

## XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

### **ANÁLISE DO IMPACTO DE VAZÕES MAIS ELEVADAS NA CALIBRAÇÃO DE CURVA-CHAVE UTILIZANDO MÉTODO BAYESIANO**

*Clara Demattos Nogueira<sup>1</sup>; Alan de G. Barbosa<sup>2</sup>; Francisco Eustáquio Oliveira e Silva<sup>3</sup> & Veber*

*A. F. Costa<sup>4</sup>*

**Abstract:** Knowledge of streamflow in a watercourse is essential for water resources management, including flood control. However, continuous flow measurement is operationally and economically complex. As an alternative, rating curves are used, representing the mathematical relationship between stage and discharge at a cross section. Various uncertainties can affect these curves, including errors from data extrapolation. Bayesian methods have stood out in rating curve calibration for enabling uncertainty quantification and the incorporation of physical knowledge. In this study, the BaRatin method, proposed by Le Coz *et al.* (2014), was applied, allowing the inclusion of hydraulic knowledge of the cross section in the prior distribution. The case study focused on the Acorizal station (code 66255000), on the Cuiabá River, which has a history of flooding. Data were obtained from the HidroWeb platform. Four models were evaluated, varying the inclusion of higher flow measurements, and the impact on the rating curve and uncertainty was analyzed. In all cases, even with measurements near the floodplain activation level, high uncertainty was observed at the highest stages, especially for the  $k_2$  parameter, which controls floodplain activation. The results indicate the need to extend discharge measurement techniques to cover higher flow values.

**Resumo:** O conhecimento das vazões em um curso d'água é essencial para o gerenciamento de recursos hídricos, incluindo o controle de inundações. Contudo, a medição contínua de vazões é operacional e economicamente complexa. Como alternativa, utilizam-se curvas-chave, que representam a relação matemática entre cota e vazão em uma seção transversal. Diversas incertezas podem afetar essas curvas, incluindo erros por extrapolação de dados. Métodos Bayesianos têm se destacado na calibração de curvas-chave, por permitirem quantificar incertezas e incorporar conhecimento físico. Neste estudo, aplicou-se o método BaRatin, de Le Coz *et al.* (2014), que permite incluir conhecimento hidráulico da seção na distribuição a priori. O caso analisado foi a estação Acorizal (código 66255000), no rio Cuiabá, com histórico de inundações. Os dados foram obtidos da plataforma HidroWeb. Foram avaliados quatro modelos, variando a inclusão de medições em níveis mais elevados, analisando-se o impacto na curva-chave e na incerteza. Em todos os casos, mesmo com medições próximas à planície de inundação, observou-se elevada incerteza nas cotas mais altas, especialmente no parâmetro  $k_2$ , que controla a ativação da planície. Os resultados indicam a necessidade de ampliar as técnicas de medição para vazões mais elevadas.

**Palavras-Chave** – Inferência Bayesiana. Curva chave. Análise de incerteza.

<sup>1</sup>) Mestranda no Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Antônio Carlos, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil. clarademattos@ufmg.br

<sup>2</sup>) Pós-doutorando no Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Antônio Carlos, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil. alanbrb@ufmg.br

<sup>3</sup>) Professor no Departamento de Hidráulica e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Antônio Carlos, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil. fcoeustaquo@ufmg.br

<sup>4</sup>) Professor no Departamento de Hidráulica e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Antônio Carlos, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil. veberc@ufmg.br

## INTRODUÇÃO

O conhecimento acerca do regime de vazões nos cursos d'água é essencial para o gerenciamento de recursos hídricos, sobretudo para controle de inundações. No entanto, o monitoramento direto de vazões apresenta desafios operacionais e financeiros significativos. Alternativamente, pode-se realizar o monitoramento indireto das vazões por meio do registro de cotas e da utilização de curvas-chave, as quais compreendem equações matemáticas que sintetizam a relação entre cota e vazão.

A construção de uma curva-chave tem como fundamento uma relação unívoca entre cotas e vazões, a qual representa o comportamento hidráulico médio sob condições de escoamento permanente e de acordo com o controle hidráulico predominante na seção. Sempre que o fluxo se afastar do regime de referência, grandes erros na estimativa de vazão podem surgir. Alterações permanentes na condição hidráulica da seção, como mudanças geométricas causadas por grandes cheias, exigem a elaboração de uma nova curva-chave (Le Coz et al., 2014).

