AVALIAÇÃO MULTICRITÉRIO DE CURVAS-CHAVE: ESTUDO DE CASO DA ESTAÇÃO URUGUAIANA (77150000) NO RIO URUGUAI

Walszon Terllizzie A. Lopes [1]; Gabriel Meldau Lemos[1]; Elton Vinícius Krauss[1]; Gabriel Reis de Vasconcelos[1] & Taiara Sampaio Santos[1].

RESUMO – A avaliação de curvas-chave é etapa essencial da consistência de dados fluviométricos, pois as séries de vazão são geralmente obtidas pela transformação de níveis d'água observados em vazões. Este trabalho apresenta uma abordagem multicritério para avaliação de curvas-chave no âmbito do Sistema para Análise de Dados Hidrológicos - SiADH, utilizando como estudo de caso a estação fluviométrica 77150000 (Uruguaiana), localizada no rio Uruguai. Foram analisados produtos associados ao resultado 450 (Curva-Chave), incluindo gráficos em escala aritmética e bilogarítmica, desvios percentuais em relação à cota e ao tempo, boxplots por período de validade e por ano, histograma, *heatmap* por ano e faixa hidráulica e autocorrelação dos resíduos. Os resultados indicaram boa aderência entre curvas-chave e medições de descarga líquida, desvio médio absoluto reduzido, distribuição equilibrada entre desvios positivos e negativos, medianas próximas de zero e baixa persistência temporal dos resíduos. Conclui-se que a abordagem proposta amplia a objetividade, a rastreabilidade e a reprodutibilidade da avaliação de curvas-chave, sem substituir o julgamento técnico especializado.

ABSTRACT – Rating curve evaluation is an essential step in streamflow data quality control, since discharge time series are generally obtained by converting observed water levels into streamflow values. This paper presents a multicriteria approach for rating curve evaluation within the Hydrological Data Analysis System - SiADH, using streamgage 77150000 (Uruguaiana), located on the Uruguay River, as a case study. Products associated with SiADH result 450 (Rating Curve) were analyzed, including arithmetic and bilogarithmic rating curve plots, percentage deviations in relation to stage and time, boxplots by validity period and by year, histogram, heatmap by year and hydraulic range, and residual autocorrelation. The results indicated good agreement between rating curves and discharge measurements, low mean absolute deviation, balanced distribution of positive and negative deviations, medians close to zero, and low temporal persistence of residuals. It is concluded that the proposed approach improves the objectivity, traceability and reproducibility of rating curve evaluation, without replacing specialized technical judgment.

Palavras-Chave – Curvas-chave; Consistência de dados fluviométricos; SiADH.

[1]) Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico – ANA. Setor Policial, Área 5, Quadra 3, Bloco L. Fone: (61) 2109 5476. E-mail: walszon@ana.gov.br; gabriel.lemos@ana.gov.br; elton.krauss@ana.gov.br; gabriel.vasconcelos@ana.gov.br; taiara.santos@ana.gov.br

1 INTRODUÇÃO

As séries históricas de vazão constituem insumo fundamental para o planejamento e gestão de recursos hídricos. Estudos de disponibilidade hídrica, regionalização de vazões, definição de vazões de referência, análise de cheias e estiagens, operação de reservatórios, outorga de direito de uso, previsão hidrológica e avaliação de eventos extremos dependem diretamente da confiabilidade dos dados fluviométricos utilizados.

Nas estações fluviométricas, as vazões são, em geral, obtidas indiretamente a partir da transformação dos níveis d'água observados (cotas) em vazões, por meio de relações cota-descarga denominadas curvas-chave (Rantz, 1982; Jaccon e Cudo, 1989). Essas relações são ajustadas com base em medições de descarga líquida realizadas em campo e buscam representar o comportamento hidráulico da seção de controle ou do trecho de rio associado à estação. Dessa forma, a qualidade da curva-chave adotada influencia diretamente as vazões calculadas e os indicadores hidrológicos derivados das séries históricas (Lopes et al., 2013).

A avaliação de curvas-chave exige a análise integrada de diferentes aspectos gráficos, estatísticos, temporais e hidráulicos. Indicadores globais, como o desvio médio absoluto, são importantes, mas podem ser insuficientes quando analisados isoladamente, pois podem ocultar padrões relevantes, como desvios concentrados em determinada faixa de cota ou vazão, tendência temporal dos resíduos, assimetria na distribuição dos erros ou diferenças entre períodos sucessivos de validade da curva (Lopes et al., 2017).

Nesse contexto, gráficos de curva-chave em escala aritmética e bilogarítmica, gráficos de desvios versus cota, tempo e vazão medida, histogramas, boxplots, *heatmaps* e funções de autocorrelação dos resíduos podem oferecer uma visão mais abrangente sobre a qualidade do ajuste. A análise conjunta desses produtos permite avaliar não apenas a aderência geral da curva às medições, mas também a estabilidade temporal dos resíduos, o comportamento por faixa hidráulica e a consistência entre os períodos de validade definidos.

