

## XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

### **AJUSTE AUTOMATIZADO DE CURVAS-CHAVE A PARTIR DA INTEGRAÇÃO COM O SOFTWARE R**

*Lucas Andrade dos Santos<sup>1</sup>; Matheus Beltrame Dazilio<sup>2</sup>; Michel Castro Moreira<sup>3</sup>;*

*Ricardo Santos Silva Amorim<sup>3</sup> & Demetrius David da Silva<sup>3</sup>*

**Abstract:** The most common method for monitoring streamflow in water sources is through the relationship between river discharge and stage, known as the rating curve. This study aimed to fit rating curves for the streamflow gauging stations in the State of Espírito Santo, Brazil. Stage and discharge data from 90 stations in the state, available on the HidroWeb platform of the National Water and Basic Sanitation Agency (ANA), were used. R routines were developed to automate the fitting processes, taking into account not only changes in the stage–discharge relationship, but also incorporating variations in the channel cross-sections as boundary conditions. The results, summarized through statistical metrics, indicate that the proposed methodology was able to adequately represent the stage–discharge relationship. The observed deviations, in terms of overestimation and underestimation of the discharge estimates using the fitted rating curves, were low, reinforcing the reliability of the applied methods. Further improvements to the developed R routines are necessary to incorporate stations affected by changes in the riverbed, hydraulic control effects, or other alterations.

**Resumo:** O método mais comum para monitorar as vazões em mananciais hídricos é utilizando a relação existente entre a descarga de um rio e sua cota, conhecida como curva-chave. Este trabalho teve por objetivo ajustar as curvas-chave das estações fluviométricas do Estado do Espírito Santo. Foram utilizados os dados de cota e vazão, disponíveis na plataforma HidroWeb da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), de 90 estações do Estado. Rotinas em R foram desenvolvidas para automatização dos processos de ajuste, considerando não só as mudanças na relação de nível d'água e descarga líquida, como também adotando as variações nas seções transversais do leito como variável de contorno. Os resultados, sintetizados por meio de métricas estatísticas, indicam que a metodologia proposta foi capaz de representar de forma adequada a relação cota-vazão. Os desvios evidenciados de superestimação e subestimação das estimativas de vazão utilizando as curvas-chave ajustadas mostraram-se baixos, reforçando a confiabilidade dos métodos aplicados. Avanços nas rotinas em R desenvolvidas são necessários para incluir estações sujeitas a mudanças no leito, efeitos de controles hidráulicos ou outras alterações.

**Palavras-Chave** – Hidrometria, Modelagem Hidrológica, Estado do Espírito Santo.

1) Mestrando em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, lucas.andrae@ufv.br.

2) Graduando em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, matheus.dazilio@ufv.

3) Professor do Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, michelcm@ufv.br, rsamorim@ufv.br, demetrius@ufv.br.

## 1. INTRODUÇÃO

A medição de vazão em rios é um processo caro e trabalhoso, pois requer o uso de equipamentos como molinete, ou medidor acústico, suporte para posicionar o molinete em diferentes profundidades, embarcações, mobilização até os locais de medição e uma equipe de profissionais qualificados, o que dificulta a sua mensuração com muita frequência (Collischonn e Dornelles, 2015). Com isso, o método mais comum para monitorar as vazões em mananciais é utilizando a relação existente entre a descarga de um rio e sua cota (nível d'água), conhecida como curva-chave (Tamwing *et al.* 2022).

As curvas-chave desempenham um papel fundamental no que tange o monitoramento dos corpos hídricos, ao possibilitarem a estimativa rápida das vazões em uma determinada seção e representarem, de forma física e simplificada, os processos hidrológicos envolvidos (Jacon e Cudo, 1989). Contudo, em muitos locais em que há medição da cota dos rios, os principais desafios para o planejamento sustentável e a preservação dos recursos hídricos é a ausência da curva-chave e, conseqüentemente, de séries históricas consistentes de vazão, o que promove a incerteza na modelagem hidrológica (Vieira *et al.*, 2022).

Essa deficiência acaba comprometendo análises hidrológicas, bem como a formulação de modelos preditivos confiáveis para a tomada de decisões acerca do gerenciamento de recursos hídricos e, também, na adoção de atividades econômicas intensivas, especialmente a agricultura irrigada, a qual demanda água em volumes significativos (Eekhout *et al.* (2024)). O problema se agrava ainda mais devido à falta de análises de consistência e consolidação dos dados hidrológicos disponíveis, que frequentemente apresentam falhas ao longo das séries históricas de diferentes estações fluviométricas (Souza *et al.*, 2019).

A escassez de dados confiáveis compromete a realização de estudos hidrológicos, trazendo prejuízos na adoção de uma adequada gestão de recursos hídricos. Em regiões e estados do país que já sofrem com eventos extremos de disponibilidade hídrica, a disponibilização de dados confiáveis se torna ainda mais importante (Lopes *et al.*, 2023).

O estado do Espírito Santo (ES) está em condição de atenção quanto à disponibilidade hídrica, pois seus mananciais vêm apresentando níveis muito baixos devido à falta de precipitação e potencialização da evapotranspiração (AGERH, 2024). Outrossim, por mais que períodos de estiagem sejam normais em certas épocas, o estado capixaba vem apresentando um crescente aumento na intensidade de secas e muitas anomalias na ocorrência de chuvas, sendo a priori consequência das mudanças climáticas global.

O desafio de determinar as curvas-chave em locais com deficiência dessas informações é oportuno, porém superável. Com a implementação de ferramentas computacionais adequadas, esse processo pode ser conduzido com alta precisão e agilidade (Wara *et al.*, 2019). Destaca-se também, nesse contexto, o uso do software *R*, que permite não só a geração delas, como também o ajuste de diferentes equações para distintos períodos de variação na relação entre cota e vazão. Essa abordagem é uma técnica promissora, pois permite representar adequadamente a dinâmica hidrológica em regiões com registros históricos limitados, contribuindo significativamente na gestão das águas.