Diversas fontes de incerteza podem afetar as curvas-chave, com impactos diretos no cálculo das vazões e, consequentemente, na gestão dos recursos hídricos. Segundo Di Baldassarre e Claps (2011), as três principais fontes de incerteza associadas às curvas-chave são: i) erros nas medições de cota e vazão; ii) erros decorrentes de escoamento não permanente; e iii) erros introduzidos pela extrapolação da curva-chave para além da faixa de dados observados. Além disso, outras fontes de incerteza podem ser relevantes em casos específicos, como o efeito de remanso provocado por afluentes ou reservatórios, e alterações nas propriedades hidráulicas da seção, em função de crescimento de vegetação, deposição ou erosão do leito.

Ademais, as medições simultâneas de cota e vazão, utilizadas na calibração da curva-chave, nem sempre são feitas em todos os regimes de vazões, i.e., em vazões baixas, médias e altas, levando à necessidade extrapolação da curva-chave. Nesse sentido, Kiang et al. (2018) afirmam que tal procedimento impacta diretamente as vazões preditas, ficando assim sujeitas a maiores fontes de incertezas. Lang et al. (2025) quantificaram a influência de dados históricos nas incertezas da análise da frequência de inundações. Os referidos autores perceberam que, ao adicionar dados de cheias históricas, era possível reduzir a incerteza final na análise de frequência, destacando a importância de dados de medições de altas vazões para construção da curva-chave. Já Domeneghetti, Castellarin e Brath (2012) analisaram o impacto da incerteza de curva-chave na calibração de modelos hidrológicos em uma estação no rio Cremona, na Itália. Os autores discutiram que a extrapolação da curva-chave pode levar a erros significativos, influenciando a incerteza advinda das estimativas da curva-chave, que assim pode levar a coeficientes de rugosidade irreais.

Diversos métodos foram desenvolvidos para calibração de curvas-chave. Dentre eles, é possível citar a construção de modelo hidráulico unidimensional (1D) e o método tradicional, a partir de medições simultâneas de cota e vazão. Em um estudo de caso realizado para o rio Po, Itália, Di Baldassarre e Claps (2011) concluíram que a construção do modelo 1D para extrapolação da curva-chave pode reduzir a incerteza geral, e é vantajoso quando comparado ao método tradicional. Entretanto, Le Coz et al. (2014) destacam que a qualidade do resultado obtido depende da correta identificação dos controles hidráulicos. Por outro lado, uma abordagem que tem ganhado destaque para a calibração de curvas-chave, principalmente diante dos avanços computacionais, é o uso da inferência Bayesiana. Sikorska et al. (2013) afirmam que essa abordagem é promissora por permitir a fácil incorporação de informações informais às medições de descarga, além de avaliar de maneira explícita as contribuições individuais dos erros.

Pode-se citar alguns trabalhos que utilizam o teorema de Bayes para analisar incertezas da curva-chave. Nesse sentido, Kuczera (1999) propôs um método Bayesiano para análise de frequência que considera erros provenientes da curva-chave. Já Moyeed e Clarke (2005) a inferência Bayesiana para calibração de curvas-chave em 7 estudos de caso. Os referidos autores afirmam que tal abordagem possui vantagens, como a possibilidade de incorporação de conhecimento *a priori* quanto à natureza da curva-chave e a obtenção de intervalos de credibilidade para as vazões preditas. Entretanto, como ressaltam Reitan e Petersen-Øverleir (2009), ainda existem desafios na obtenção de curvas-chave, principalmente no que se refere à extrapolação das curvas. Por fim, Le Coz *et al.* (2014) propõe um método denominado BaRatin, que se destaca pela forma que combina o conhecimento hidráulico na construção da curva-chave: são feitas associações entre os parâmetros da curva-chave e parâmetros de equações hidráulicas teóricas que regem o comportamento na seção transversal. Dessa forma, é possível definir distribuições *a priori* informativas para os parâmetros da curva-chave. Cabe ainda destacar que o BaRatin foi também utilizado por Lang *et al.* (2025) para quantificar incertezas na estimativa de vazões a partir de curvas-chave a partir de diferentes bases de dados.

Em suma, apesar de diversos estudos e avanços realizados ao longo dos anos, a definição de curva-chave permanece um grande desafio, principalmente em função do grande impacto que essa possui na realização da análise de frequência e na gestão de recursos hídricos de forma geral. Parte desse desafio provém da parcela de incerteza decorrente da escassez de dados para a calibração das curvas-chave, principalmente no contexto de extrapolação. Dessa forma, este trabalho objetiva analisar diferentes cenários de quantidade de informação e avaliar o impacto dos dados na incerteza resultante nas curvas-chave.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Área de estudo