O Sistema para Análise de Dados Hidrológicos - SiADH, desenvolvido pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico - ANA, foi concebido para apoiar, sistematizar e padronizar análises de consistência de dados fluviométricos. Entre seus produtos, destaca-se o resultado 450 - Curva-Chave, que reúne gráficos e indicadores voltados à avaliação das relações cota-descarga, incluindo análises visuais tradicionais e produtos complementares baseados nos desvios das medições de descarga líquida em relação às curvas ajustadas (Lopes et al., 2013).

O presente trabalho tem como objetivo apresentar uma abordagem multicritério para avaliação de curvas-chave no âmbito do SiADH, utilizando como estudo de caso a estação fluviométrica 77150000 - Uruguaiana, localizada no rio Uruguai. A proposta busca demonstrar como diferentes produtos gráficos e estatísticos podem ser utilizados de forma integrada para avaliar a aderência da curva às medições, a distribuição dos desvios, a estabilidade temporal dos resíduos, o comportamento por faixa hidráulica e a consistência dos períodos de validade.

A abordagem proposta não substitui a análise técnica especializada realizada por hidrólogos e analistas de consistência de dados fluviométricos. Seu propósito é organizar evidências, ampliar a rastreabilidade da avaliação e tornar o processo de análise de curvas-chave mais objetivo e reprodutível, contribuindo para o aprimoramento da consistência das séries temporais de vazão e da confiabilidade dos dados hidrológicos utilizados na gestão dos recursos hídricos.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia consistiu na aplicação integrada de critérios gráficos, estatísticos, temporais e hidráulicos para avaliação de curvas-chave, utilizando como estudo de caso a estação fluviométrica 77150000 - Uruguaiana, localizada no rio Uruguai, com área de drenagem de aproximadamente 190.000 km². A estação foi selecionada por apresentar medições de descarga líquida em ampla faixa de vazões, múltiplos períodos de validade de curvas-chave e produtos gráficos suficientes para demonstrar a abordagem proposta.

Foram utilizados dados e produtos gerados pelo SiADH, especialmente aqueles associados ao resultado 450 - Curva-Chave. A análise considerou curvas-chave de nível de consistência 2 (registro consistido), seus respectivos períodos de validade e as medições de descarga líquida associadas a cada período. As relações cota-descarga foram representadas por equações potenciais do tipo $Q = a(h - h_0)^n$, em que Q é a vazão calculada, h é a cota observada, h_0 é a cota correspondente à vazão nula e a e n são parâmetros ajustados a partir das medições de descarga líquida. A aderência das curvas às medições foi avaliada por meio do desvio percentual $D_i = \left(Q_{calc,i} - Q_{med,i}\right)/Q_{med,i}$, utilizado como resíduo da análise e como base para os gráficos e indicadores empregados neste estudo. Esses desvios foram utilizados como resíduos da análise e serviram de base para os indicadores gráficos e estatísticos empregados no estudo. A interpretação foi realizada de forma multicritério, evitando conclusões baseadas em um único indicador.

Inicialmente, foram avaliados os gráficos de curva-chave em escala aritmética e bilogarítmica. A escala aritmética foi utilizada para verificar a aderência geral das curvas aos pares cota-vazão, especialmente em médias e altas vazões. A escala bilogarítmica foi utilizada como complemento, por

facilitar a identificação de diferenças relativas, mudanças de inclinação e eventuais problemas em águas baixas ou em trechos de transição entre períodos de validade.

Em seguida, foram analisados os gráficos de desvios percentuais versus cota, tempo e vazão medida. O gráfico de desvios versus cota permitiu verificar se os resíduos se distribuíam de forma equilibrada ao longo da faixa de níveis observados. O gráfico de desvios versus tempo foi utilizado para avaliar a estabilidade temporal da relação cota-descarga. O gráfico de desvios versus vazão medida e o agrupamento das medições em faixas hidráulicas de baixa, média e alta vazão permitiram avaliar se o desempenho da curva variava com a magnitude das vazões.

A distribuição estatística dos resíduos foi analisada por meio de histograma e boxplots. O histograma foi utilizado para avaliar centralidade, dispersão e assimetria dos desvios. Os boxplots por período de validade permitiram comparar o comportamento dos resíduos entre curvas sucessivas, enquanto os boxplots anuais permitiram identificar variações interanuais, anos com maior dispersão e possíveis valores discrepantes.

Para avaliar simultaneamente o comportamento temporal e hidráulico dos resíduos, foi utilizado *heatmap* dos desvios médios por ano e faixa hidráulica. Esse produto permitiu identificar eventuais concentrações de desvios positivos ou negativos em determinados anos e faixas de vazão, considerando também a quantidade de medições disponível em cada combinação ano-faixa.