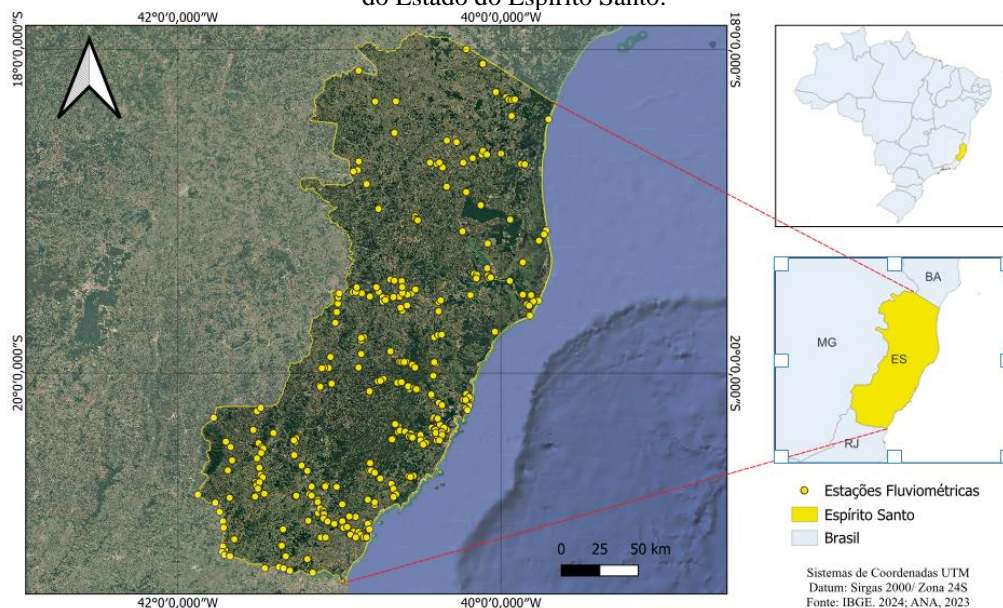
Assim, o presente trabalho tem como objetivo implementar um procedimento automatizado para o ajuste de curvas-chave em estações fluviométricas localizadas no estado do Espírito Santo, considerando as mudanças inerentes à seção transversal do rio e utilizando o software *R*.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1. Área de estudo

O estado do Espírito Santo (Figura 1) é uma das 27 unidades federativas do Brasil, possuindo uma população de 3.833.712 habitantes segundo o último censo (IBGE, 2022). Está localizado na região sudeste do país e possui cerca de 46.074,448 km<sup>2</sup>.

**Figura 1:** Localização da área de estudo com a identificação das estações fluviométricas do Estado do Espírito Santo.



Fonte: Autores (2025).

### 2.2. Dados fluviométricos

Para a execução da presente pesquisa, um total de 350 estações fluviométricas distribuídas no estado do Espírito Santo foram analisadas. Os dados hidrológicos utilizados foram obtidos junto à Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), por meio da plataforma digital HidroWeb. As informações, atualizadas até 30/11/2023, subsidiaram as análises realizadas e estão acessíveis em: <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>.

Das 350 estações identificadas, foram analisadas apenas as que possuíam registro de série histórica de monitoramento de vazão e do perfil transversal da seção do rio, as quais totalizaram 90 estações. Para a preparação inicial dos dados, utilizando o software Microsoft *Excel365*, foram filtradas as seguintes variáveis: *NivelConsistencia* (nível de consistência, sendo 1 para dados não consistidos e 2 para dados homologados); *Data* (período no qual foram realizadas as medições); *Cota* (medição do nível d'água); *Vazao* (medição de descarga líquida para determinada cota); *AreaMolhada* (área da seção transversal do rio que efetivamente está em contato com a água) e *VelMedia* (velocidade média do escoamento da água em uma determinada seção do rio).

Para verificar possíveis inconsistências nos dados de medição de vazão, utilizou-se o produto entre a área molhada e a velocidade média como forma de validar os valores observados em campo, conforme o procedimento adotado pelas entidades responsáveis pelo monitoramento das estações da ANA para a determinação da vazão.

Em seguida, aplicou-se o recurso de *remoção de duplicatas* com o intuito de eliminar a repetição de informações. Na sequência, com a função *MEDIASE*, calcularam-se os valores médios de cota e vazão referente a cada data de medição. Esse procedimento foi importante, uma vez que,

em determinados casos, havia múltiplas medições em um mesmo dia, com pequenas variações nos valores contabilizados, o que poderia comprometer a precisão do ajuste da curva-chave.

Os dados de cada estação foram extraídos e organizados em uma base de dados, que novamente foi filtrada, deixando apenas os dados de *Data*, *Cota* e *Vazao*, após todo tratamento feito.

### 2.3. Identificação dos pontos de mudanças

Com a base de dados previamente tratada, ela foi importada para o ambiente de desenvolvimento do método, o software R (R Core Team, 2024). O objetivo da análise foi identificar cenários com alterações significativas na relação entre cota e vazão, a fim de detectar os pontos em que essas mudanças ocorreram. Para isso, a rotina de códigos desenvolvida utiliza os valores de cota e vazão, que apresentam comportamento semelhante ao de uma função potencial, e aplica transformações logarítmicas aos dados por meio da função  $\log()$ , convertendo-os para um formato linear. Em seguida, aplicou-se a função  $\text{breakpoints}()$  sobre os dados transformados. A função permite identificar pontos de mudança estrutural em séries temporais ou em modelos de regressão, o que possibilitou a identificação de possíveis variações nesta relação.

É válido ressaltar que as transformações logarítmicas asseguraram o uso eficiente da função  $\text{breakpoints}()$ . Além disso, o parâmetro  $h = 0.1$ , integrado à mesma, o qual estabelece que cada segmento entre os pontos de quebra deve conter, no mínimo, 10% do total das observações. Essa configuração assegura que cada trecho da série disponha de dados suficientes para viabilizar um ajuste confiável da curva-chave.

As alterações no leito do rio foram consideradas como a condição de contorno adotada neste estudo, pois elas interferem diretamente as propriedades físicas da seção transversal (forma, área molhada, perímetro molhado e rugosidade), o que afeta o escoamento (Souza *et al.*, 2019). Para aplicar essa abordagem ao método, utilizaram-se os dados de batimetria do rio registrados em cada estação analisada, a partir dos quais foram gerados os perfis transversais correspondentes a cada período de observação. Utilizando rotinas em R verificou-se por meio da análise gráfica, sobrepondo os perfis e, também, por meio de análises quantitativas, calculando a diferença média de cota entre os perfis, se os pontos de mudanças identificados apresentavam coerência com as alterações geométricas observadas no leito do rio.