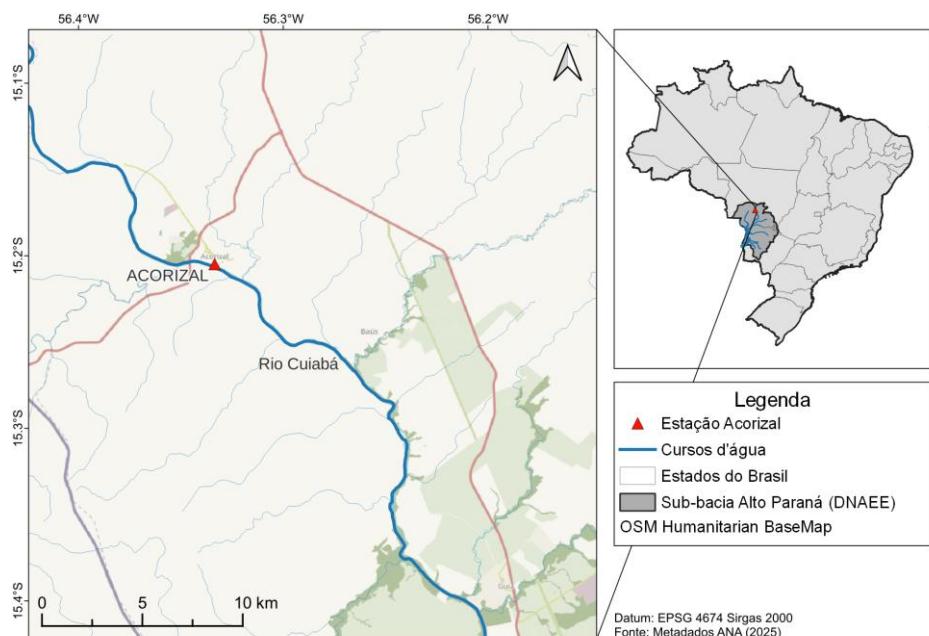
Diante da dificuldade em localizar uma estação com dados e seção adequadas para aplicabilidade do BaRatin, i.e., com monitoramento adequado e seção transversal conhecida e com controles definidos, estabeleceu-se a área de estudo como a estação Acorizal (código 66255000), localizada a 163,3 m acima do nível do mar, no rio Cuiabá, nas proximidades de Cuiabá-MT, com coordenadas 15,2039 °S e 56,3669 °O, e com área de drenagem de 19.700 km<sup>2</sup>, conforme ilustrado na Figura 1. Segundo consulta a base de dados da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), há registros de 1965 até 2016 (ANA, 2025).

Pode-se acrescentar que a escolha da estação também se motiva por já ter sido alvo de outras investigações e, assim, diversas informações necessárias para o estudo em questão já foram consolidadas de forma detalhada. Ademais, o rio possui um histórico de inundações, de modo que se torna relevante a análise de vazões nas cotas superiores da curva-chave. Por fim a estação se destaca por um longo período homogêneo, i.e., sem saltos nem tendências nas cotas observadas, de 01/12/1965 a 31/12/2007, conforme definido pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA, 2025).

### Dados utilizados

Os dados considerados para a análise foram obtidos a partir da plataforma HidroWeb, mantidas pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA, 2025). Foram considerados apenas dados consistidos, resultando em 413 medições no resumo de descarga, com cotas no intervalo de 51 a 603 cm. Na Figura 2 são apresentadas as medições de descarga da estação, onde é possível observar uma maior concentração de medições abaixo da cota 400 cm, que correspondem a 93% dos dados. O maior valor de cota medido foi 603 cm.

Figura 1 – Localização da estação Acorizal



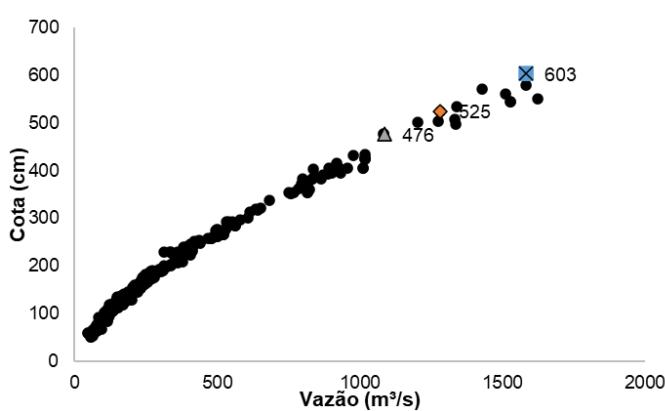
Fonte: Adaptado de ANA (2025)

Como objetiva-se avaliar o impacto da inserção de informações de cotas mais elevadas nos intervalos de credibilidade dos parâmetros e quantis, foram estabelecidos os modelos apresentados na Tabela 1, com dados notáveis também destacados na Figura 2.