A estabilidade temporal dos resíduos foi complementada por análises de autocorrelação e autocorrelação parcial. A função de autocorrelação foi utilizada para verificar se os desvios apresentavam comportamento aproximadamente aleatório ou persistência temporal entre medições sucessivas. A autocorrelação parcial foi utilizada como complemento, permitindo identificar dependência direta em defasagens específicas. Também foi avaliada a autocorrelação por período de validade, de modo a verificar se eventual dependência temporal estaria associada a toda a série ou a intervalos específicos.

Os resultados foram interpretados de forma integrada, considerando a convergência entre aderência visual das curvas às medições, magnitude e distribuição dos desvios, comportamento dos resíduos por cota, tempo e vazão, desempenho por faixa hidráulica e presença ou ausência de autocorrelação relevante. A metodologia foi tratada como instrumento de apoio à análise técnica, não como substituta do julgamento especializado, que deve considerar informações de campo, histórico da estação, características da seção de controle, qualidade das medições de descarga líquida, eventuais alterações nas réguas, eventos extremos e possíveis efeitos hidráulicos locais.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A aplicação da abordagem multicritério à estação fluviométrica 77150000 - Uruguaiana, no rio Uruguai, demonstrou a utilidade dos produtos do resultado 450 do SiADH para avaliação integrada de curvas-chave. A estação apresenta área de drenagem de aproximadamente 190.000 km² e dispõe de medições de descarga líquida associadas a diferentes períodos de validade de curvas-chave de nível de consistência 2. No conjunto analisado, o desvio médio absoluto foi da ordem de 4%, com distribuição equilibrada entre desvios positivos e negativos: 78 medições com desvios positivos, correspondentes a aproximadamente 54% do total, e 66 medições com desvios negativos, correspondentes a aproximadamente 46%. Esses resultados indicam ausência de viés global relevante na estimativa das vazões calculadas.

A Figura 1 apresenta a curva-chave em escala aritmética e bilogarítmica, além dos gráficos de desvio percentual versus cota e desvio percentual versus tempo. Em ambas as escalas, observa-se boa aderência das curvas aos pontos de medição, com continuidade entre os períodos de validade e compatibilidade com a nuvem de dados. Os desvios em relação à cota permanecem, em sua maior parte, próximos à faixa de ±10%, sem tendência sistemática associada a uma faixa específica de nível. No gráfico de desvios versus tempo, os resíduos apresentam oscilações moderadas, com alternância entre valores positivos e negativos, comportamento compatível com estabilidade geral da relação cota-descarga.

A distribuição dos desvios por período de validade, apresentada na Figura 2, reforça essa interpretação. Os boxplots indicam medianas próximas de zero ou levemente positivas e dispersão moderada nos diferentes períodos. O intervalo de 27/12/2006 a 14/07/2020, que possui maior número de medições, apresenta concentração expressiva dos desvios dentro da faixa de ±10%. O período mais recente, de 15/07/2020 a 31/12/2023, possui menor quantidade de medições, mas também mantém desvios predominantemente dentro de limites aceitáveis.

A Figura 3 apresenta a distribuição anual dos desvios percentuais. A maior parte dos anos com pelo menos três medições apresenta medianas próximas da linha de desvio nulo, sem persistência de desvios positivos ou negativos ao longo de vários anos consecutivos. Alguns anos exibem maior dispersão e valores pontuais superiores a 10% ou inferiores a -10%, mas esses casos parecem ocorrer de forma localizada, possivelmente associados a medições específicas, condições hidráulicas particulares ou maior variabilidade natural da seção durante determinados eventos.