### 2.4. Ajuste das curvas-chave

Uma síntese da abordagem realizada e do conjunto de dados utilizados é apresentada na Figura 2. Os registros de cota e vazão são a base principal para ajuste das curvas-chave, cujas mudanças são controladas pelas seções transversais do rio.

Para a realização dos ajustes de curvas-chave foi empregada na rotina de códigos desenvolvida no R a metodologia proposta por Jaccon e Cudo (1989), representada pela Equação 1. Essa equação foi escolhida por apresentar menores desvios relativos às vazões medidas, fazendo seu ajuste pelo método dos Mínimos Quadrados. Além disso, a abordagem em questão ganha ainda mais segurança devido a condição de contorno estabelecida anteriormente.

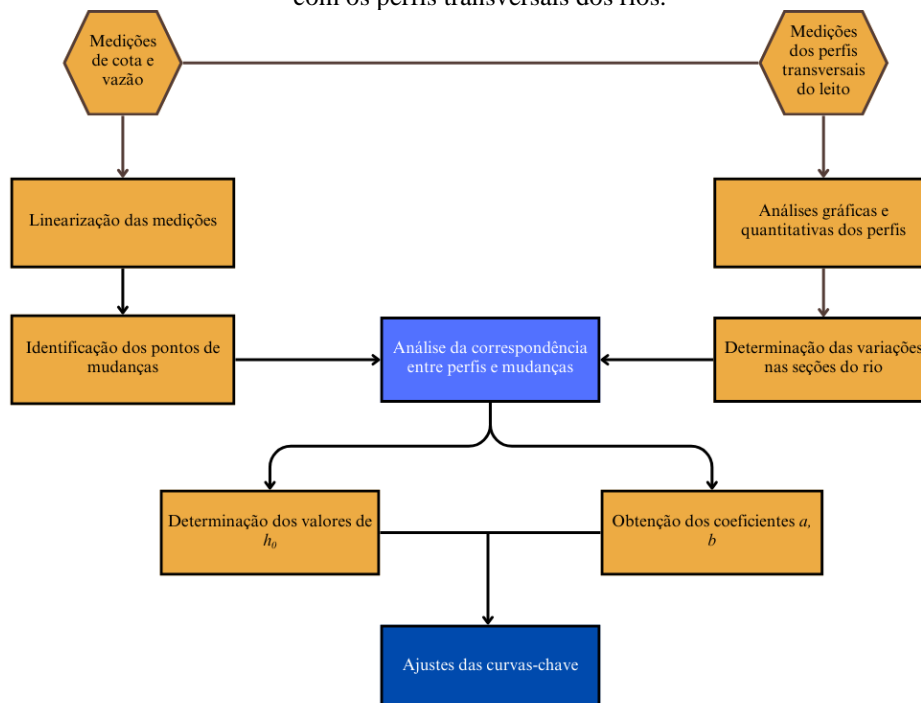
$$Q = a(h - h_0)^b \quad (1)$$

em que:

$Q$	=	vazão calculada, em m <sup>3</sup> /s;
$h$	=	cota d'água, em m;
$a, b$	=	parâmetros da estação a serem determinados, adimensional; e
$h_0$	=	valor de cota quando $Q = 0$ , em m.



**Figura 2:** Procedimento desenvolvido para o ajuste das curvas-chave da relação cota-vazão com os perfis transversais dos rios.



Fonte: Autores (2025).

Ressalta-se que, para cada estação analisada e a cada ponto de mudança identificado, foram ajustadas equações conforme o modelo previamente descrito. Dessa forma, foram calculados, para cada estação, os coeficientes  $a$  e  $b$ , além do  $h_0$  correspondente.

Os valores de  $h_0$  representam as cotas correspondentes à condição de vazão praticamente nula. Eles foram definidos com base no menor valor de cota observado em cada ponto de mudança, subtraindo-se uma unidade desse valor. Essa abordagem estabelece um limite inferior artificial, que serve como referência para a delimitação da curva-chave.

Os parâmetros  $a$  e  $b$  foram obtidos por meio de um processo iterativo também em ambiente R, juntamente com suas funcionalidades empregadas, onde, a partir dos modelos definidos, foram obtidos os valores correspondentes a cada uma das variáveis. Primeiro foi utilizada a função  $nls()$  (nonlinear least squares) para ajuste dos modelos do tipo  $Q = a(h - h_0)^b$ . Após o ajuste, os valores de  $a$  e  $b$  foram obtidos utilizando a função  $coef()$ .

Para validação das curvas-chave, além da análise do coeficiente de determinação ( $R^2$ ), foram adotadas as recomendações propostas pela ANA (2015), entre as quais destaca-se a exigência de que o valor médio das medições no traçado tolere um desvio máximo de 20%. Esse desvio foi calculado com base na diferença entre as vazões estimadas e as vazões medidas, conforme a equação:

$$Desvio = \left( \frac{Q_{est} - Q_{obs}}{Q_{est}} \right) \times 100 \quad (2)$$

em que:

$Desvio$	=	valor que indica a discrepância relativa entre os valores, %;
$Q_{est}$	=	vazão estimada pela curva-chave, em m <sup>3</sup> /s; e
$Q_{obs}$	=	vazão medida durante a observação, em m <sup>3</sup> /s.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 3 são apresentados detalhes de algumas das estações analisadas no estudo. As alterações sofridas no leito de cada rio são também ilustradas, tendo em vista que as curvas-chave foram determinadas com base nelas, porém, é importante destacar que outros fatores podem influenciar essa relação de forma ainda mais significativa que a seção transversal do curso d'água, como a proximidade de controles hidráulicos (mananciais, barragens), a rugosidade do leito, características hidrodinâmicas locais, efeitos de histerese e eventuais mudanças no comportamento das curvas.

O comportamento da relação cota-vazão não foi adequadamente representado em algumas situações específicas: (i) influência de remanso causado por hidrelétricas locais; (ii) mudanças no padrão da relação cota-vazão em diferentes faixas de profundidade; e (iii) ocorrência de vazões nulas ao longo da série histórica; sendo esses casos ilustrados na Figura 3. Destaca-se, em especial, a estação 55850000, que apresenta uma mudança significativa no comportamento dessa relação, resultando em um ajuste estatístico inferior ao recomendado na literatura ( $R^2 < 0,7$ ) (Cohen, 1998)).