Tabela 1 - Dados considerados nas análises

Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4
Medições até a cota 476 cm (400 medições)	Medições até a cota 433 cm + medição 525 cm (400 medições)	Medições até a cota 433 cm + medição 603 cm (400 medições)	Todas as medições (413 medições)

Figura 2 - Resumo de descarga para a estação Acorizal



Fonte: Adaptado de ANA (2025)

### Modelo estatístico

Para estimativa da curva-chave foi utilizado o modelo BaRatin, proposto por Le Coz *et al.* (2014), que utiliza análise Bayesiana e, assim, permite introduzir conhecimento hidráulico prévio, bem como quantificar explicitamente as distintas parcelas de incerteza na inferência .

A vazão predita pela curva-chave em um dado tempo  $t$ , denotada por  $q_{cc_t}$ , pode ser representada em função da cota no tempo  $t$ ,  $h_t$ , e de um vetor de parâmetros  $\boldsymbol{\theta}$ , conforme apresentado pela Equação 1.

$$q_{cc_t} = f_{cc}(h_t, \boldsymbol{\theta}) \quad (1)$$

Entretanto, sabe-se que a vazão estimada pela curva-chave está sujeita a uma parcela de erro, representada por  $e_t^{cc}(\boldsymbol{\beta})$ . Então, pode-se relacionar a vazão real ( $q_{cc_t}$ ) com a vazão predita pela curva-chave e seu respectivo erro por:

$$q_{cc_t} = q_{real,t} + e_t^{cc}(\boldsymbol{\beta}) \quad (2)$$

na qual os erros são considerados normalmente distribuídos, com média zero e desvio padrão linearmente relacionado à vazão predita. Formalmente:

$$e_t^{cc}(\boldsymbol{\beta}) \sim N(0, (\beta_0 + q_{cc}\beta_1)^2) \quad (3)$$

No modelo proposto, a premissa que as medições de cota são isentas de erro é adotada, enquanto as vazões medidas no tempo  $t$ ,  $\tilde{q}_t$ , possuem erro normalmente distribuído, centrado em zero e com desvio-padrão  $\delta_t$ , que depende do equipamento utilizado na medição, representados da forma:

$$\tilde{q}_t = q_{real,t} + e_t^M \quad e_t^M \sim N(0, \delta_t^2) \quad (4)$$

Ao combinar as Equações 2 e 4, pode-se descrever a vazão predita pela curva-chave da forma:

$$\tilde{q}_t = q_{cc_t} - e_t^{cc}(\boldsymbol{\beta}) + e_t^M \quad (5)$$

Por fim, o conhecimento hidráulico da seção é utilizado para definição das distribuições a priori. Para tal, a curva-chave é descrita por um modelo de potência, conforme apresentado na Equação 6.

$$Q = a(h - b)^c \quad (6)$$

Conhecido o tipo de controle hidráulico, isso é, as características físicas que governam a relação entre cota e vazão na seção em análise, é possível fazer associações físicas com os parâmetros do modelo. Em caso de controle hidráulico de canal, em que o fluxo é controlado pela geometria e pela rugosidade do canal, pode-se utilizar a equação de Manning, dada pela Equação 7.

$$Q = \frac{1}{n} A \sqrt{S} R_h^{2/3} \quad (7)$$

em que  $Q$  é a vazão de água na seção,  $n$  é o coeficiente de rugosidade de Manning,  $A$  é a área molhada da seção transversal e  $R_h$  é o raio hidráulico.

Dessa forma, a equação de Manning pode auxiliar na estimativa dos parâmetros do modelo curva-chave a partir de características físicas, conforme apresentado na Tabela 2, e, assim, utilizadas como distribuições *a priori* no modelo Bayesiano. Dessa forma, devem ser estimadas as larguras da seção transversal, a cota inferior ( $b$ ), a declividade ( $S$ ) e o coeficiente de rugosidade de Manning ( $n$ ).

Tabela 2 – Parâmetros do modelo curva-chave

Tipo de controle	$a$	$b$	$c$
Canal	$\frac{1}{n} B \sqrt{S}$	Média do nível do leito	5/3

Fonte: Adaptado de Le Coz *et al.* (2014)

Para a estação Acorizal, foram considerados dois controles hidráulicos: para vazões mais baixas, com nível de água entre os estágios  $k_1$  e  $k_2$ , foi considerado controle de canal dado pela calha