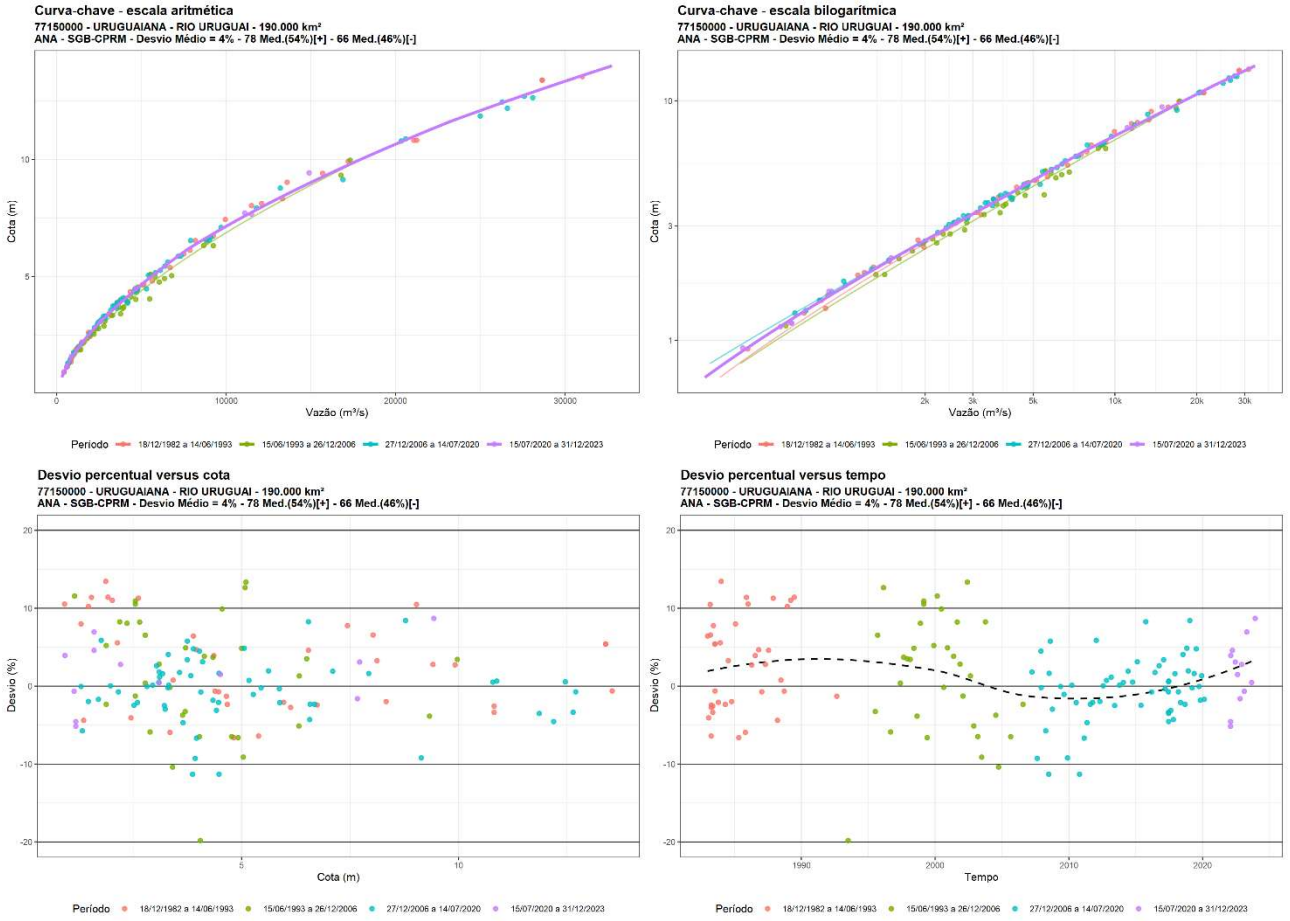


Figura 1. Curvas-chave, em escala aritmética e bilogarítmica, e desvios percentuais em relação à cota e ao tempo para a estação 77150000 - Uruguaiana.