Embora a seção 55900000 apresente um  $R^2$  próximo à unidade, é importante observar que no ponto de mudança identificado em 2015, não foram constatadas variações significativas no leito do rio, indicando uma possível inconsistência na metodologia aplicada. No entanto, esse desvio pode ser atribuído à influência de outras variáveis não contempladas nas condições de contorno adotadas neste estudo. Ressalta-se ainda que esse tipo de ocorrência foi pontual e não se repetiu nas demais análises, não comprometendo, portanto, a validade geral dos resultados.

Para as estações indicadas em verde, observa-se não apenas um excelente ajuste dos modelos, mas também uma forte associação entre os pontos de mudanças e as variações nos perfis transversais dos rios. Nas estações 57170000 e 57490000, por exemplo, as mudanças ocorreram nos anos de 1982 e 2014, respectivamente. Conforme indicado na Figura 3, os leitos dos rios permaneceram praticamente inalterados nesses períodos, sem variações abruptas, mostrando que o método está bem alinhado com a condição de contorno determinada. De modo geral, os resultados demonstram que o método proposto é adequado para a construção de curvas-chave em locais onde o leito do rio se configura como a principal variável determinante da relação entre a cota e a vazão.

Na Tabela 1 apresentam-se os ajustes das curvas-chave realizados para as estações fluviométricas do Estado do Espírito Santo, discriminando os diferentes períodos de validade identificados com base nas mudanças no comportamento hidrológico. Para cada curva ajustada, são informados os respectivos coeficientes de determinação ( $R^2$ ) e os desvios, que indicam o grau de superestimação ou subestimação das vazões calculadas em relação às observadas em campo.

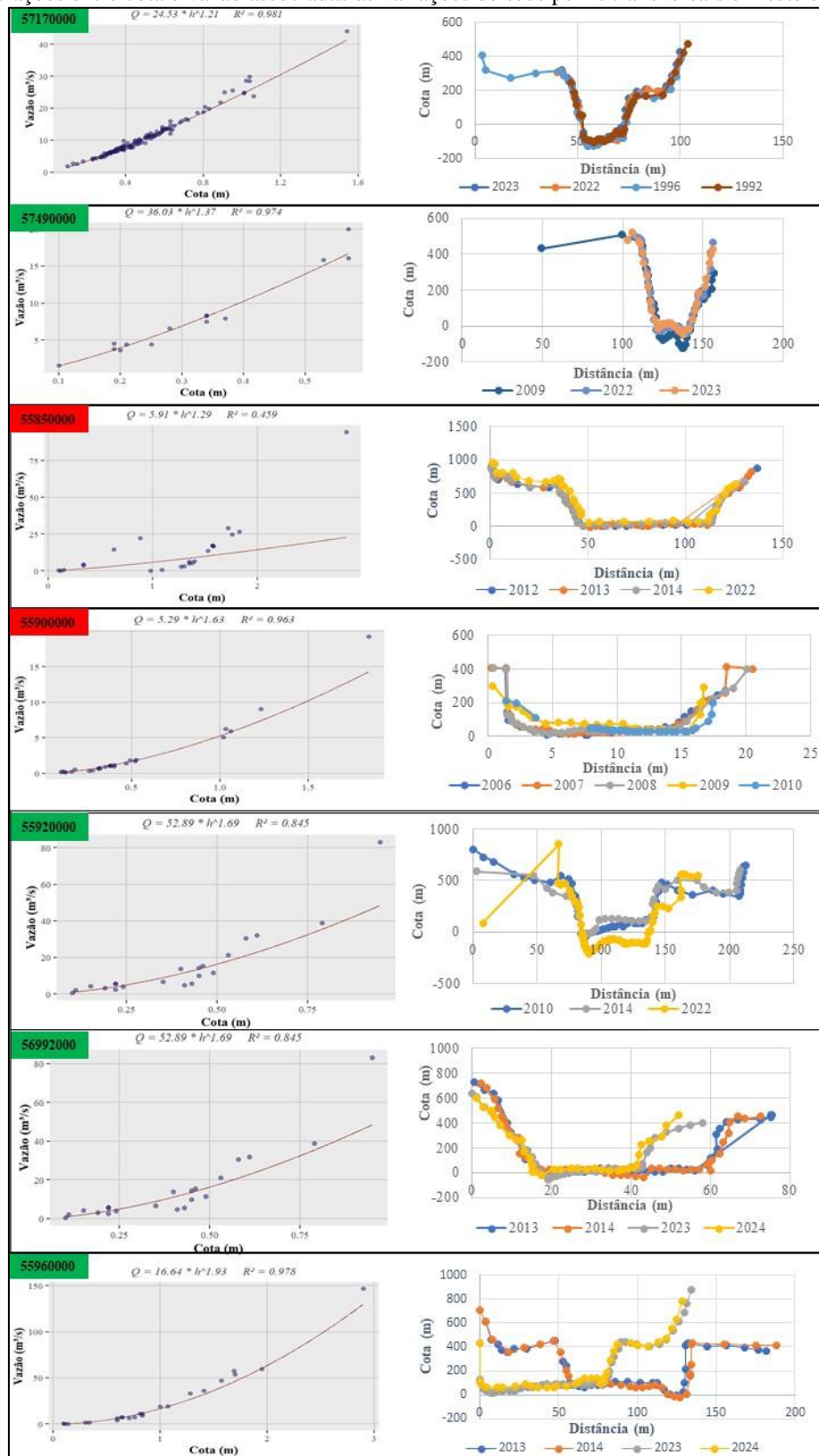
Verifica-se que, em alguns casos — destacados em vermelho na Tabela 1 —, as estações 55810000, 57440000, 57750000, 57119500 e 56993551 não apresentaram curvas-chave associadas. Isso se deve à insuficiência de dados de medições de descarga líquida, impossibilitando o ajuste de um modelo representativo. Além disso, a presença de vazões próximas de zero comprometeu a etapa de linearização, uma vez que o logaritmo natural de zero é indefinido do ponto de vista matemático. Dessa forma, essa etapa, essencial para a aplicação eficaz da metodologia, tornou-se inviável.

