ed. – São Paulo: Escrituras Editora. pp. 739-748.

COLLISCHONN W.; DORNELLES F. (2013). *Hidrologia para engenharias e ciências ambientais*. Vol 1. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS: ABRH. 310p.

Hershey, R.W. (1978). *Hydrometry - Principles and Practices*. Universidade de Michigan : John Wiley and Sons Australia., 511p.

JACCON. G.; CUDO. K. J. (1989). *Curva-Chave. Análise e Traçado*. Brasília, DNAEE . 273p.

KENNEDY, J. E. (1984). *Discharges Ratings at Gaging Stations*. Chapter A10. Book 3. Applications of Hydraulics.

PORTO, R.; FILHO, K.; SILVA, R. (2003). *Apostila de hidrologia aplicada*. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo- Departamento de engenharia hidráulica e sanitária. 49p.

TUCCI, C.E.M. (2013) *Hidrologia: ciência e aplicação*- 4.ed. 5ª.reimp. - Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS: ABRH, 943p.

VASCONCELOS, B.R.; PARANHOS FILHO, A.C. (2010). *Sensoriamento remoto na cobertura do solo na bacia hidrográfica do rio Amambai-MS*. In anais do 48º Congresso da Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural. Universidade Católica Dom Bosco, Campo Grande – MS. 19p.