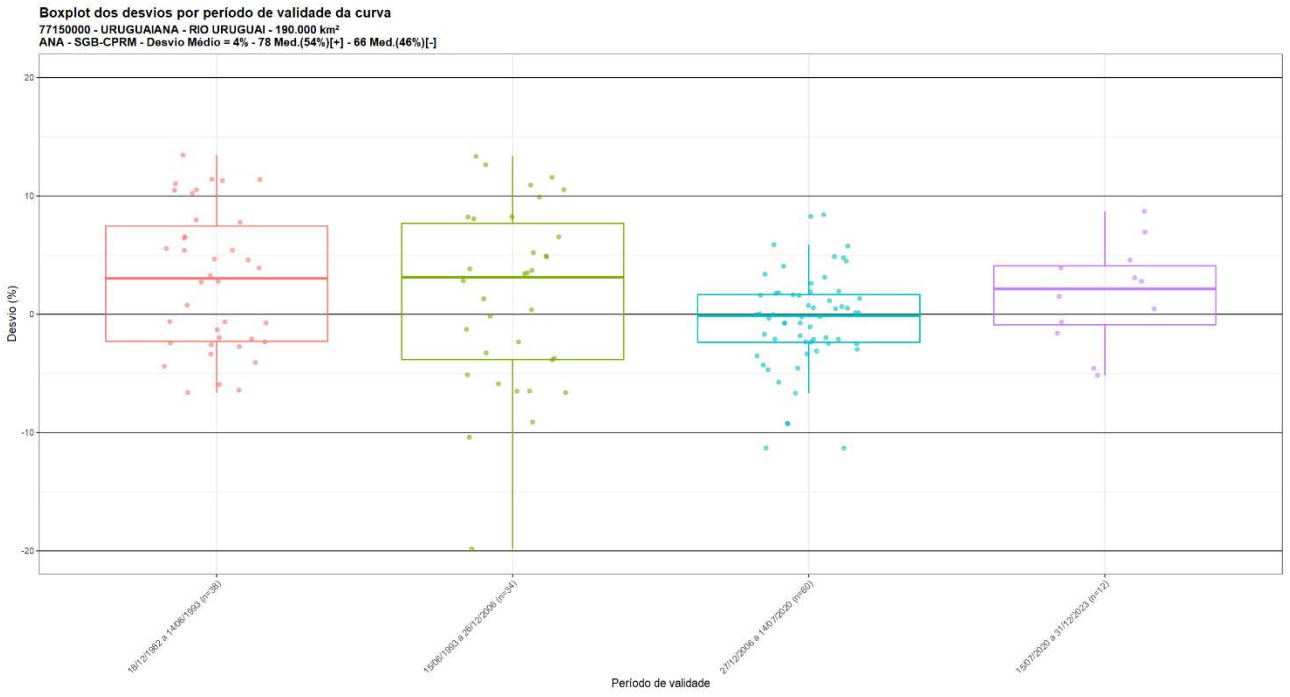


Figura 2. Distribuição dos desvios percentuais das medições de descarga líquida por período de validade das curvas-chave da estação 77150000 - Uruguaiana.

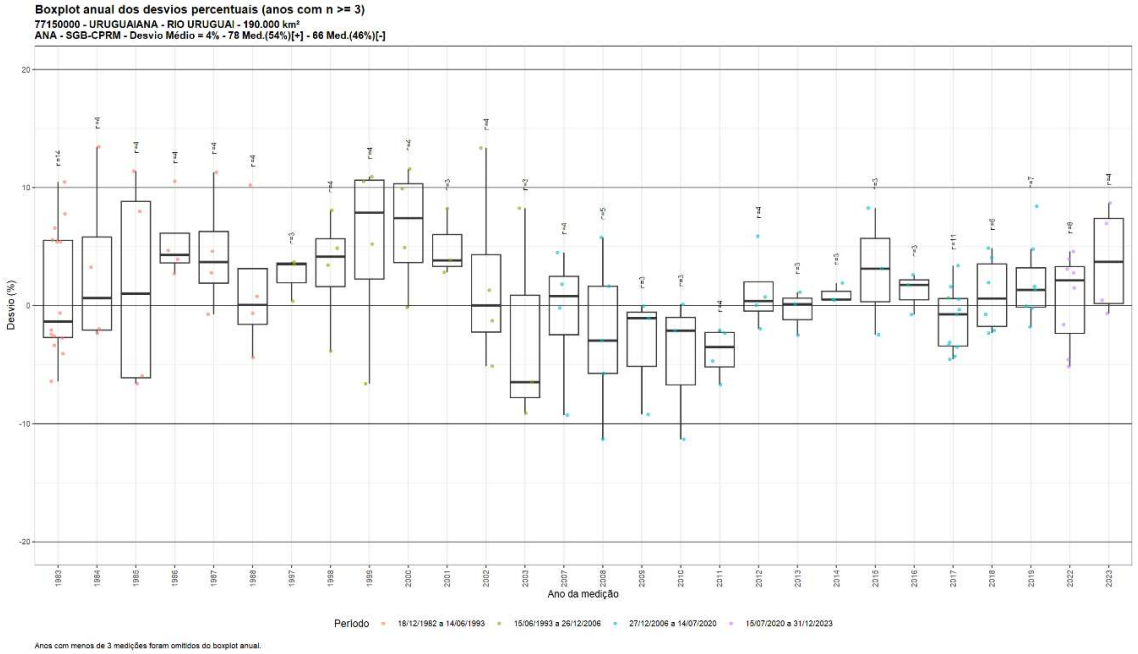


Figura 3. Distribuição anual dos desvios percentuais das medições de descarga líquida em relação às curvas-chave da estação 77150000 - Uruguaiana.

O histograma dos desvios percentuais, apresentado na Figura 4, indica distribuição aproximadamente centrada em torno de zero. A média dos desvios foi próxima de 1%, a mediana de aproximadamente 0,5%, o desvio-padrão da ordem de 5,7% e a assimetria de aproximadamente -0,12. Esses valores confirmam que os resíduos apresentam distribuição praticamente simétrica, sem evidência de superestimativa ou subestimativa sistemática das vazões calculadas.

A análise por faixa hidráulica de vazão, apresentada na Figura 5, mostra que os desvios mantêm comportamento satisfatório em baixas, médias e altas vazões. Nas baixas vazões, observa-se mediana levemente positiva e maior dispersão; nas vazões médias, a mediana fica próxima de zero, embora ocorram alguns valores discrepantes negativos; nas altas vazões, os desvios também permanecem próximos de zero, sem viés sistemático relevante. Esse resultado é importante porque indica que o bom desempenho da curva-chave não se limita ao ajuste global, mas também se mantém nas principais faixas de magnitude de vazão.

