

**XXVIII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
BUENOS AIRES, ARGENTINA, SEPTIEMBRE DE 2018**

CURVA-CHAVE OBTIDA POR SIMULAÇÃO HIDRODINÂMICA

Franciele Maria Vanelli, Leonardo Romero Monteiro e Fernando Mainardi Fan

Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS/IPH, Brasil

franciele.vanelli@ufrgs.br; leonardoromeromonteiro@gmail.com; fernando.fan@ufrgs.br

RESUMO:

As incertezas da estimativa de vazão pelo método da curva-chave são discutidas em muitos trabalhos, principalmente ao se referir aos valores obtidos pela extrapolação da curva-chave. O emprego desses dados estimados, cujas incertezas não são fornecidas, em estudos para propagação das vazões pode incidir em resultados não representativos da realidade. O método tradicional para obtenção da curva-chave consiste em algumas simplificações, como se limitar aos dados para obtenção de tendências, sem avaliar condições físicas. Com base nisso, o presente estudo propõe estabelecer a relação nível de água e vazão pela aplicação de modelagem hidrodinâmica possibilitando a extrapolação dos limites superiores dessa relação considerando as condições físicas da seção transversal. Para tal, utiliza como dados de entrada apenas informações de uma estação fluviométrica (seção transversal, cota e descarga líquida) com os quais realiza a calibração do modelo hidrodinâmico. Posteriormente, com o modelo calibrado, realiza-se a simulação para a faixa de valores superior aos dados existentes, a fim de extrapolar a relação nível de água e vazão estabelecida levando em consideração as características da seção transversal. O uso de simulação hidrodinâmica não elimina as incertezas referente às maiores vazões, entretanto, por considerar as condições físicas do trecho do rio, pode contribuir para análise dos dados disponibilizados e auxiliar na obtenção de uma relação cota-vazão mais confiável.

ABSTRACT:

Several studies have shown the discharge uncertainties obtained using rating curves, especially when referring to the values obtained by the rating curve extrapolation. The use of these estimated data, whose uncertainties are not provided, may have results that are not representative of reality. The traditional rating curve consists in some simplifications, such as using only the data to obtain line trends, without evaluating physical conditions. This study proposes to establish the stage-discharge relation through the application of hydrodynamic modeling allowing the extrapolation of the upper limits of this relation considering the physical conditions of the cross section. It uses as input data only information from a gauge station (cross section, stage and discharge) with which it performs the calibration of the hydrodynamic model by changing Manning number. Then, with the calibrated model, the simulation is performed for the range of values higher than the existing data, in order to extrapolate the stage-discharge relation established taking into account the characteristics of the cross section. The use of hydrodynamic simulation does not eliminate the uncertainties related to the higher flow rates, however, considering the physical conditions of the river stretch, can contribute to the analysis of the data available and help in obtaining a more reliable stage-discharge relation.

PALAVRAS-CHAVES: relação nível de água e vazão; incerteza; modelo hidrodinâmico.

INTRODUÇÃO

A medição de vazão é um procedimento de elevado custo e durante eventos de cheia pode ser difícil e perigosa (Corato et al., 2014). Um método aplicado para estimar a vazão consiste em estabelecer uma relação denominada curva cota-vazão ou curva-chave, utilizando um determinado intervalo de dados medidos em campo de nível de água (cota) e de vazão (descarga líquida). Para contemplar valores inferiores ou superiores aos observados, é realizada a extrapolação dessa relação, que, em geral, é representada na forma potencial (Mosley e McKerchar, 1992).

A estimativa da vazão pela aplicação da curva-chave consiste na leitura do nível de água na respectiva seção do rio com o auxílio de réguas linimétricas e na inserção desse dado na equação ou tabela da curva-chave definida previamente. Apesar de bastante utilizado, muitos estudos apontam a significativa incerteza na estimativa da vazão por esse método, principalmente na zona de extrapolação (e.g. Dymond e Christian (1982); Clarke (1999); Clarke et al. (2000); Westerberg et al. (2011); Di Baldassare e Claps, P. (2011); Domeneghetti et al. (2012); Oliveira et al., (2016); entre outros).

No Brasil, de acordo com a Agência Nacional de Águas – ANA (2014), a leitura da régua ocorre no máximo duas vezes ao dia e no mínimo uma vez ao dia, com possibilidade de dias de falhas. Dependendo do tempo de resposta da área de drenagem, o valor máximo ou mínimo do nível de água pode ocorrer entre os intervalos de leituras, perdendo-se a possibilidade de registro dessa informação e incrementando as incertezas na medição. Em alguns casos, outra fonte de incerteza pode ser a influência do efeito de remanso que pode causar histerese na relação nível de água e vazão (Pappenberger et al., 2006).

As hipóteses assumidas pelo método tradicional de elaboração da curva-chave, o tornam bastante simplificado, acarretando no acréscimo de incertezas ao valor de vazão estimado. Uma dessas simplificações, refere-se a considerar o escoamento em regime permanente, ou seja, uma relação unívoca entre o nível de água e vazão (ANA, 2014; Domeneghetti et al. 2012; Oliveira et al., 2016). Por se tratar de uma análise estatística, o método tradicionalmente aplicado para obtenção da curva-chave se limita aos dados existentes. Entretanto, as relações nível de água e vazão para valores altos são pouco conhecidas, pois, normalmente, para altos níveis de água não são realizadas medições de vazão devido à periculosidade da tarefa, levando a escassez de dados nos valores de máxima. Sem a inclusão de valores amostrais mais altos e sem considerar as condições físicas do trecho de rio, como por exemplo, a ocorrência de níveis de água altos que acarretam o extravasamento do leito menor do corpo hídrico, a extrapolação da curva-chave pode não ser mais representativa, pois a alteração da seção fluvial gera mudança na curva de tendência (Oliveira et al., 2016).

O uso dos modelos hidrodinâmicos com auxílio dos dados topográficos disponíveis pode contribuir para efetuar a análise hidráulica de trechos do rio. Com o modelo calibrado, os dados topobatimétricos da seção podem fornecer uma relação cota-vazão que abrange naturalmente a extrapolação da relação cota-vazão obtida por dados medidos, podendo reduzir as incertezas associadas aos valores de vazões elevadas. Di Baldassare e Claps (2011) ressaltam que a incerteza decorrente da calibração do modelo para baixas vazões e seu uso para simular altas vazões não pode ser negligenciada. Uma tentativa de reduzir a incerteza da calibração baseada apenas em uma pequena faixa de valores medidos, consiste em calibrar o coeficiente de Manning para vazões máximas a partir de eventos de inundação bem documentados. Di Baldassare et al. (2009) realizaram a calibração do modelo hidrodinâmico para a inundação ocorrida em outubro de 2000 no Rio Po, Itália, permitindo que em estudos posteriores, Di Baldassare e Claps (2011) e Domeneghetti et al. (2012) empregassem essa calibração para realizar a extrapolação da relação nível de água e vazão e para que outras análises fossem realizadas. Além disso, Di Baldassare e Claps (2011), considerando as incertezas associadas ao uso de simulação numérica, apontam que a quantificação da incerteza do modelo pode ser realizada pela técnica de estimativa da incerteza de probabilidade generalizada (GLUE - *Generalized Likelihood Uncertainty Estimation*) possibilitando que a

extrapolação da relação nível de água e vazão seja apresentada com a respectiva incerteza do modelo hidrodinâmico.