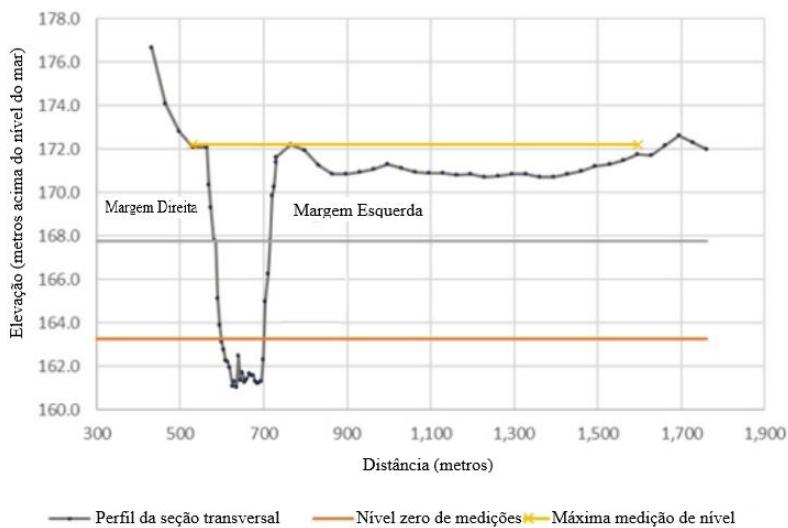
menor. Para vazões mais altas, com nível de água acima do estágio de ativação  $k_2$ , é considerado controle de planície, somado à vazão do estágio anterior. Essa relação é ilustrada pela Equação 8.

$$f_{cc}(h_t, \theta) = \begin{cases} a_1(h_t - b_1)^{c_1}, & \text{se } k_1 < h_t < k_2 \\ a_1(h_t - b_1)^{c_1} + a_2(h_t - b_2)^{c_2}, & \text{se } k_2 < h_t \end{cases} \quad (8)$$

A Figura 3 apresenta o perfil transversal da estação Acorizal, a partir do qual é possível obter as larguras da calha e da planície de inundação, além dos parâmetros  $b_1$  e  $b_2$ . Destaca-se que o valor de  $b_2$  é equivalente ao valor de  $k_2$ , referentes à cota da planície de inundação.

A vegetação da região é composta predominantemente por savana e cerrado, ou seja, vegetações rasteiras e de médio porte mais presentes nas margens do trecho fluvial (Vieira et al., 2022). Essa informação foi utilizada para subsidiar a definição do coeficiente de Manning, definido conforme limites apresentados em Baptista e Lara (2014).

Figura 3 – Perfil transversal da estação Acorizal



Fonte: Adaptado de Vieira et al. (2022)

A partir da análise dos dados disponibilizados em Vieira et al. (2022), os parâmetros  $B_1$ ,  $B_2$ , relativos à largura da calha e da planície, respectivamente, e a declividade ( $S$ ) foram considerados uniformemente distribuídos, definindo assim as distribuições *a priori*:  $B_1 \sim Uniforme(150; 180)$ ,  $B_2 \sim Uniforme(950; 1150)$  e declividade  $S \sim Uniforme(0,1; 0,5)$ . Considerou-se também que o coeficiente de rugosidade de Manning é regido por uma distribuição *a priori* normal. Para a calha,  $n$  a distribuição é centrada em 0,033, enquanto para a planície  $n$  foi centrado em 0,05. O desvio padrão foi definido a partir dos limites inferiores e superiores propostos conforme Vieira et al. (2022), de (0,025; 0,045) para a calha e (0,02; 0,08) para a planície. Assim, a variância do parâmetro  $n$  foi definida a partir da expansão da série de Taylor de primeira ordem, conforme apresentado por Vieira et al. (2022). Já a distribuição *a priori* dos parâmetros  $b_1$  e  $b_2$  foram considerados normalmente distribuídos, centrados em -2 m e 8 m, com desvio-padrão de 0,25 m e 1 m, respectivamente, ou seja,  $b_1 = k_1$  e  $b_2 = k_2$ . Os parâmetros  $c_1$  e  $c_2$  também foram considerados normalmente distribuídos, com desvio-padrão de 0,025, conforme formulação original proposta pelo método BaRatin (Le Coz et al., 2014). Por fim, o desvio-padrão do erro da medição foi considerado de 0,05 m<sup>3</sup>/s.

A função de verossimilhança para o modelo pode ser representada por:

$$p(\tilde{\mathbf{q}} | \boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\beta}, \mathbf{h}) = \prod_{i=1}^M Normal(\tilde{q}_{ti}; q_{cc_{ti}}, (\beta_0 + \hat{q}_t \beta_l)^2 + \delta_{ti}^2) \quad (9)$$

A distribuição *a posteriori* dos parâmetros, por sua vez, pode ser obtida por a partir da aplicação do teorema de Bayes. Formalmente:

$$\underbrace{p(\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\beta} | \tilde{\mathbf{H}}, \tilde{\mathbf{Q}})}_{\text{posteriori}} \propto \underbrace{p(\tilde{\mathbf{Q}} | \boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\beta}, \tilde{\mathbf{H}})}_{\text{verossimilhança}} * \underbrace{p(\boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\beta})}_{\text{priori}} \quad (10)$$