O *heatmap* dos desvios médios por ano e faixa hidráulica, apresentado na Figura 6, permite avaliar simultaneamente a distribuição temporal e hidráulica dos resíduos. Observa-se alternância entre desvios médios positivos e negativos ao longo dos anos e das faixas de vazão, sem predomínio contínuo de uma mesma tendência. Em alguns anos e faixas hidráulicas, os desvios médios são mais elevados, especialmente quando há baixa quantidade de medições. Esse resultado evidencia a importância de interpretar desvios médios anuais sempre em conjunto com o número de medições disponível em cada classe.

A análise de autocorrelação dos resíduos, apresentada na Figura 7, indicou baixa persistência temporal dos desvios. A autocorrelação de primeira defasagem foi de aproximadamente 0,19, classificada como compatível com comportamento aleatório. Embora algumas defasagens isoladas ultrapassem os limites aproximados de significância, o conjunto do gráfico não sugere estrutura persistente de autocorrelação capaz de comprometer a avaliação geral da curva-chave. Assim, os resíduos não apresentam dependência temporal forte entre medições sucessivas.

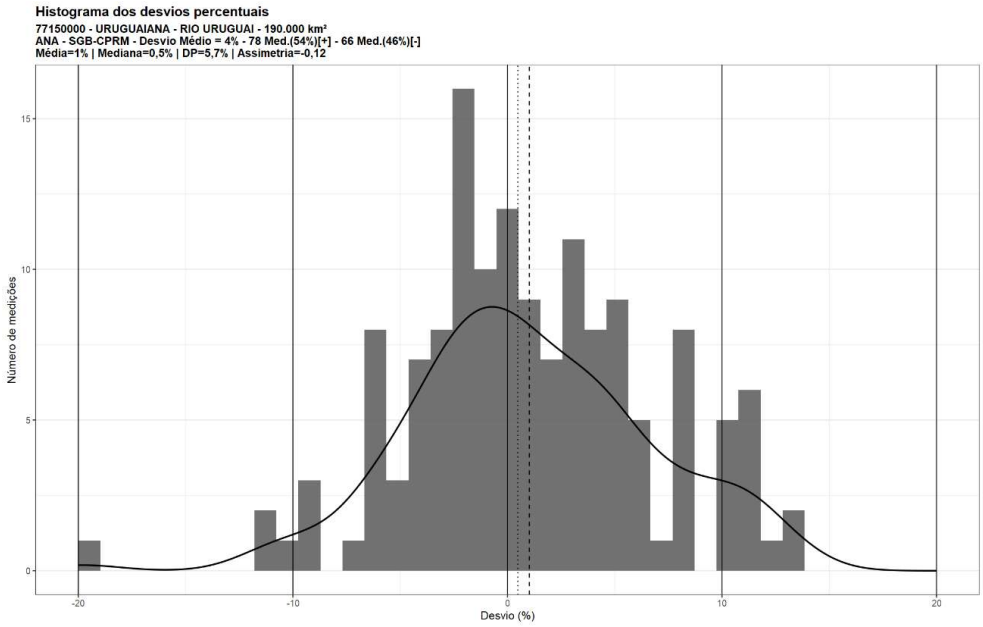


Figura 4. Histograma dos desvios percentuais das medições em relação às curvas-chave da estação 77150000 - Uruguaiana.