Pela análise dos dados da Tabela 1 verifica-se que a maioria das equações apresentaram valores de  $R^2$  elevados (próximos de 1) e desvios inferiores a 20%, o que indica um bom desempenho dos modelos, com estimativas de vazão bastante próximas das medições realizadas em campo.

Cabe ressaltar que, das 90 estações inicialmente consideradas, algumas foram sintetizadas ou desconsideradas ao longo da aplicação da metodologia. Essa decisão deve-se à identificação de inconsistências nos dados, como a ausência de informações sobre as seções transversais, o que

inviabilizou a continuidade de sua análise e comprometeu a aplicação completa do procedimento proposto.

**Figura 3:** Relações entre cota e vazão associadas às variações de seus perfis transversais em sete estações no ES.



Fonte: Autores (2025).

**Tabela 1: Curvas-chave ajustadas por período de aplicação com seus respectivos coeficientes de determinação ( $R^2$ ) e desvios percentuais entre os valores observados e estimados.**

Código	Curva-Chave	Ano	$R^2$	Desvio (%)
55744000	$Q = 15.6(h - 0.65)^{0.705}$	2001 - 2002	0,985	-18,27
	$Q = 18.1(h - 0.6)^{0.672}$	2002 - 2005	0,977	-14,40
	$Q = 10.7(h - 0.15)^{0.814}$	2001 - 2013	0,929	3,65
55746000	$Q = 6.11(h - 0.88)^{1.41}$	2013 - 2015	0,985	-2,03
	$Q = 9.33(h - 0.74)^{1.20}$	2015 - 2017	0,962	-27,77
	$Q = 4.78(h - 0.97)^{0.948}$	2017 - 2020	0,974	1,71
	$Q = 6.95(h - 0.08)^{0.802}$	2001 - 2008	0,829	-14,75
55747000	$Q = 5.33(h - 0.84)^{1.45}$	2008 - 2014	0,887	-38,25
	$Q = 1.71(h - 0.69)^{0.21}$	2014 - 2017	0,756	-43,90
	$Q = 2.58(h - 0.26)^{0.615}$	2001 - 2002	0,82	-40,32
55795000	$Q = 3.36(h - 0.03)^{0.964}$	2002 - 2005	0,944	-54,48
55810000	-	-	-	-
55850000	$Q = 47(h - 0.21)^{1.49}$	1969 - 2015	0,966	-0,14
	$Q = 5.91(h - 0.11)^{1.29}$	2015 - 2023	0,459	-16,35
55895000	$Q = 20.7(h - 0.44)^{1.29}$	1969 - 1992	0,97	0,83
	$Q = 21.2(h - 0.34)^{1.02}$	1992 - 2003	0,944	1,22
	$Q = 16.6(h - 0.0100)^{0.821}$	2003 - 2009	0,814	-6,29
55900000	$Q = 7.30(h - 0.17)^{1.23}$	1988 - 1995	0,958	-0,05
	$Q = 6.39(h - 0.18)^{1.37}$	1995 - 2000	0,948	-3,21
	$Q = 6.23(h - 0.22)^{1.49}$	2000 - 2007	0,956	1,08
	$Q = 5.29(h - 0.21)^{1.63}$	2007 - 2018	0,963	5,75
	$Q = 36.5(h - 0.05)^{1.45}$	1969 - 1987	0,953	-0,6784
55920000	$Q = 47.7(h - 0.200)^{1.06}$	1987 - 1998	0,96	0,9858
	$Q = 25.5(h - 0.76)^{1.41}$	1998 - 2014	0,828	1,4440
	$Q = 52.9(h - 1.15)^{1.09}$	2014 - 2023	0,845	-3,8645
	$Q = 47.3(h - 0.22)^{0.948}$	1974 - 1990	0,972	1,2161
55960000	$Q = 57.5(h - 0.13)^{0.741}$	1990 - 1998	0,95	2,2899
	$Q = 35.2(h - 0.6)^{1.22}$	1998 - 2015	0,961	0,9348
	$Q = 16.6(h - 0.32)^{1.09}$	2015 - 2023	0,978	-2,3905
	$Q = 17.8(h - 0.88)^{0.991}$	1978 - 1987	0,957	1,4333
56990990	$Q = 13.7(h - 0.86)^{1.03}$	1987 - 2014	0,933	-1,5817
	$Q = 14(h - 0.71)^{1.62}$	2014 - 2018	0,961	-0,7704
	$Q = 14(h - 0.82)^{1.45}$	2018 - 2023	0,982	0,9155
	$Q = 20.2(h - 1.01)^{1.27}$	2018 - 1919	0,965	-8,85
56991300	$Q = 23(h - 0.93)^{0.854}$	2019 - 2023	0,803	17,53
56991380	$Q = 16.9(h - 1.11)^{0.949}$	2018 - 2020	0,867	66,76
	$Q = 19.6(h - 0.65)^{0.810}$	2020 - 2022	0,728	62,11
	$Q = 25.9(h - 0.07)^{0.729}$	2022 - 2023	0,82	-4,63
56992000	$Q = 28.1(h - 1.02)^{0.610}$	1968 - 1971	0,826	0,4947
	$Q = 29.7(h - 0.86)^{0.486}$	1971 - 1974	0,491	-2,6631
	$Q = 32.4(h - 0.55)^{1.05}$	1974 - 2003	0,902	0,5289
	$Q = 22.5(h - 0.44)^{0.659}$	2003 - 2014	0,737	-0,6370
	$Q = 13.3(h - 0.14)^{1.52}$	2014 - 2023	0,777	-1,4809
56992500	$Q = 5.18(h - 0.46)^{1.05}$	1952 - 1955	0,677	-32,46
	$Q = 5.66(h - 0.36)^{0.984}$	1955 - 1963	0,507	-25,07
	$Q = 4.87(h - 0.47)^{0.940}$	1963 - 1965	0,801	-19,49
56992700	$Q = 1.25(h - 0.27)^{0.214}$	2001 - 2003	0,55	57,68
	$Q = 3.10(h - 1.16)^{1.12}$	2003 - 2007	0,83	42,01
	$Q = 2.24(h - 0.89)^{0.655}$	2007 - 2009	0,494	-1,34
56993000	$Q = 8.95(h - 0.3)^{1.26}$	1965 - 1966	0,99	1,43
	$Q = 5.55(h - 0.29)^{0.883}$	1966 - 1969	0,954	-6,04
	$Q = 6.68(h - 0.36)^{1.06}$	1969 - 1971	0,983	-6,15
	$Q = 11.2(h - 0.43)^{1.08}$	1971 - 1974	0,948	6,49
	$Q = 8.71(h - 0.53)^{0.813}$	1974 - 1975	0,964	3,62
	$Q = 8.41(h - 0.48)^{0.974}$	1975 - 1976	0,987	-1,65
	$Q = 9.94(h - 0.51)^{1.14}$	1976 - 1985	0,953	3,12
	$Q = 7.51(h - 0.5)^{1.24}$	1985 - 2001	0,926	3,51
56993500	$Q = 8.59(h - 0.44)^{1.08}$	2001 - 2009	0,805	-4,02
56993551	-	-	-	-
56993600	$Q = 11.1(h - 0.9)^{1.09}$	1939 - 1941	0,79	18,67
	$Q = 3.64(h - 0.23)^{0.423}$	1941 - 1948	0,708	2,86
	$Q = 12.3(h - 1.34)^{0.872}$	1948 - 1951	0,92	-3,37
	$Q = 9.34(h - 0.15)^{1.05}$	1951 - 1957	0,952	-1,67
	$Q = 9.17(h - 0.04)^{0.846}$	1957 - 1990	0,903	1,50
56994000	$Q = 13(h - 0.09)^{1.09}$	1941 - 1949	0,927	-0,87
	$Q = 10(h - 0.84)^{1.12}$	1949 - 1964	0,967	1,65
	$Q = 6.65(h - 0.27)^{0.927}$	1964 - 1967	0,689	-0,90
56994500	$Q = 8.95(h - 0.38)^{0.761}$	1939 - 1951	0,842	2,98
	$Q = 6.14(h - 0.34)^{0.888}$	1951 - 1959	0,661	0,25
	$Q = 854(h - 0.295)^{0.677}$	1959 - 1975	0,914	1,00
	$Q = 7.60(h - 0.82)^{0.745}$	1975 - 2001	0,872	0,43
	$Q = 5.62(h - 0.25)^{0.658}$	2001 - 2014	0,691	-0,22
	$Q = 5.05(h - 0.66)^{1.07}$	2014 - 2023	0,952	1,29
	$Q = 1201(h - 1.45)^{0.590}$	1977 - 1979	0,873	34,66
56994502	$Q = 1377(h - 1.51)^{0.492}$	1979 - 1983	0,857	2,35
56995000	$Q = 9.61(h - 0.2)^{0.884}$	1944 - 1963	0,953	4,28
	$Q = 6.32(h - 0.0100)^{1.16}$	1963 - 1964	0,981	-0,98
	$Q = 8.79(h - 0.25)^{0.862}$	1964 - 1965	0,905	-2,34
	$Q = 11.6(h - 0.175)^{1.01}$	1965 - 1966	0,976	-6,02
56998000	$Q = 1100(h + 0.06)^{0.748}$	1967 - 1988	0,913	2,98
	$Q = 574(h - 0.0100)^{0.888}$	1988 - 1993	0,214	15,00
	$Q = 855(h - 0.42)^{0.605}$	2015 - 2023	0,87	-0,61
56998200	$Q = 503(h - 0.12)^{0.493}$	2023	0,915	16,48
56998400	$Q = 12.9(h - 0.625)^{1.22}$	1967 - 1973	0,976	1,1642
	$Q = 11(h - 0.5)^{1.52}$	1973 - 1976	0,994	-1,0838
	$Q = 22(h - 0.94)^{0.901}$	1976 - 1982	0,97	0,5298
	$Q = 15.1(h - 0.53)^{1.27}$	1982 - 2003	0,954	-0,1202
	$Q = 12(h - 0.5)^{1.29}$	2003 - 2014	0,973	0,2499
	$Q = 11.3(h - 0.41)^{1.08}$	2014 - 2023	0,987	-0,3527
	$Q = 4.24(h - 0.92)^{0.890}$	1961 - 1962	0,993	-3,51
57040005	$Q = 4.65(h - 0.89)^{1.12}$	1962 - 1964	0,994	-5,84
	$Q = 3.7(h - 0.9)^{0.915}$	1964 - 1971	0,954	-7,18
	$Q = 6.66(h - 1.17)^{0.766}$	1971 - 1971	0,973	-11,32
	$Q = 5.25(h - 1.07)^{0.810}$	1971 - 1973	0,965	3,04
	$Q = 5.85(h - 0.96)^{1.00}$	1973 - 1974	0,983	-4,91
	-	-	-	-
	-	-	-	-

