

Propriedades estatísticas das séries históricas de cota e vazão da bacia do rio Doce

Statistical properties of historical water level and flow rate series of the doce river basin

Emmanuel Kennedy Costa Teixeira ¹

¹ Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Civil, Viçosa/MG, Brasil. Email: emmanuel.teixeira@ufv.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7598-0240>

Resumo: A bacia do rio Doce é de extrema importância socioambiental, econômica e cultural, desempenhando um papel vital na vida das comunidades locais, na biodiversidade regional e na preservação dos recursos hídricos. Para realizar o planejamento dos seus recursos hídricos, normalmente se recorre às séries históricas de dados. Entretanto, nem sempre elas são analisadas estatisticamente antes de serem utilizadas. Sendo assim, este estudo verificou, por meio da aplicação de testes não paramétricos, utilizando o programa estatístico R, a aleatoriedade, independência, homogeneidade e estacionariedade das séries de médias mensais de cota do nível d'água e de vazão desta bacia. A partir dos resultados, obteve-se que nenhuma estação possuía série aleatória; quatro possuíam séries independentes (três de cota e uma de vazão); cento e vinte e oito homogêneas (58 de cota e 70 de vazão); cento e quarenta e oito estacionárias (76 de cota e 72 de vazão). Ao final, concluiu-se que os dados das séries históricas possuem constâncias em suas variações e devem ser analisados criteriosamente antes de serem utilizados.

Palavras-chave: Testes não paramétricos; Estações fluviométricas; Hidrologia estatística.

Abstract: The Doce River Basin holds immense socio-environmental, economic, and cultural significance, playing a vital role in the lives of local communities, regional biodiversity, and the preservation of water resources. For water resource planning, historical data series are commonly used. However, these series are not always statistically analyzed prior to use. Therefore, this study employed non-parametric tests using the statistical software R to assess the randomness, independence, homogeneity, and stationarity of the monthly mean water level and flow rate series of this basin. The results indicated that none of the stations had random series; four stations had independent series (three for water level and one for flow rate); 128 stations had homogeneous series (58 for water level and 70 for flow rate); and 148 stations had stationary series (76 for water level and 72 for flow rate). In conclusion, the historical data series exhibit consistent variations and should be thoroughly analyzed before being utilized.

Keywords: Non-parametric tests; Hydrometric stations; Statistical hydrology.

1. Introdução

Os recursos hídricos são de suma importância para que o ciclo da vida seja preservado. Dessa forma, um dos grandes desafios atuais é a sua gestão sustentável. Badham *et al.* (2019) propõem que o seu planejamento seja feito de forma que a interação entre os seres humanos e o meio ambiente não comprometa o ecossistema. Sendo assim, é necessário que os projetos utilizem dados alinhados à realidade da região hidrológica garantindo uma boa gestão e a preservação desses recursos.

Dentro desse contexto, Silva (2020) aborda que a análise estatística de séries históricas de dados fluviométricos é indispensável para o planejamento de uso água, aproveitamentos hidro energéticos, previsão de cheias, gerenciamento de bacias hidrográficas, dentre outros. Uliana *et al.* (2015) relataram que essa análise pode ser feita por meio de testes não paramétricos que, de acordo com Naghettini (2017), podem verificar a aleatoriedade, independência, homogeneidade e estacionariedade dos dados de uma série hidrológica.

Alguns trabalhos analisaram as séries históricas de dados fluviométricos em bacias hidrográficas, dos quais se pode citar Câmara *et al.* (2016) que testaram e identificaram a não estacionariedade das séries de dados fluviométricos do rio Tocantins. Isso reforça a necessidade de considerar essas mudanças em modelos hidrológicos.