A inferência Bayesiana pelo método de Monte Carlo por cadeias de Markov (MCMC) foi realizada por meio do software STAN, que utiliza o método Monte Carlo Hamiltoniano (HMC) (STAN, 2025b). A interface com o RStudio foi feita a partir do RStan (STAN, 2025c). No modelo utilizado, foram utilizadas 4 cadeias com 1.000 iterações cada, e *warm-up* equivalente à metade das iterações. Para a análise da convergência das cadeias, foi verificada a comparação da convergência inter e intra-cadeias, a partir do critério denominado  $\hat{R}$  (*Rhat*). Considera-se que houve convergência quando o valor obtido é abaixo de 1,10.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 4 apresenta os resultados obtidos para os quatro modelos simulados, sendo destacada a incerteza paramétrica, a incerteza total e a incerteza do controle de ativação da planície de inundação (parâmetro  $k_2$ ). De forma complementar, a Tabela 3 apresenta os valores medianos e os limites de 2,5% e 97,5% dos parâmetros que definem a curva-chave, para todos os modelos.

É possível observar que a incerteza do controle de ativação (parâmetro  $k_2$ ), para todos os modelos, foi a que mais se destacou no quesito Intervalo de Credibilidade (IC), o que, provavelmente, impactou a incerteza paramétrica para as cotas mais altas. Tal fato pode estar associado a grande incerteza na elicição da distribuição *a priori* e também da "ausência" de medições altas para atualizar o conhecimento *a priori* a respeito desse parâmetro. Na região de vazões medianas, as incertezas paramétrica e total tenderam a ser muito reduzidas, em virtude do grande número de medições disponíveis.

A partir dos resultados ilustrados na Tabela 3, nota-se que tanto o valor mediano quanto o IC do coeficiente de rugosidade de Manning do canal ( $n_c$ ) sofreram menores variações quando comparados aos da planície ( $n_p$ ), uma vez que os registros geralmente foram coletados com o escoamento ocorrendo apenas no canal. Já a distribuição *a posteriori* da declividade foi semelhante em todos os modelos avaliados. Os parâmetros  $B_1$  e  $B_2$  não parecem ter sensibilidade a inserção de dados. Quanto aos parâmetros relacionados à curva-chave ( $a_1, b_1, c_1, a_2, b_2$  e  $c_2$ ) pode-se notar flutuações a respeito do tamanho dos ICs, redução dos ICs para  $b_2$  e aumento para  $a_2$  à medida que mais dados extremos são inseridos. Observa-se também uma ligeira redução no tamanho do IC de  $k_2$ , entretanto, como anteriormente afirmado, tal valor ainda é expressivo. Em relação à  $\beta_0$  e  $\beta_1$  não foi observada variação expressiva em seus valores, apenas uma leve flutuação em torno de 4,3 e 0,015, respectivamente, com exceção de  $\beta_1$  para o Modelo 4, que se mostrou ligeiramente superior, mas com IC semelhante aos demais modelos.