Com base nas incertezas da curva-chave, principalmente, na zona de extrapolação, e necessitando representar condições de inundação, denota-se que o uso de modelagem hidrodinâmica pode contribuir para uma análise da relação nível de água e vazão para valores mais altos. O presente estudo propõe aplicar simulação numérica com discretização unidimensional e regime permanente, utilizando como dados de entrada apenas informações de uma estação fluviométrica (seção transversal, cota e descarga líquida) para estabelecer a relação nível de água e vazão pelo modelo hidrodinâmico possibilitando a extrapolação dos limites superiores dessa relação considerando as condições físicas da seção transversal. Posteriormente, é possível comparar os valores estimados pelo método tradicional de curva-chave com os valores resultantes da simulação hidrodinâmica possibilitando analisar a coerência dos dados. Este estudo se refere a uma análise preliminar para a estação fluviométrica selecionada, visto que não foram identificados estudos semelhantes na respectiva área de estudo.

ÁREA DE ESTUDO

O Rio Tubarão está inserido na Bacia Hidrográfica do Rio Tubarão, no sul do Estado de Santa Catarina, Brasil (Figura 1). Esse rio, cuja extensão é de 120 km e área de drenagem de aproximadamente 5.000 km², nasce nas encostas da Serra Geral e deságua na Lagoa Santo Antônio. Sua proximidade com o Oceano Atlântico, pode resultar na influência dos fenômenos costeiros no comportamento hidráulico do rio.

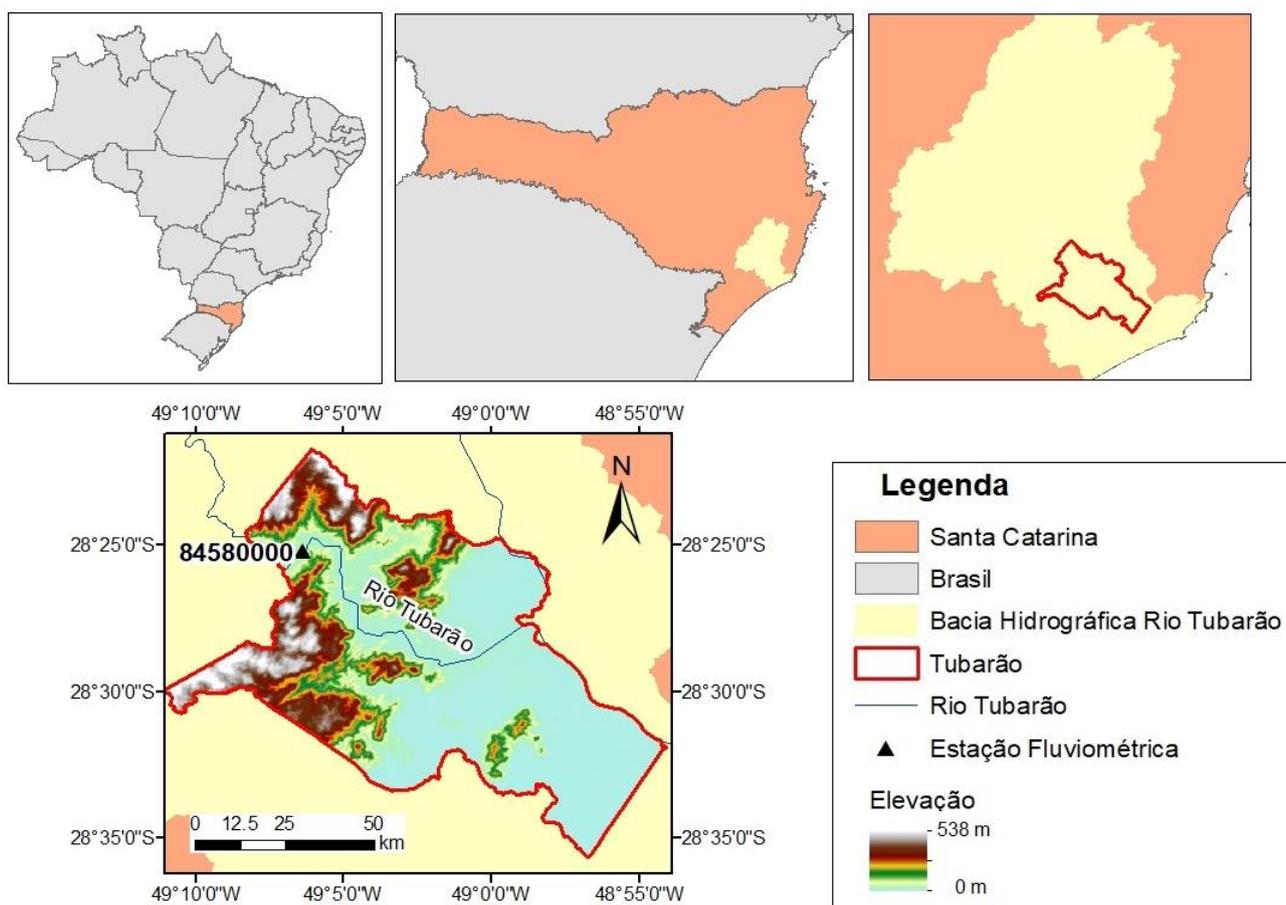


Figura 1.- Localização da estação fluviométrica em relação à área de estudo

Localizado na planície costeira, o baixo curso do Rio Tubarão possui leito composto por depósitos fluvio-lagunares constituídos por areia fina, silte, argila e matéria orgânica. Seu traçado é predominantemente meandrante, com trechos retificados no município homônimo e ocorrência de

meandros abandonados ou braços mortos próximo à zona costeira. As características do baixo curso do Rio Tubarão denotam que sua seção transversal é mais instável do que em rios encaixados de leito rochoso.

O município de Tubarão possui registros de inundações ao longo de sua história, algumas delas com danos significativos, inclusive perdas de vidas. A proximidade do município com o Oceano Atlântico resulta em efeito de remanso no rio causando amortecimento no escoamento de suas águas e quando associado a chuvas de montante intensas, pode contribuir para o incremento no nível de água no canal, agravando eventos extremos hidrológicos de máxima.

MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia desse estudo consiste nas seguintes etapas: (a) aquisição dos dados da estação fluviométrica de interesse; (b) análise dos dados da estação fluviométrica: nível de água e vazão medidos em campo; (c) calibração do modelo hidrodinâmico com os dados observados; (d) simulação para faixa de valor superior aos dados observados; (e) comparação entre a extrapolação obtida por simulação hidrodinâmica com os valores estimados pela curva-chave.

Estação fluviométrica

Para o presente estudo, foi realizado o levantamento das estações fluviométricas instaladas ao longo do Rio Tubarão disponibilizadas no Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH), portal Hidroweb da ANA. A escolha da estação fluviométrica considerou a quantidade de dados da série histórica e a possibilidade de menor influência do efeito de remanso decorrente do sistema lagunar e marés.

A estação fluviométrica, código 84580000, denominada Rio Do Pouso, se localiza no Rio Tubarão, latitude 28°25'12"S e longitude 49°6'36"W e possui uma área de drenagem de 2.740 km² (Figura 1). Os dados de nível de água e vazão medidos em campo contemplam o período de 1939 a 2006 e são consistidos pelo SNIRH/ANA. Quanto a seção transversal, apenas o perfil correspondente aos anos de 2004 e 2006 são consistidos. Além disso, não foi identificado o registro da estação fluviométrica quanto às possíveis alterações de localização, interrupções, manutenções, entre outras informações pertinentes, para o período da série histórica.

Recentemente, foram disponibilizados pelo SNIRH/ANA, as tabelas cota x vazão dessa estação fluviométrica que são equivalentes a curva-chave e correspondem a oito períodos distintos como apresentado na Tabela 1. Os dados das tabelas identificadas de 1 a 6 apresentam discrepâncias em seus valores, pois enquanto ocorre apenas incremento nos níveis de água, os valores das vazões, por vezes, sofrem reduções incoerentes com o respectivo nível de água como ilustrado na Figura 2.

Tabela 1.- Períodos das tabelas cota x vazão da estação fluviométrica 84580000

Identificação	Início	Fim	Identificação	Início	Fim
1	25/05/1939	23/03/1963	5	23/03/1976	01/02/1977
2	24/03/1963	18/08/1965	6	02/02/1977	31/12/1978
3	19/08/1965	24/03/1974	7	01/01/1979	31/12/1997
4	25/03/1974	22/03/1976	8	01/01/1998	31/12/2004

Modelo Hidrodinâmico

Para desenvolvimento do presente estudo se empregou o modelo hidrodinâmico HEC-RAS versão 5.0.4 (USACE-HEC, 2016), com discretização unidimensional e em regime permanente, que utiliza a equação da energia para calcular o nível de água e a vazão, da forma

$$Z_2 + Y_2 + a_2 \frac{V_2^2}{2g} = Z_1 + Y_1 + a_1 \frac{V_1^2}{2g} + h_e, \quad [1]$$

em que Z_1 , Z_2 são os níveis do fundo do canal principal, Y_1 , Y_2 , são as profundidades da seção transversal, V_1 , V_2 são as velocidades médias da seção transversal, a_1 , a_2 são coeficientes que representam a variação de velocidade no perfil transversal, g é a aceleração da gravidades e h_e é a perda de energia.

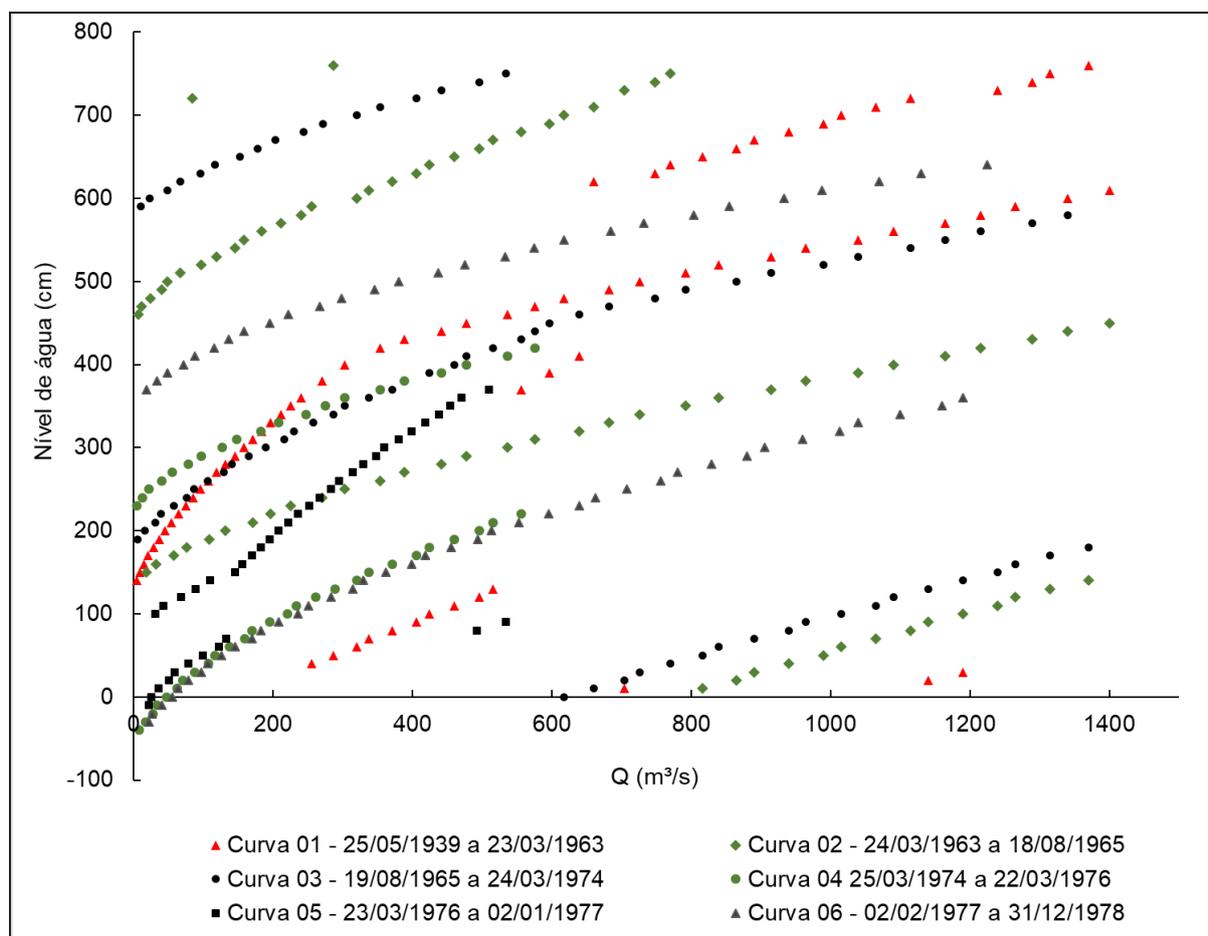


Figura 2.- Curvas-chave para os anos de 1939 a 1978 fornecida pela ANA.