Costa (2014) verificou a homogeneidade, a estacionariedade e a presença de saltos, por meio dos testes de Mann-Whitney, Spearman e Petit, das 1943 estações fluviométricas do Brasil, descartando as que tinham dados insuficientes. Avaliando as estações fluviométricas de modo a obter os recordes de vazão, o autor elaborou equações empíricas em função das áreas de drenagens e estabeleceu probabilidades de excedência de cada um dos recordes estudados.

Detzel *et al.* (2011) analisaram a estacionariedade de séries hidrológicas de vazões de todas as usinas hidrelétricas que compunham o Sistema Interligado Nacional até dezembro de 2007. Os autores concluíram que a maioria das séries analisadas não apresentaram estacionariedade.

Carvalho e Ruiz (2016) fizeram o estudo da homogeneidade para analisar e preencher as falhas, utilizando o Método da Regressão Linear Simples ou Múltipla, de 19 estações pluviométricas da bacia hidrográfica do rio Araguari. Por meio de testes estatísticos, como o teste de Pettitt e o teste de Mann-Kendall, foram identificadas mudanças significativas nos dados de algumas séries, o que pode estar relacionado a fatores como alterações nos instrumentos de medição, mudanças nos locais das estações ou variações climáticas regionais.

Uma das bacias mais importante da região Sudeste é a do rio Doce. Ela possui grande relevância socioeconômica e ambiental para as comunidades locais. Além disso, fornece recursos hídricos para o abastecimento de água, agricultura, indústria e outros setores econômicos, também é essencial para a preservação da biodiversidade e dos ecossistemas regionais. Por isso, para a proteção dos seus recursos hídricos, é essencial a realização de planejamento, para o qual se utiliza séries históricas de dados.

Historicamente, a bacia sofre os efeitos da ocorrência de cheias e enchentes, sendo que as registradas geraram impactos pelas cidades localizadas ao longo de seu leito. Almeida (2020) afirmou que as cheias comprometeram as atividades econômicas que se estabeleceram ao longo da bacia, tendo destaque, conforme relatou Barbosa (2004), as atividades de agropecuária, mineração, indústrias e geração de energia. Assim, reforça-se a necessidade da utilização de séries históricas para o planejamento ao longo da bacia para se enfrentar os períodos de cheias.

Alguns autores realizaram análises estatísticas na bacia do rio Doce, como, por exemplo, Valverde *et al.* (2003) que ajustaram modelos estatísticos de cálculo de homogeneidade de séries históricas e estabeleceram equações verificando quais regiões do rio Doce se mostravam homogêneas ou heterogêneas em tempos de chuvas intensas.

Teixeira *et al.* (2018), objetivando determinar os coeficientes de rugosidade de Manning para diversos trechos ao longo do rio Doce, analisaram a aleatoriedade dos dados de vazões em estações fluviométricas da bacia. As séries históricas apresentaram comportamento estatisticamente aleatório, com ausência de tendências significativas ou padrões sazonais que comprometessem as análises.

Silva, Lima e Groppo (2017) utilizaram os testes de Mann-Kendall e Pettitt para analisar a independência e aleatoriedade dos dados de vazões do rio Doce para, assim, determinar as tendências temporais e verificar possíveis mudanças bruscas na média de vazão da bacia entre os anos de 1950 e 2016. Os resultados indicaram que todas as estações tinham tendências negativas nas séries temporais de vazão.

Ferreira *et al.* (2020), em suas análises sobre as vazões do rio Guanhães, testaram a estacionariedade para quantificar e investigar o comportamento e tendência das vazões ao longo dos anos, verificando possíveis mudanças de comportamento. Fraga *et al.* (2020) utilizaram o teste de Pettitt e análise de regressão linear para avaliar os dados anuais e mensais de precipitação e vazão nas estações da Unidade de Gestão de Recursos Hídricos do rio Piracicaba. As séries de

precipitação foram estáveis ao longo do tempo, com poucas tendências significativas. Os dados de vazão demonstraram tendências de redução, em diversas estações monitoradas.