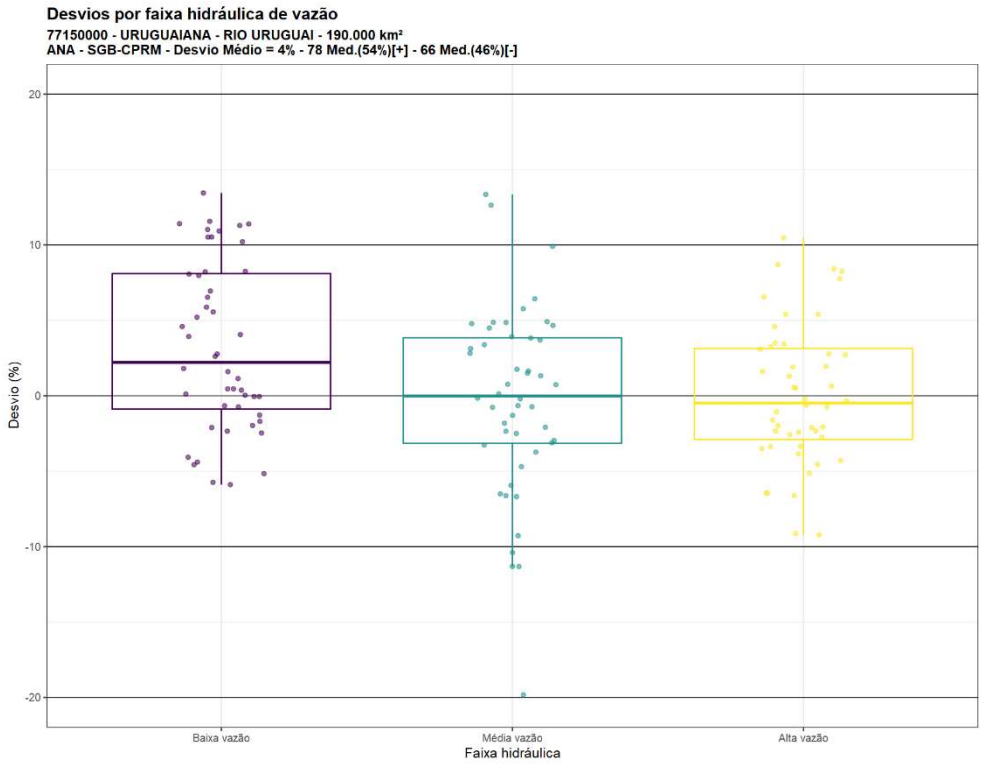


Figura 5. Distribuição dos desvios percentuais por faixa hidráulica de vazão na estação 77150000 - Uruguaiana.

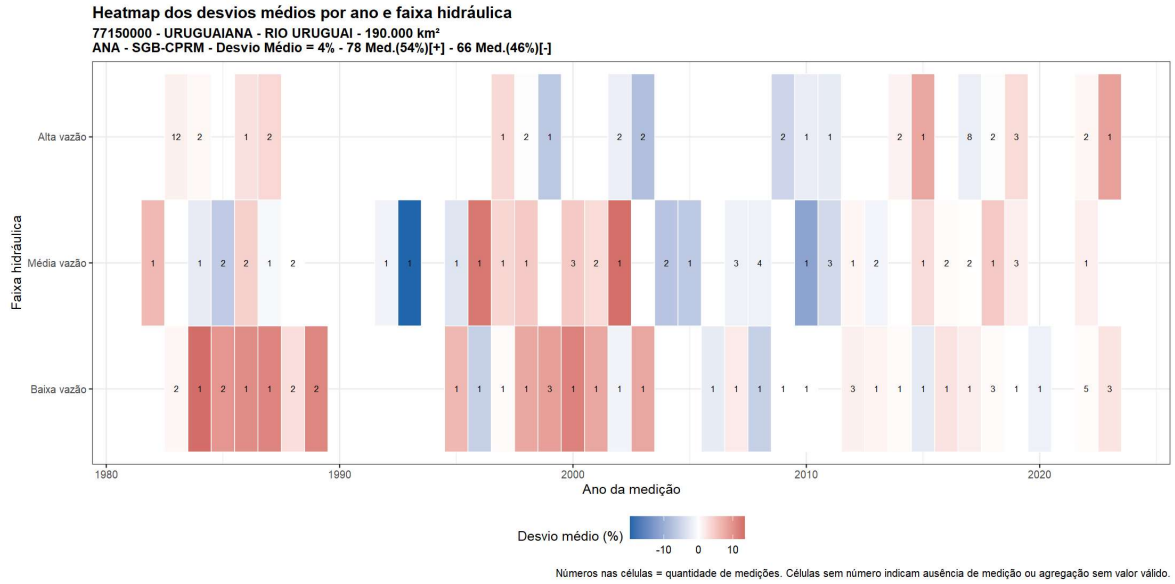


Figura 6. Heatmap dos desvios médios percentuais por ano e faixa hidráulica de vazão na estação 77150000 - Uruguaiana.