Adotou-se essa formulação simplificada visto que a análise está sendo realizada com dados hidrológicos coletados em um único posto de monitoramento. No modelo, foi inserida uma seção transversal, replicada 1 m a jusante realizando interpolação entre elas de 0,1 m levando em consideração a declividade de fundo do canal de 0,001 m/m. Como condição de contorno foram inseridos os dados de vazões medidos em campo e consistidos pela ANA e a declividade de fundo de 0,001 m/m obtida com base em dados de batimetria.

ANÁLISE DOS DADOS: NÍVEL DE ÁGUA × VAZÃO

Foi elaborada a relação entre os dados de nível de água e vazão medidos em campo para todo o período disponível (1939 a 2006). Com base nos períodos em que o SNIRH/ANA define nova relação da curva-chave, a série de dados foi classificada em quatro períodos. A Figura 3 ilustra os comportamentos observados e apresenta a segmentação conforme os períodos: (i) 25/05/1939 a 07/03/1974; (ii) 14/05/1974 a 20/12/1978; (iii) 23/03/1979 a 04/12/1997; e (iv) 27/02/1998 a 26/10/2006. A mudança de tendência que ocorre no ano de 1974 entre os meses de março e maio, pode ser justificada em ocorrência de um evento extremo de inundação associado a fluxos de detritos (Bigarella et al., 1975) ocorrido entre 23 a 25 de março que ocasionou danos significativos à população local. Tal evento, em virtude de suas proporções, pode ter danificado equipamentos de medição e/ou alterado o leito do rio.

Nota-se que mesmo referindo-se a um mesmo período segundo SNIRH/ANA, os dados medidos para o período de 1979 a 1997 apresenta dispersão nos dados, sendo que alguns aproximam-se do comportamento associado ao período seguinte.

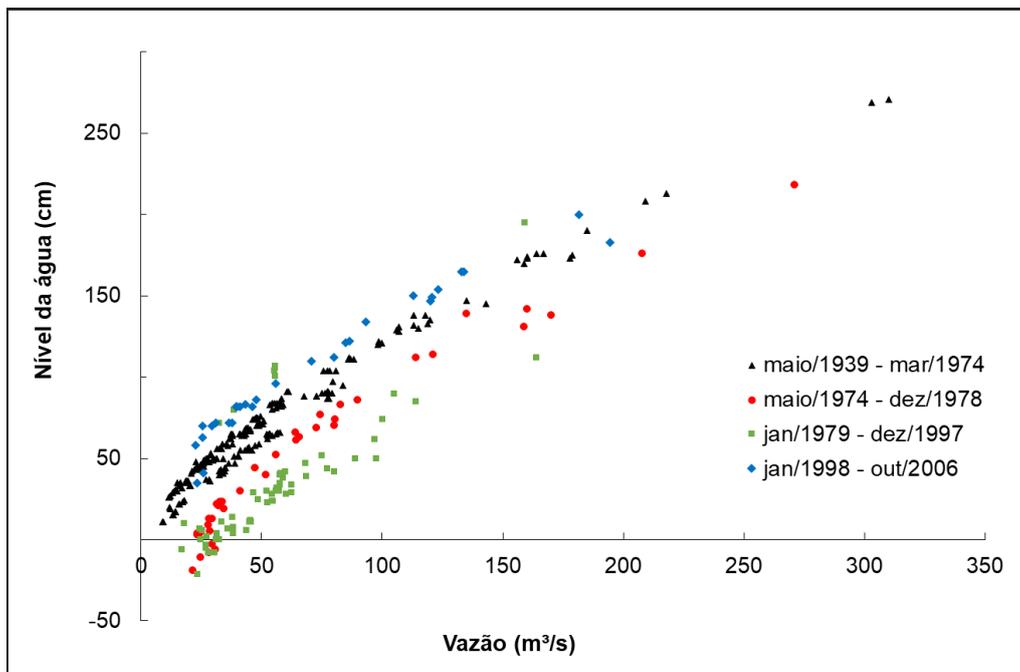


Figura 3.- Relação entre dados medidos em campo e consistidos pela ANA: nível de água e vazão para o período de 1939 a 2006

ANÁLISE 1: PERÍODO 1998 A 2004 E SEÇÃO TRANSVERSAL DE 2004

Calibração do modelo hidrodinâmico

A área de estudo não possui um evento de inundação bem documentado que permita realizar a calibração do modelo hidrodinâmico. Dessa forma, a calibração do modelo hidrodinâmico se limitará aos dados de nível de água e vazão medidos em campo e consistidos pela ANA. Considerando que posteriormente a 2004, a ANA não forneceu nova curva-chave, mesmo com dados disponíveis até 2006, adotou-se o período de 1998 a 2004 para calibração.

A seção transversal inserida no modelo se refere ao ano de 2004 (Figura 4), cujos dados foram consistidos pela ANA. Pela característica da seção foi indicado que em 408 cm existe cota limite entre o leito menor e leito maior. A seção transversal foi replicada 1 m a jusante realizando interpolação entre elas de 0,1 m levando em consideração a declividade de fundo do canal de 0,001 m/m. Como condição de contorno de entrada foram inseridos os dados de vazões observadas do período de 1998 a 2004 e como condição de contorno de saída utilizou-se a equação de Manning

$$Q = \frac{1}{n} A R_h^{2/3} S^{1/2}, \quad [2]$$

onde Q é a vazão (m^3s^{-1}), n é o coeficiente de Manning, A é a área (m^2), R_h é o raio hidráulico (m) e S é a declividade de fundo (m/m). A declividade de fundo utilizada é de 0,001 m/m obtida com base em dados de batimetria.

A calibração foi realizada manualmente em um processo iterativo onde o valor do coeficiente de Manning do canal foi alterado até o nível de água calculado se aproximar do valor observado. Esse modelo possibilita o uso de valores do coeficiente de Manning diferentes para o canal e para as margens do rio. Nessa calibração se adotou um valor constante para ambas as margens de 0,05 e variou-se apenas o coeficiente de Manning referente ao leito menor. O coeficiente de Manning para as margens foi adotado considerando que se trata de uma superfície de planície de inundação com árvores pequenas ou cultivos maduros (Dingman, 2009).