Código	Curva-Chave	Ano	$R^2$	Desvio (%)
57040010	$Q = 7.84(h - 1.02)^{1.28}$	1974 - 1976	0,97	-4,92
	$Q = 10.8(h - 0.97)^{1.42}$	1976 - 1976	0,995	1,30
	$Q = 6.50(h - 1.02)^{1.02}$	1976 - 1982	0,919	4,94
	$Q = 27.1(h - 0.59)^{0.229}$	2003 - 2004	0,117	-0,26
57118080	$Q = 48.8(h - 0.6)^{0.503}$	2004 - 2005	0,914	5,68
	$Q = 5.72(h - 0.22)^{1.28}$	2005 - 2016	0,952	0,76
	$Q = 3.76(h - 0.47)^{0.0956}$	2016 - 2018	0,0109	26,67
	-	-	-	-
57119500	-	-	-	-
57120080	$Q = 18.5(h - 0.21)^{0.895}$	2002 - 2009	0,966	-2,87
	$Q = 12.8(h - 0.26)^{0.985}$	2009 - 2017	0,901	9,95
	$Q = 18.1(h - 0.5)^{0.227}$	2017 - 2019	0,118	56,18
57130000	$Q = 22.2(h - 0.25)^{0.846}$	1949 - 1961	0,956	0,3906
	$Q = 22(h - 0.37)^{1.11}$	1961 - 1986	0,971	-0,1341
	$Q = 18.1(h - 0.44)^{0.996}$	1986 - 2011	0,916	-0,1813
57170000	$Q = 13.1(h - 0.39)^{1.02}$	2011 - 2023	0,75	-0,3902
	$Q = 35.61(h - 0.86)^{0.803}$	1969 - 1975	0,928	1,44
	$Q = 27.2(h - 0.29)^{0.778}$	1975 - 1982	0,962	-0,97
57200000	$Q = 24.6(h - 0.07)^{1.21}$	1982 - 2023	0,981	0,09
	$Q = 16.8(h - 0.17)^{0.67}$	2002 - 2003	0,896	-1,35
	$Q = 26.6(h - 0.17)^{1.01}$	2003 - 2014	0,962	0,70
	$Q = 16.8(h - 0.06)^{0.944}$	2014 - 2020	0,929	-0,53
	$Q = 21.5(h - 0.06)^{1.12}$	2022 - 2018	0,749	4,36
57230000	$Q = 2.47(h - 0.13)^{0.947}$	2018 - 2020	0,304	-7,15
	$Q = 29(h - 0.04)^{0.622}$	1969 - 1972	0,53	3,16
	$Q = 42.6(h - 0.53)^{0.812}$	1972 - 1978	0,972	0,52
	$Q = 33.7(h - 0.12)^{0.666}$	1978 - 1985	0,843	1,43
	$Q = 30(h + 0.08)^{0.667}$	1985 - 1995	0,857	3,34
57250000	$Q = 22.3(h - 0.51)^{1.01}$	1995 - 2023	0,97	0,40
	$Q = 12.9(h - 0.86)^{1.24}$	1950 - 1974	0,97	0,98
	$Q = 12.5(h - 0.48)^{0.778}$	1974 - 1986	0,939	0,93
	$Q = 10.2(h - 0.53)^{0.667}$	1986 - 1995	0,92	-0,50
	$Q = 9.53(h - 0.55)^{0.57}$	1995 - 2003	0,915	-0,63
57255000	$Q = 12.1(h - 0.52)^{0.829}$	2003 - 2014	0,95	0,20
	$Q = 11.3(h - 0.36)^{1.45}$	2014 - 2023	0,934	0,08
	$Q = 16.9(h - 8.47)^{0.776}$	2007 - 2008	0,914	-0,99
	$Q = 12.9(h - 8.46)^{0.292}$	2008 - 2011	0,606	14,76
	$Q = 9.20(h - 8.45)^{0.462}$	2011 - 2014	0,784	3,20
57256000	$Q = 18.3(h - 8.32)^{1.26}$	2014 - 2018	0,981	0,49
	$Q = 29.6(h - 8.5)^{1.05}$	2018 - 2020	0,942	-4,89
	$Q = 19.8(h - 8.49)^{0.636}$	2020 - 2022	0,794	1,70
	$Q = 1.25(h - 6.98)^{0.835}$	2007 - 2008	0,0211	-17,45
	$Q = 5.93(h - 6.98)^{0.718}$	2008 - 2012	0,528	0,08
57257000	$Q = 9.28(h - 6.91)^{1.01}$	2012 - 2016	0,884	-9,28
	$Q = 4.21(h - 6.97)^{1.23}$	2016 - 2022	0,692	11,38
	$Q = 13.7(h - 5.37)^{0.832}$	2007 - 2008	0,846	-0,32
	$Q = 11.3(h - 4.95)^{1.49}$	2008 - 2018	0,866	13,69
	$Q = 84.3(h - 5.35)^{1.12}$	2018 - 2022	0,832	9,93
57300000	$Q = 14.5(h - 0.33)^{0.618}$	1971 - 1973	0,674	-4,68
	$Q = 16.7(h - 0.36)^{0.89}$	1973 - 1984	0,956	0,28
	$Q = 14.8(h - 0.27)^{0.791}$	1984 - 1989	0,928	0,52
	$Q = 16.9(h - 0.13)^{0.985}$	1989 - 1998	0,938	-0,37
	$Q = 5.24(h + 0.05)^{0.499}$	1998 - 2005	0,199	-1,75