Figura 4 – Curvas-chaves para os quatro modelos simulados

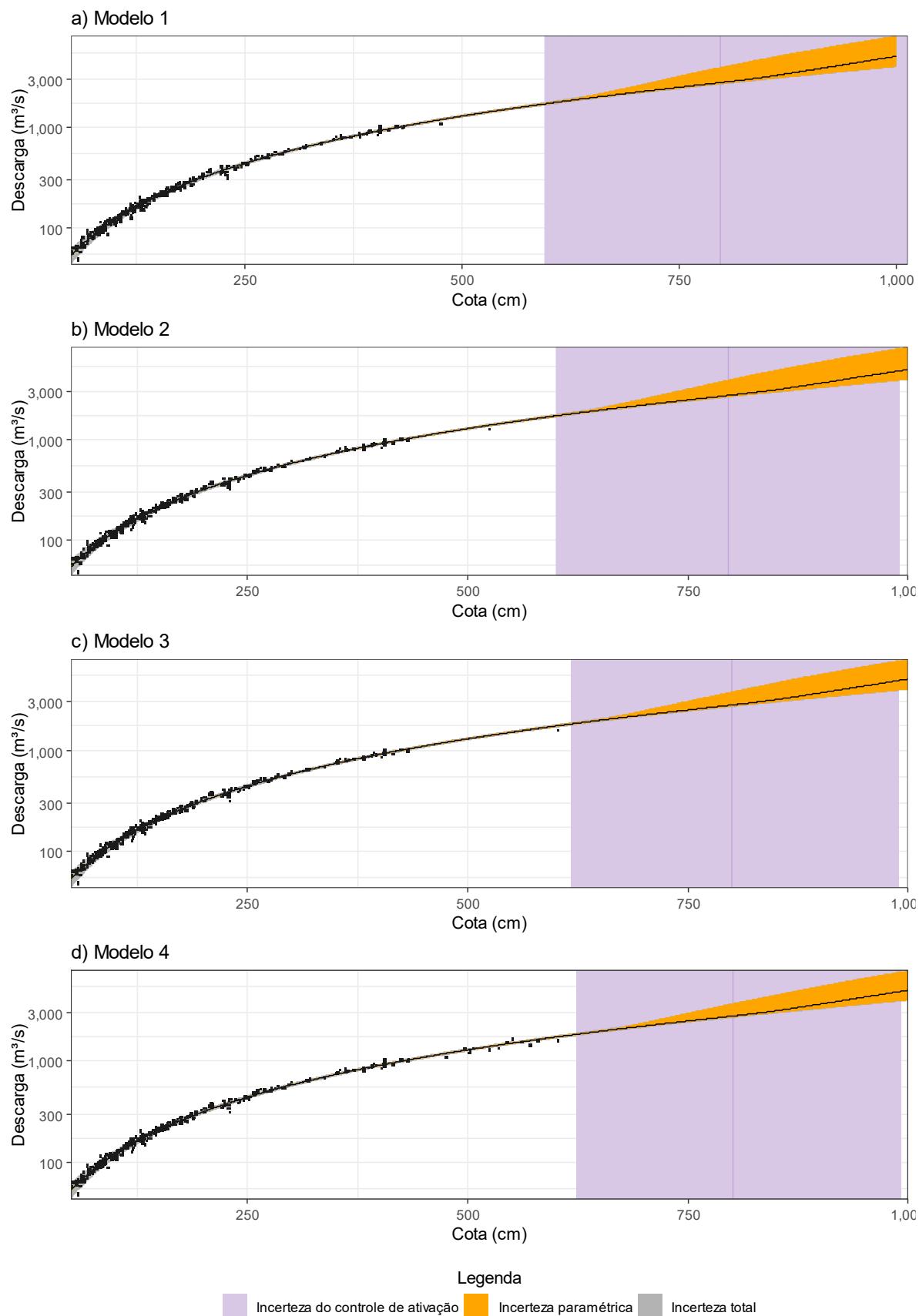


Tabela 3 - Resumo das distribuições *a posteriori* dos parâmetros

Parâmetro	Modelo 1			Modelo 2			Modelo 3			Modelo 4		
	2,5%	50%	97,5%	2,5%	50%	97,5%	2,5%	50%	97,5%	2,5%	50%	97,5%
$n_c$	0,0259	0,0334	0,0430	0,0258	0,0335	0,0432	0,0257	0,0334	0,0432	0,0261	0,0337	0,0431
$n_p$	0,0235	0,0504	0,0762	0,0250	0,0501	0,0761	0,0242	0,0501	0,0769	0,0255	0,0501	0,0745
$S$	0,0001	0,0003	0,0005	0,0001	0,0003	0,0005	0,0001	0,0003	0,0005	0,0001	0,0003	0,0005
$B_1$	150,8	165,4	179,2	150,7	165,3	179,4	151,0	165,0	179,0	151,0	165,1	179,1
$B_2$	954,8	1051,9	1145,3	955,9	1051,4	1144,6	953,7	1049,7	1146,2	956,1	1052,1	1145,2
$a_1$	70,7	75,6	80,9	70,4	75,5	81,4	70,8	75,9	81,4	72,1	77,1	82,0
$b_1$	-0,358	-0,315	-0,268	-0,363	-0,315	-0,265	-0,359	-0,313	-0,265	-0,348	-0,304	-0,261
$c_1$	1,66	1,70	1,74	1,66	1,70	1,74	1,66	1,70	1,73	1,65	1,69	1,72
$a_2$	127,0	367,8	622,4	108,3	363,2	641,9	105,0	369,1	624,5	116,2	367,2	625,6
$b_2$	5,96	7,97	10,14	6,00	7,97	9,91	6,17	8,00	9,90	6,24	8,02	9,92
$c_2$	1,62	1,67	1,71	1,62	1,67	1,71	1,62	1,67	1,72	1,62	1,67	1,71
$k_2$	6,0	8,0	10,1	6,0	8,0	9,9	6,2	8,0	9,9	6,2	8,0	9,9
$\beta_0$	2,6	4,3	5,9	2,8	4,4	5,9	2,5	4,3	6,0	2,5	4,2	5,9
$\beta_1$	0,0010	0,0116	0,0251	0,0011	0,0114	0,0253	0,0008	0,0116	0,0256	0,0011	0,0129	0,0260

$n_c$  refere-se ao coeficiente de Manning para o canal

$n_p$  refere-se ao coeficiente de rugosidade de Manning para a planície.