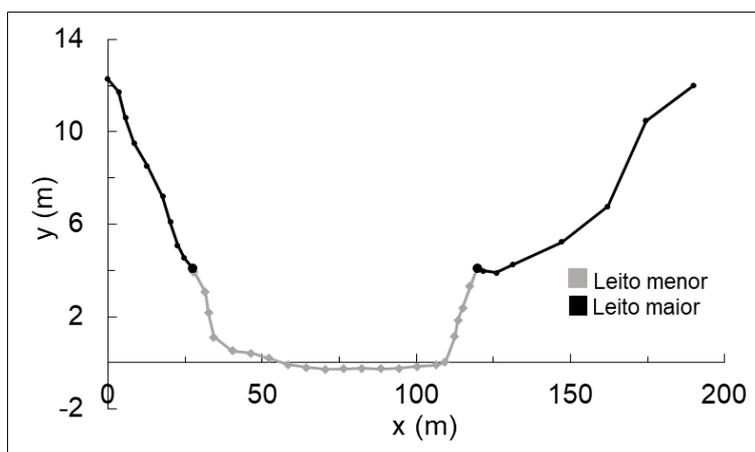


Figura 4.- Seção transversal do ano de 2004 com distinção entre o leito menor (em cinza) e maior (em preto)

O processo iterativo para ajuste do modelo hidrodinâmico iniciou com coeficiente de Manning para o leito menor igual a 0,035 sendo acrescido 0,001 a cada iteração. A iteração foi realizada até que o erro aumentasse, sendo analisados os ajustes por meio da função objetivo do erro percentual absoluto médio dado por:

$$E = \frac{\sum \left(\frac{|H_o - H_c|}{H_o} \right)}{n} \times 100, \quad [3]$$

onde H_o é o nível de água observado, H_c é o nível de água calculado e n é o número de dados. O coeficiente de Manning (n) 0,042 apresentou o menor erro (Tabela 2) sendo empregado nas demais etapas do presente estudo.

Tabela 2.- Erro percentual absoluto médio dos coeficientes de Manning calculados em relação aos observados para o período de 1998 a 2004 e seção transversal de 2004

Coeficiente de Manning	Erro percentual absoluto médio [%]	Coeficiente de Manning	Erro percentual absoluto médio [%]
0,035	11,67	0,040	5,10
0,036	10,13	0,041	4,56
0,037	8,75	0,042	4,47
0,038	7,33	0,043	4,93
0,039	6,12	0,044	5,52

Os resultados obtidos na calibração são apresentados na Figura 5, onde é possível observar que a faixa de dados observados é inferior a $200 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Nota-se que o máximo valor da série de dados observados para o período de 1998 a 2004 está incoerente em relação ao valor anterior, pois apresenta uma cota menor e resulta em uma vazão maior, sendo que esses dados distam entre si apenas por dois anos. Calculando o número de Froude ($F = u/\sqrt{gH_o}$, em que u é a velocidade média e g é a aceleração da gravidade) das duas vazões máximas observadas, obtém-se valor próximo a 0,1 para ambas, portanto, se trata de um escoamento subcrítico. Tal fato denota as incertezas associadas aos equipamentos e ao procedimento da medição.

Extrapolação da curva-chave pelo modelo hidrodinâmico calibrado

Para estimar a relação nível de água e vazão para a seção transversal em estudo, estabelecendo uma curva-chave obtida pela simulação hidrodinâmica, aplicou-se o modelo calibrado ($n= 0,042$ no leito menor e $n= 0,050$ em ambas margens) para o intervalo de vazões entre 190 e $2.000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ com variação de $10 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ e manteve como condição de contorno de saída a declividade de fundo de $0,001 \text{ m/m}$. O valor de $190 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ foi adotado considerando que entre os dados de entrada para calibração, o valor máximo é de aproximadamente $194 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, portanto, para a estimativa de vazões superiores a $190 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ é necessário utilizar a extrapolação da linha tendência dos dados.

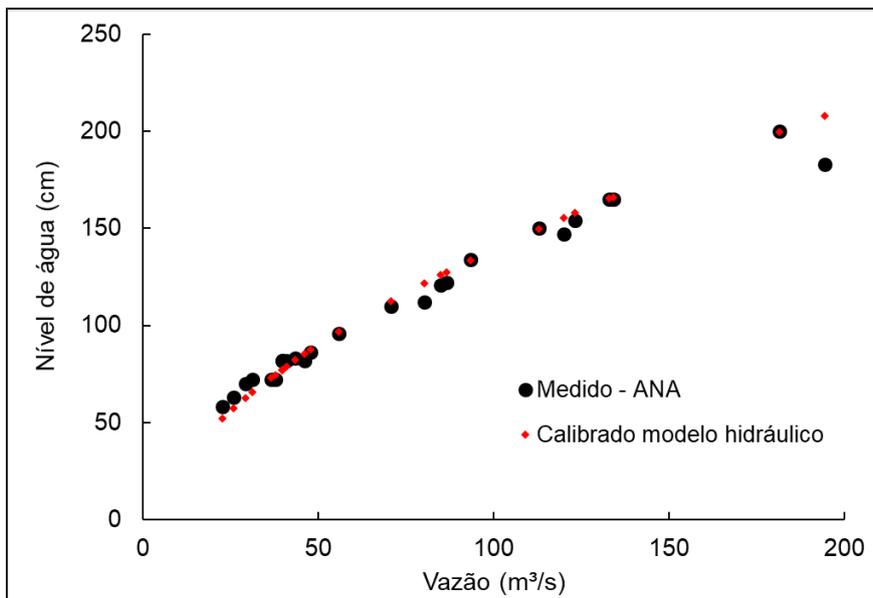


Figura 5.- Valores de nível de água e vazão medidos e consistidos pela ANA com sobreposição do resultado obtido pela calibração do modelo hidrodinâmico.

Relacionando nível de água e vazão, Figura 6, é possível identificar que as vazões consistidas pela ANA, provenientes da extrapolação da curva-chave para o período de 1998 a 2004, apresentam valores subestimados em comparação com as vazões obtidas pelo modelo hidráulico. A cota máxima de 730 cm corresponde a uma vazão de $1.315 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ pela curva-chave da ANA, enquanto o modelo hidráulico estima uma vazão de aproximadamente $1.820 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. A subestimativa das vazões pela curva-chave é superior a 5% para cotas acima de 430 cm, enquanto que para cotas superiores a 550 cm, as vazões são subestimadas em mais de 10%. Portanto, nesse caso, apesar da faixa de dados observados contemplar vazões até $200 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, a extrapolação da curva-chave apresenta resultado coerente para faixa de vazão de até $900 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, com erro de até 10% em relação ao modelo hidráulico calibrado.