Código	Curva-Chave	Ano	R <sup>2</sup>	Desvio (%)
57450000	$Q = 68.5(h - 0.56)^{0.951}$	1935 - 1939	0,969	1,00
	$Q = 68.2(h - 0.55)^{1.06}$	1939 - 1967	0,969	0,32
	$Q = 68.4(h - 0.68)^{0.959}$	1967 - 1987	0,968	0,84
	$Q = 61.3(h - 0.7)^{0.892}$	1987 - 2008	0,948	0,81
	$Q = 31.7(h - 0.31)^{1.40}$	2008 - 2023	0,902	1,47
57474000	$Q = 7.38(h - 0.13)^{1.462}$	2002 - 2019	0,862	10,72
	$Q = 59.8(h - 0.38)^{0.911}$	2019 - 2023	0,406	-45,30
57476500	$Q = 22(h - 0.7)^{1.13}$	1984 - 2003	0,946	-1,79
	$Q = 18.8(h - 0.53)^{1.67}$	2003 - 2018	0,95	-1,22
	$Q = 22.4(h - 0.65)^{0.957}$	2018 - 2023	0,957	-5,14
	$Q = 16.8(h - 0.32)^{0.906}$	2002 - 2006	0,94	5,92
57480000	$Q = 15.6(h - 0.6)^{0.812}$	2006 - 2009	0,944	6,19
	$Q = 13.4(h - 0.58)^{0.888}$	2009 - 2015	0,948	-9,90
	$Q = 11.5(h - 0.31)^{1.22}$	2015 - 2023	0,991	1,82
	$Q = 28.1(h - 0.59)^{1.08}$	1937 - 1962	0,96	0,20
57490000	$Q = 30.9(h - 0.65)^{1.23}$	1962 - 1988	0,98	0,55
	$Q = 24.8(h - 0.49)^{1.85}$	1988 - 2023	0,959	-0,02
	$Q = 37.8(h - 0.62)^{1.09}$	1969 - 2015	0,957	0,48
57550000	$Q = 32.6(h - 0.47)^{1.43}$	2015 - 2023	0,927	-2,61
	$Q = 7.56(h - 0.45)^{0.875}$	2003 - 2006	0,903	-2,58
57552000	$Q = 36.2(h - 0.5)^{1.20}$	2006 - 2007	0,457	11,75
	$Q = 5.58(h - 0.29)^{0.960}$	2007 - 2018	0,829	2,71
	$Q = 6.21(h - 0.51)^{-0.181}$	2018 - 2020	0,0165	-8,02
	$Q = 79.9(h - 0.28)^{0.879}$	1971 - 2008	0,936	1,10
57580000	$Q = 65.1(h - 0.0100)^{0.938}$	2008 - 2015	0,94	0,05
	$Q = 45.3(h - 0.49)^{0.904}$	2015 - 2023	0,491	-7,19