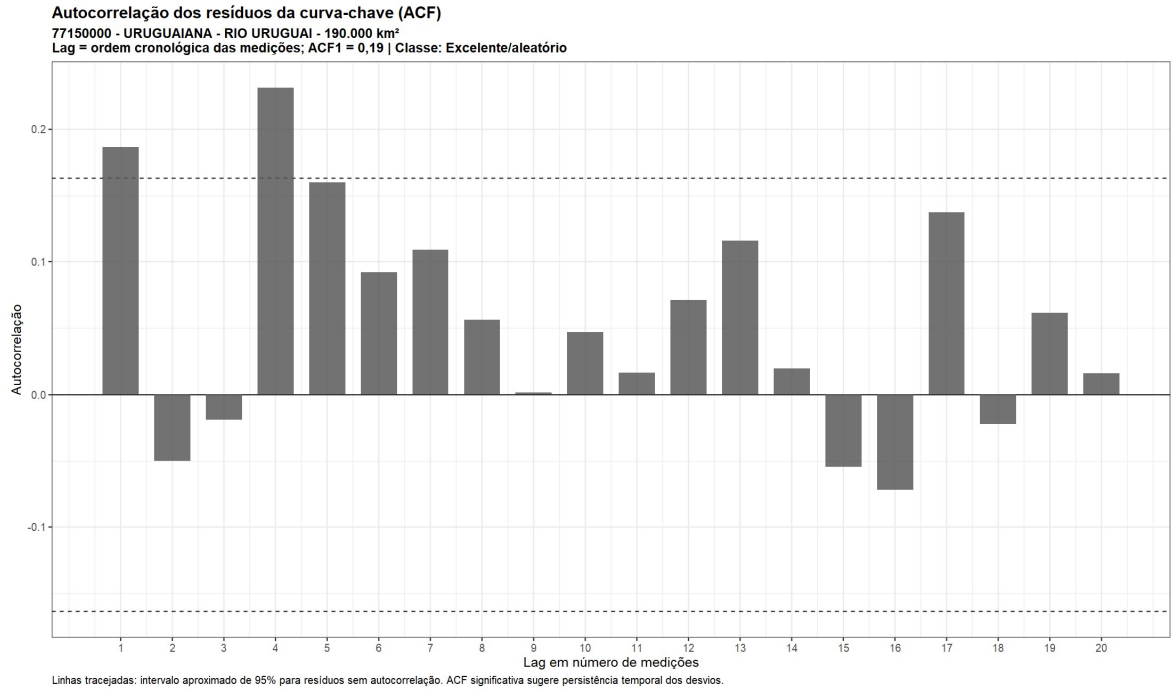


Figura 7. Função de autocorrelação dos resíduos das curvas-chave da estação 77150000 - Uruguaiana.

De modo geral, os resultados obtidos indicam que as curvas-chave avaliadas para a estação 77150000 - Uruguaiana apresentam bom desempenho estatístico, coerência gráfica e comportamento temporal satisfatório dos resíduos. A aderência visual das curvas às medições, a distribuição equilibrada dos desvios positivos e negativos, as medianas próximas de zero, a baixa assimetria do histograma e a ausência de autocorrelação temporal relevante constituem evidências convergentes de adequação das relações cota-descarga analisadas. A aplicação conjunta desses produtos demonstra que o SiADH pode apoiar uma avaliação mais objetiva, rastreável e reprodutível das curvas-chave, sem dispensar a interpretação técnica do analista.

4 CONCLUSÕES

A aplicação da abordagem multicritério à estação fluviométrica 77150000 - Uruguaiana demonstrou que a avaliação de curvas-chave pode ser aprimorada pelo uso integrado de produtos gráficos, estatísticos, temporais e hidráulicos. A análise conjunta de curvas em escala aritmética e bilogarítmica, desvios percentuais, boxplots, histograma, *heatmap* e autocorrelação dos resíduos permitiu avaliar a qualidade da relação cota-descarga sob diferentes perspectivas.

Os resultados indicaram boa aderência das curvas-chave às medições de descarga líquida, com desvio médio absoluto reduzido, distribuição equilibrada entre desvios positivos e negativos, medianas próximas de zero nos diferentes períodos de validade e ausência de viés sistemático relevante. A análise por faixas hidráulicas e por ano mostrou que os desvios não se concentraram de forma persistente em determinada faixa de vazão ou intervalo temporal, embora alguns valores discrepantes tenham sido observados de forma localizada.

A análise de autocorrelação indicou baixa persistência temporal dos resíduos, reforçando a interpretação de que os desvios apresentam comportamento predominantemente aleatório no estudo de caso. Esse resultado, associado à boa aderência gráfica e à distribuição aproximadamente simétrica dos resíduos, constitui evidência convergente da adequação das curvas-chave avaliadas para a estação analisada.

Conclui-se que os produtos associados ao resultado 450 do SiADH constituem instrumentos relevantes de apoio à análise técnica de curvas-chave, aumentando a objetividade, a rastreabilidade e a reprodutibilidade do processo de avaliação. A metodologia não substitui o julgamento especializado do hidrólogo ou analista de consistência, mas organiza evidências e subsidia decisões técnicas relacionadas à manutenção, revisão ou complementação das curvas-chave com novas medições de descarga líquida.

5 REFERÊNCIAS

JACCON, G.; CUDO, K. J. (1989). Curva-chave: análise e traçado. Brasília: [s.n.].

LOPES, W. T. A.; LEMOS, G. M.; SILVA, L. R. S.; SILVA, M. C. A. M.; PISCOYA, R. C. C. C.; GOMES, A. O.; SANTOS, A. G. (2013). “Sistema para Análise de Dados Hidrológicos - SiADH” in Anais do XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Bento Gonçalves, Nov. 2013.

LOPES, W. T. A.; LEMOS, G. M.; SILVA, M. C. A. M.; PISCOYA, R. C. C. C.; GOMES, A. O. (2017). “Sistema para Análise de Dados Hidrológicos (SiADH) - Módulo para análise e traçado de curvas-chave” in Anais do XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Florianópolis, Nov. 2017.

RANTZ, S. E. (1982). Measurement and computation of streamflow: volume 2, computation of discharge. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2175. Washington: U.S. Government Printing Office. Disponível em: http://pubs.usgs.gov/wsp/wsp2175/. Acesso em: 02 jun. 2026.