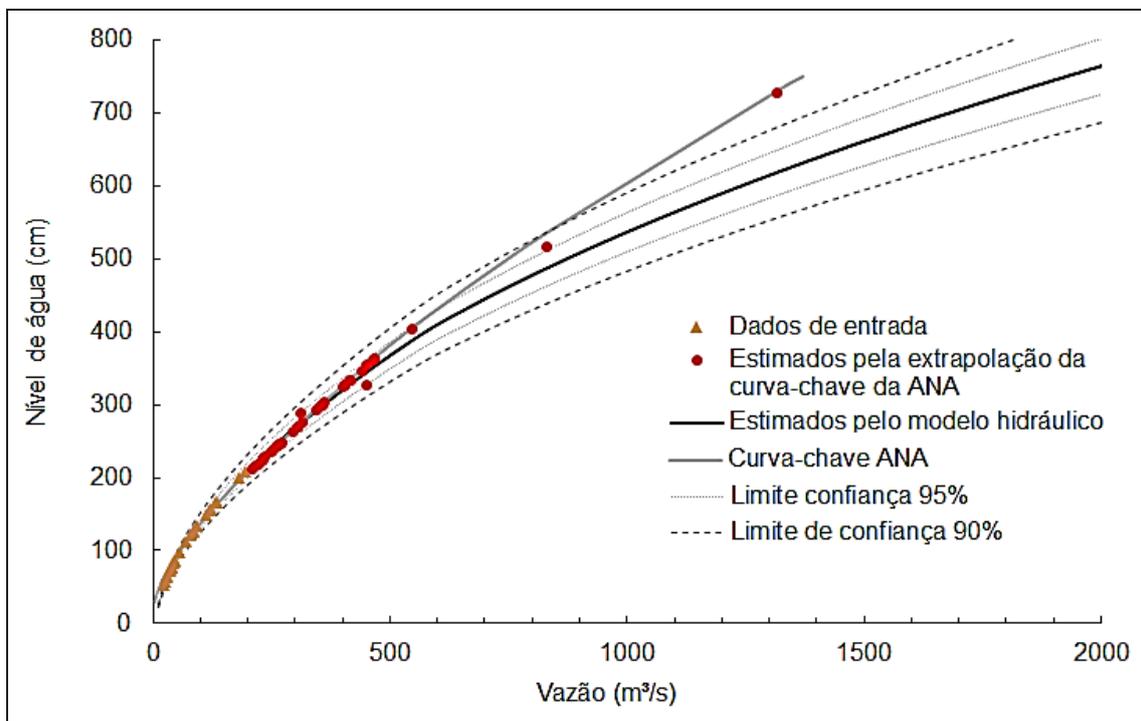


Figura 6.- Resultado da extrapolação pelo modelo hidrodinâmico com limites de confiança de 95% e 90% com sobreposição dos dados da curva-chave disponibilizada pela ANA para o período de 1998 a 2004

ANÁLISE 2: PERÍODO 1998 A 2004 E SEÇÃO TRANVERSAL DE 2006

A influência da mudança de seção transversal para a extrapolação da relação nível de água e vazão foi avaliada, alterando a seção transversal presente no registro de 2004 pela do registro de 2006 (Figura 7). Com o modelo calibrado ($n=0,042$ no leito menor e $n=0,050$ em ambas margens) e aplicando as mesmas condições de contorno, foi inserida no modelo hidrodinâmico a seção transversal do ano de 2006 e aplicada a mesma metodologia adotada para a seção do ano de 2004. A cota limite entre o leito menor e maior foi identificada em 4,25 m de profundidade, aumentando o leito menor em 0,17 m. Ao comparar o resultado da simulação com os dados observados, obtém-se um acréscimo no erro percentual absoluto médio em virtude da mudança de seção transversal, correspondendo a 9,28%.

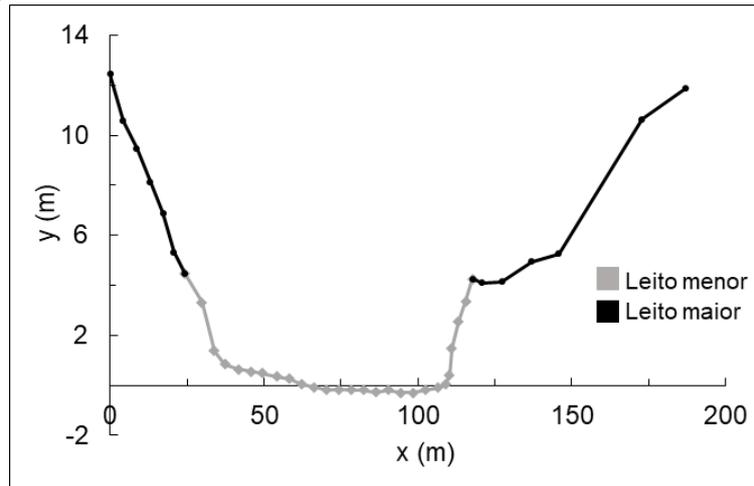


Figura 7.- Seção transversal do ano de 2006 com distinção entre o leito menor (em cinza) e maior (em preto)

O incremento no erro decorrente da alteração da seção transversal em um intervalo de tempo de dois anos denota a incerteza associada aos dados e a dificuldade de representar os outros períodos de dados observados a partir de uma única calibração. Ao assumir o papel de parâmetro calibrável, o coeficiente de Manning pode perder o significado físico de sua representação (Domeneghetti et al., 2012) que, originalmente, é um fator de resistência a ser considerado no cálculo de vazão em canais abertos (Dingman, 2009) e passa a incorporar outros aspectos hidráulicos e representar uma aproximação da perda de energia.

ANÁLISE 3: PERÍODO 1996 A 2006 E SEÇÃO TRANVERSAL DE 2006

Partindo para uma análise independente dos períodos que a ANA estabeleceu para as relações nível de água e vazão, foi considerado que os anos de 1996 e 1997 apresentavam comportamento similar aos dados do período de 1998 a 2006 conforme demonstrado na Figura 2. Assim, considerando os dados de nível de água e vazão medidos em campo e consistidos pela ANA para o período de 1996 a 2006, foi empregada a seção transversal do ano de 2006 (Figura 7).

Foi realizada a calibração do modelo hidrodinâmico com esses dados como entrada, aplicada a mesma metodologia para a seção transversal e analisado o erro percentual absoluto médio conforme Tabela 3. O coeficiente de Manning de 0,037 para o leito menor do rio apresentou o menor erro em comparação com os demais valores testados.