Código	Curva-Chave	Ano	R <sup>2</sup>	Desvio (%)
57650000	$Q = 9.64(h - 0.47)^{0.990}$	1984 - 1989	0,889	-2,15
	$Q = 11.1(h - 0.33)^{0.989}$	1989 - 1996	0,892	-4,19
	$Q = 10.9(h - 0.17)^{1.17}$	1996 - 2001	0,918	-2,15
	$Q = 6.67(h - 0.0200)^{0.686}$	2001 - 2005	0,576	-5,39
	$Q = 6.63(h - 0.5)^{1.20}$	2005 - 2015	0,946	-0,52
	$Q = 5.27(h - 0.49)^{1.41}$	2015 - 2023	0,879	7,82
57740000	$Q = 13.7(h - 0.81)^{0.822}$	1937 - 1957	0,961	1,27
	$Q = 13.9(h - 0.58)^{0.915}$	1957 - 1975	0,951	1,00
	$Q = 16(h - 0.83)^{0.774}$	1975 - 1981	0,916	1,60
	$Q = 18.5(h - 0.87)^{0.894}$	1981 - 2013	0,922	-0,69
	$Q = 16.2(h - 0.75)^{1.13}$	2013 - 2023	0,974	-0,88
	-	-	-	-
57750000	-	-	-	-
57770000	$Q = 6.55(h - 0.28)^{1.43}$	1952 - 2007	0,931	-0,52
	$Q = 2.85(h - 0.38)^{0.176}$	2007 - 2014	0,00715	0,39
	$Q = 5.23(h - 0.24)^{2.02}$	2014 - 2023	0,887	0,63
57880000	$Q = 13.7(h - 0.31)^{0.983}$	1969 - 2009	0,924	0,06
	$Q = 15.6(h - 0.17)^{0.279}$	2009 - 2014	0,0237	27,63
	$Q = 6.23(h - 0.05)^{0.969}$	2014 - 2023	0,891	-0,92
57930000	$Q = 61.2(h - 0.29)^{0.99}$	1969 - 1986	0,918	2,28
	$Q = 56.1(h - 0.17)^{0.686}$	1986 - 2009	0,932	1,67
	$Q = 60.1(h - 0.04)^{0.841}$	2009 - 2015	0,963	-0,46
	$Q = 43.7(h - 0.77)^{1.26}$	2015 - 2023	0,96	1,67

Fonte: Autores (2025).

## 4. CONCLUSÕES

Esse estudo apresentou os ajustes das curvas-chave para as estações fluviométricas localizadas no ES que tinham dados de vazões disponíveis, destacando como ferramenta de integração para automatização dos processos o software R. Os resultados obtidos revelam que os cálculos apresentaram desempenho satisfatório, com correlações superiores a 70% na maioria dos casos, indicando uma certa uniformidade nas características hidrológicas das seções analisadas. Além disso, os desvios evidenciados de superestimação e subestimação mostraram-se baixos, reforçando a confiabilidade dos métodos aplicados e das curvas-chave ajustadas.

**AGRADECIMENTOS** – Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal Nível Superior – CAPES, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG – pelo apoio no desenvolvimento do trabalho.

## REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. (2015). *Manual de descarga líquida em grandes rios: manual técnico*. ANA, Brasília – DF, 91 p.
- AGERH – Agência Estadual de Recursos Hídricos. Resolução AGERH nº 02, de 15 de julho de 2024: Declara estado de atenção frente à ameaça de escassez hídrica no Espírito Santo. Vitória: AGERH, 2024.
- COHEN, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences*. New York: Psychology Press, 567 p.
- COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. (2015). *Hidrologia para Engenharia e Ciências Ambientais*. Volume 1. 2. ed. UFRGS, Porto Alegre – RS, pp. 173 – 190.
- EEKHOUT, J. P.C.; DELSMAN, I.; BAARTMAN, J. E.M. et al. (2024) *How future changes in irrigation water supply and demand affect water security in a Mediterranean catchment*. *Agricultural Water Management* 297, pp. 108818.
- IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Panorama Censo 2022.
- JACCON, G.; CUDO, K. J. (1989). *Curva chave: análise de traçado*. DNAEE, Brasília – DF, 237 p.

- LOPES, C., DOURADO, F. e DE SOUZA, L. S. (2023). *Mapeamento do perigo de inundação em bacia urbana com poucos dados hidrológicos*. Caminhos de Geografia, Uberlândia – MG, 24 (92), pp. 226-246.
- R CORE TEAM (2024). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL: <https://www.R-project.org/>.
- SOUZA, K. I. S.; CHAFFE, P. L. B.; PINTO, C. R. S. C. (2019). *Um software para a análise de seções transversais e de leitos fluviais regulares de rios do Brasil* in Anais do XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Foz do Iguaçu, nov. 2019.
- TAMWING, D. S.; MONTEFUSCO, C. de L. A.; IRURETA, O. O. A.; MESQUITA, A. A.; SERRANO, R. O. P.; e MOREIRA, J. G. do V. (2022). *Relação cota-vazão e ajuste da curva-chave: estudo de caso na bacia hidrográfica do Rio Acre, Brasil*. Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais, 13(1), 129–140.
- VIEIRA, L.; MARCOS S.; SAMPAIO, J. C. L.; COSTA, V. A. F.; ELEUTÉRIO, J. C. (2022). *Assessing the effects of rating curve uncertainty in flood frequency analysis*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos.
- WARA, C.; THOMAS, M.; MWAKURYA, S.; e KATUVA, J. (2019). *Development of River Rating Curves for Simple to Complex Hydraulic Structure Based on Calibrated HEC-RAS Hydraulic Model, in Kwale, Coastal Kenya*. Journal of Water Resource and Protection, 11(04), 468.