Por fim, foram utilizados cenários com diferentes informações, de forma a analisar o ganho na análise a partir da introdução de informações de eventos extremos. Entretanto, foi observado que, mesmo nos casos em que as medições realizadas se aproximam da planície de inundação, a incerteza resultante no trecho de extração é considerável, o que aponta para a necessidade de medições, principalmente de eventos com escoamento na planície, fatos que ocorrem em eventos mais raros. Conforme apresentado pelo Modelo 4, a introdução de informação mais próxima à planície de inundação foi responsável por reduzir em 12% a incerteza do estágio de ativação (valor do IC de  $k_2$ ). Portanto, em função da falta de dados para a análise, não é possível afirmar a quantidade mínima de dados para obter uma redução maior que 15% nos ICs dos parâmetros inferidos.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo utilizou o método BaRatin, que, com o auxílio da inferência Bayesiana para calibração dos parâmetros de curvas-chave, possibilita quantificação dos diversos tipos de erros dos parâmetros da curva-chave. Cabe destacar que um dos diferenciais do método é a possibilidade de incorporar conhecimento físico a partir de informações hidráulicas facilmente obtidas.

No caso apresentado neste estudo, foi analisada a estação Acorizal, localizada no rio Cuiabá, onde há histórico de cheias e inundações. O estudo objetivou comparar cenários com diferentes informações e analisar a redução da incerteza total dos parâmetros por meio de seus intervalos de credibilidade. Entretanto, não foram realizadas medições na planície de inundação, e os resultados em todos os cenários indicaram para uma parcela considerável de incerteza associada ao parâmetro  $k_2$ , que controla o estágio de ativação da planície de inundação, i.e., a partir da cota  $k_2$  é que há extravasamento do canal.

Dessa forma, o problema da incerteza nos valores para vazões elevadas, i.e., associadas a cotas mais altas, parece necessitar de mais investigações. Os resultados apontam para necessidade de estender as técnicas de medição de vazão para a ocorrência de vazões mais raras, e, com isso, obter curvas-chave sujeitas a menores erros.

## REFERÊNCIAS

ANA. **HidroWeb - Sistema de Informações Hidrológicas.** Disponível em: <<http://www.snhirh.gov.br/hidroweb/publico/apresentacao.jsf>>. Acesso em: 17 jun. 2025.

BAPTISTA, Márcio; LARA, Márcia. **Fundamentos de Engenharia Hidráulica.** 4. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014.

DI BALDASSARRE, Giuliano; CLAPS, Pierluigi. A hydraulic study on the applicability of flood rating curves. **Hydrology Research**, v. 42, n. 1, p. 10–19, 1 fev. 2011.

DOMENEGHETTI, A.; CASTELLARIN, A.; BRATH, A. Assessing rating-curve uncertainty and its effects on hydraulic model calibration. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 16, n. 4, p. 1191–1202, 11 abr. 2012.

KIANG, Julie E. *et al.* A Comparison of Methods for Streamflow Uncertainty Estimation. **Water Resources Research**, v. 54, n. 10, p. 7149–7176, out. 2018.

KUCZERA, George. Comprehensive at-site flood frequency analysis using Monte Carlo Bayesian inference. **Water Resources Research**, v. 35, n. 5, p. 1551–1557, maio 1999.

LANG, Michel *et al.* Accounting for historical data uncertainty in flood frequency analysis: the Upper Rhine River. **Journal of Hydrology**, v. 660, p. 133480, out. 2025.

LE COZ, J. *et al.* Combining hydraulic knowledge and uncertain gaugings in the estimation of hydrometric rating curves: A Bayesian approach. **Journal of Hydrology**, v. 509, p. 573–587, fev. 2014.

MOYEEED, R. A.; CLARKE, R. T. The use of Bayesian methods for fitting rating curves, with case studies. **Advances in Water Resources**, v. 28, n. 8, p. 807–818, ago. 2005.

REITAN, Trond; PETERSEN-ØVERLEIR, Asgeir. Bayesian methods for estimating multi-segment discharge rating curves. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v. 23, n. 5, p. 627–642, jul. 2009.

SIKORSKA, A. E. *et al.* Considering rating curve uncertainty in water level predictions. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 17, n. 11, p. 4415–4427, 8 nov. 2013.

VIEIRA, Luan Marcos Da Silva *et al.* Assessing the effects of rating curve uncertainty in flood frequency analysis. **RBRH**, v. 27, p. e11, 2022.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro e institucional à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).