Tabela 3.- Erro percentual absoluto médio dos coeficientes de Manning calculados em relação aos observados para o período de 1996 a 2006 e seção transversal de 2006

Coeficiente de Manning	Erro percentual absoluto médio [%]
0,036	7,13
0,037	7,03
0,038	7,28

A partir dessa calibração do modelo hidrodinâmico, foi realizada a extrapolação de vazões para o intervalo de 190 a 2.000 m^3s^{-1} com variação de 10 m^3s^{-1} . Essa relação foi comparada com os valores diários máximos dos meses entre os anos de 1996 a 2004 consistidos da ANA e com os limites inferior e superior associados aos erros de 5% e 10% dos valores calculados. Os dados de 2004 a 2006 não foram utilizados pois não estavam consistidos pela ANA no momento dessa análise.

A análise preliminar dos dados observados para o 1996 e 1997 indicou uma maior aproximação ao comportamento do período 1998 a 2004 do que ao período que a ANA considerou na elaboração de suas curvas-chaves. Ao incluir esses anos na análise se obteve acréscimo no erro percentual absoluto médio para aproximadamente 7% na calibração. Ao comparar os resultados da simulação com as vazões estimadas pela curva-chave da ANA, evidencia-se que os anos de 1996 e 1997 são provenientes de uma extrapolação diferente (Figura 8).

Os resultados da Análise 3 apontam que apesar da máxima vazão observada ser aproximadamente $200\text{m}^3\text{s}^{-1}$, pode-se considerar que valores até a faixa de $700\text{m}^3\text{s}^{-1}$ estão condizentes visto que a diferença entre os valores extrapolados pela curva-chave e obtidos por simulação se diferem em 10%, valor considerado aceitável ao se tratar de hidrologia.

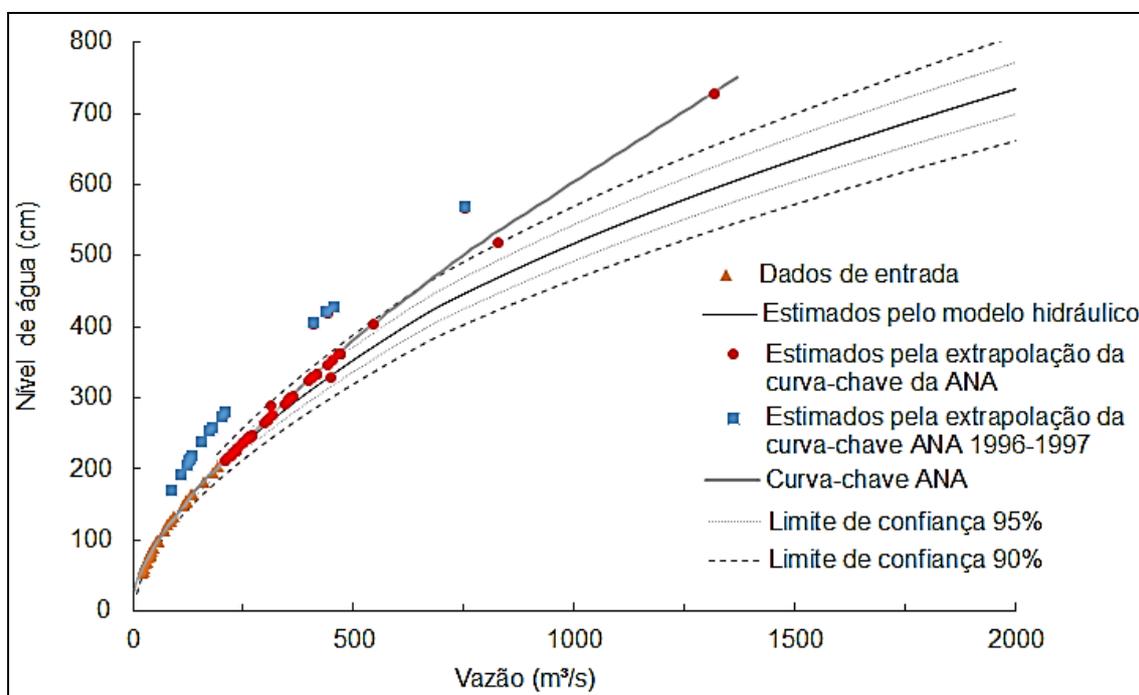


Figura 8.- Resultado da extrapolação pelo modelo hidrodinâmico com limites de confiança de 95% e 90% com sobreposição dos dados da curva-chave disponibilizada pela ANA para o período de 1996 a 2006 e

CONCLUSÕES E DISCUSSÕES

A curva-chave é um método simplificado que deve ser empregado com cautela para a estimativa de vazão a partir do nível de água medido em determinada seção transversal. As incertezas da estimativa de vazão por esse método não são quantificadas, podendo acarretar em resultados não representativos, principalmente, na aplicação desses dados para delimitação de áreas inundáveis que dependem das vazões máximas provenientes da extrapolação da curva-chave.

Com base nesses questionamentos, foi proposta uma análise preliminar desses dados para a estação fluviométrica código 84580000, Rio do Pouso, no município de Tubarão (Brasil). Primeiramente, foi analisada a relação entre os dados observados de nível de água e vazão para o período entre 1939 e 2006 possibilitando a identificação de comportamentos distintos dessa relação ao longo dos anos. Uma das alterações significativas dessa relação ocorreu em março de 1974 motivado pela ocorrência de um evento hidrológico extremo de máxima, possivelmente por danos

aos equipamentos de medição e/ou alterações do leito do rio. Assim como para essa inundação, o município possui registros de outras inundações, entretanto, apesar de possíveis alterações geomorfológicas na seção transversal esses eventos hidrológicos extremos de máxima não são levados em consideração na elaboração da curva-chave em virtude da periculosidade associada à medição.

A análise da relação de nível de água e vazão disponibilizada em junho de 2018 no SNIRH/ANA, permitiu identificar discrepâncias nas tabelas cota x vazão da estação fluviométrica código 84580000 para o período de 1939 a 1978. A relação proposta para os anos de 1979 a 1997 e 1998 a 2004 apresentam tendência crescente e dados extrapolados até vazão de 1.225 e $1.370 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, respectivamente. Entretanto, essa relação emprega métodos estatísticos para a estimativa da vazão, desvincula a relação nível de água e vazão com os aspectos físicos. As incoerências observadas nos dados disponibilizados pela ANA, nesta específica estação fluviométrica, contribuem para o questionamento sobre a confiabilidade dos valores estimados.

Sendo assim, o presente estudo propôs a aplicação da simulação numérica para estabelecer a relação nível de água e vazão com base em dados hidrológicos disponibilizados pelo SNIRH/ANA, possibilitando a extrapolação dos limites superiores dessa relação considerando as condições físicas da seção transversal. Não dispondo de um evento de inundação bem documentado, foi necessário realizar a calibração do modelo hidrodinâmico somente com os dados de nível de água e vazão medidos em campo e consistidos pela ANA. Denota-se que a calibração do modelo hidrodinâmico baseada somente em vazões baixas, pode acarretar em incertezas na extrapolação, entretanto não haviam outros dados para possibilitar a garantia de representação dos valores máximos.

Nas análises realizadas, obteve-se aumento no erro percentual absoluto médio ao alterar o perfil transversal do ano de 2004 para 2006, de modo que a calibração do modelo se restringiu a um determinado ano, mesmo não ocorrendo variações significativas na seção. Ainda, verifica-se a dificuldade na avaliação dos dados correspondentes aos períodos anteriores, visto que a incoerência nas relações definidas pela ANA tornaria ampla a incerteza da calibração do modelo hidrodinâmico.

Na modelagem hidrodinâmica foram determinadas três condições de análise. Na primeira, a calibração foi realizada considerando os dados de nível de água e vazão medidos e consistidos pela ANA para o período de 1998 a 2004, que corresponde a uma mesma tabela cota x vazão da ANA, considerando a seção transversal de 2004. Na etapa de calibração, obteve-se erro percentual absoluto médio inferior a 5%. Para esse período escolhido, os valores inferiores a $900 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ se encontram dentro do limite de confiança de 90%, apresentando bom ajuste com os resultados da simulação numérica. Posteriormente, manteve-se os mesmos valores para os coeficientes de Manning e as mesmas condições de contorno, alterando apenas a seção transversal para o ano de 2006. Ao alterar a seção transversal, observou-se aumento do erro percentual absoluto médio em relação aos dados observados, demonstrando a dificuldade em avaliar outros períodos de dados observados a partir de uma única calibração. A terceira situação simulada considerou o período de 1996 a 2006 como entrada para uma nova calibração do modelo hidrodinâmico e a seção transversal de 2006. Nessa calibração, o valor atribuído ao coeficiente de Manning foi de 0,037, ou seja, uma redução de 0,005.

Portanto, em relação a curva-chave obtida por simulação hidrodinâmica, os valores estimados pela extrapolação do método tradicional de curva-chave apresentam variação aceitável (erro de 10%) para uma faixa até quatro vezes superior aos valores observados. Entretanto para maiores valores ocorre subestimativa dos valores provenientes da curva-chave em relação aos resultados do modelo hidráulico.

Na extrapolação da relação nível de água e vazão por modelagem hidrodinâmica existem ainda incertezas, pois são arbitrados os valores ao coeficiente de Manning sem restrições ao seu sentido físico, os limites entre leito menor e maior, a série utilizada para calibração se restringe a valores baixos que não representam eventos hidrológicos extremos de máxima. Entretanto, seu uso de modo complementar ao método convencional pode contribuir para a redução das incertezas ou ao menos possibilitar a quantificação da incerteza.

Sugere-se que, se possível, estudos futuros realizem a calibração do modelo hidrodinâmico para a área de estudo com dados de uma inundação bem documentada, possibilitando reduzir as incertezas quanto a extrapolação para os valores de máxima. A compreensão dos eventos hidrológicos de máxima necessita de maior quantidade e qualidade de dados de inundações. A falta de registros ou, até mesmo, registros realizados inadequadamente dificultam a estimativa das vazões máximas e, conseqüentemente, podem prejudicar estudos de gestão de risco e planejamento das áreas passíveis à inundação.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho recebeu o apoio financeiro parcial da CAPES – Brasil.

REFERÊNCIAS

- Agência Nacional de Águas – ANA (Brasil).** (2014). *Medição de descarga líquida em grandes rios: manual técnico*. 2. ed. Brasília, DF.
- Bigarella, J.J.; Bigarella, I.E.K.; Jost, H.** (1975). “Catastrophic events in the Tubarão area”. *Boletim Paranaense de Geociências*, No. 33, pp. 200-206.
- Clarke, R. T.;** (1999). “Uncertainty in the estimation of mean annual flood due to rating-curve indefinición”. *Journal of Hydrology*, No. 222, pp. 185 – 190.
- Clarke, R. T.; Mendiondo, E. M.; Brusa, L.C.** (2000). “Uncertainties in mean discharges from two large South American rivers due to rating curve variability”. *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 45, No. 2, pp. 221 – 236.
- Corato, G.; Ammari, A.; Moramarco, T.** (2014). “Conventional point-velocity records and surface velocity observations for estimating high flow discharge”. *Entropy*. Vol. 16, No. 10, pp. 5546 - 5559.
- Di Baldassare, G.; Schumann, G.; Bates, P.** (2009). “Near real time satellite imagery to support and verify timely flood modelling”. *Hydrological Processes*, Vol. 23, pp. 779 – 803.
- Di Baldassare, G.; Claps, P.** (2011). “A hydraulic study on the applicability of flood rating curves”. *Hydrology Research*, Vol. 42, No. 1, pp. 10 – 19.
- Dingman, S. L.** (2009). *Fluvial hydraulics*. New York: Oxford University Press.
- Domeneghetti, A.; Castellarin, A.; Brath, A.** (2012). “Assessing rating-curve uncertainty and its effects on hydraulic model calibration”. *Hydrology and Earth System Sciences*. No. 16, pp. 1191 – 1202.
- Dymond, J. R.; Christian, R.** (1982). “Accuracy of discharge determined from a rating curve”. *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 27, No. 4, pp. 493 – 504.
- Mosley, M. P.; McKerchar, A. I.** (1992). *Streamflow: Chap. 8. Handbook of Hydrology*. McGraw-Hill Inc: New York.
- Oliveira, F.A.; Pereira, T.S.R.; Soares, A.K.; Formiga, K.T.M.** (2016). “Uso de modelo hidrodinâmico para determinação da vazão a partir de medições de nível”. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. Vol. 21, No. 4, pp. 707 – 718.
- Pappenberger, F.; Matgen, P.; Beven, K.; Henry, J-B.; Pfister, L.; Fraipont de, P.** (2006). “Influence of uncertain boundary conditions and model structure on flood inundation predictions”. *Water Resources*. Vol. 29, pp. 1430 – 1449.
- USACE-HEC.** (2016). *HEC-RAS River Analysis System Hydraulic Reference Manual*, Version 5.0. Brummer, G. W.: U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center.
- Westerberg, I.; Guerrero, J. -L.; Seibert, J.; Beven, K. B.; Halldin, S.** (2010). “Stage-discharge uncertainty derived with a non-stationary rating curve in the Choluteca Rives, Honduras”. *Hydrological Processes*. No. 25, pp. 603 – 613.