Embora existam estudos sobre a bacia do rio Doce, não são encontrados materiais que analisaram estatisticamente e amplamente as séries históricas de cotas do nível d'água e vazões. Heidarpour *et al.* (2017) afirmaram que as variáveis hidrológicas, como vazões e níveis d'água, devem ser analisadas com precisão para evitar custos excessivos de projetos, danos em grande escala ou até mesmo perda de vidas humanas. Além disso, Hodgkins *et al.* (2017) apresentaram que a análise dos dados é essencial, pois os métodos desenvolvidos para estimativa de vazões e de níveis d'água adotam premissas estatísticas sobre a série histórica a ser utilizada. Sendo assim, este trabalho teve como objetivo analisar as séries históricas de todas as estações fluviométricas da bacia do rio Doce, com a finalidade de testar a sua aleatoriedade, independência, homogeneidade e estacionariedade. Contribuindo, assim, para o melhor planejamento dos recursos hídricos da bacia e auxiliando para que futuros estudos não adotem premissas estatísticas erradas.

2. Metodologia

A metodologia abrange as seguintes etapas: (a) caracterização da área de estudo; (b) obtenção dos dados das séries históricas; e (c) análise estatística das séries históricas.

2.1 Área de estudo

A bacia do rio Doce está localizada na região Sudeste do Brasil, tendo área de drenagem de, aproximadamente, 86.715 km², em que 86% estão localizados no leste do estado de Minas Gerais e 14% no nordeste do Espírito Santo. Suas nascentes estão nas serras do Espinhaço e da Mantiqueira, localizadas no estado de Minas Gerais. Ela possui predominância do clima tropical de altitude, tendo volumes de precipitação anual variando entre 900 mm e 1.500 mm, e presença de relevo ondulado, montanhoso e acidentado (ALMEIDA, 2020).

As inundações, que constituem um grande problema para a bacia, são registradas no período chuvoso, ocorrendo de outubro a março, com maiores volumes nos meses de dezembro a fevereiro. Aliado a isso, a ocupação desordenada da planície de inundação dos cursos d'água, em especial nas áreas urbanas, tem agravado os danos causados pelas enchentes. Para minimizar estes danos, um sistema de alerta contra enchentes se encontra em operação na bacia há 13 anos, desde o período chuvoso de 1997/1998, evidenciando a necessidade e viabilidade que o cálculo e análise estatística das séries históricas proporcionam para o entendimento, correção de erros e previsão do comportamento futuro da bacia.

2.2 Obtenção dos dados das séries históricas

Bayer, Castro e Bayer (2012) apresentaram que uma série temporal é um conjunto de observações ordenadas no tempo, tornando-se possível concluir que os processos que compõem o ciclo hidrológico, como a vazão, dentre outros, por serem objetos de medições sistemáticas em tempos discretos, podem ser tratados como esse tipo de série.

Para Naghettini e Pinto (2007), uma série hidrológica pode incluir todas as observações disponíveis, coletadas em intervalos regulares nos registros de vários anos, ou apenas alguns de seus valores característicos, como máximos anuais ou médias mensais, sendo que a análise estatística desses dados permite obter uma tendência de acontecimentos.

As séries históricas analisadas neste trabalho foram obtidas do Sistema de Informações Hidrológicas (HidroWeb) da Agência Nacional das Águas e Saneamento Básico (ANA). Para a bacia do rio Doce foram coletados dados de 211 estações fluviométricas que, teoricamente, possuíam séries históricas diárias de vazões e cotas do nível d'água.

Para as análises estatísticas dos dados, a principal ferramenta utilizada foi o software de programação estatística R, o qual é de acesso livre. Para ele foram importados os valores das séries históricas. Entretanto, na planilha obtida do HidroWeb constava o valor "0" (zero) nas falhas de dados das séries históricas. Tais falhas seriam interpretadas pelo R como dados zerados, o que afetaria as análises. Assim, antes de exportar os dados para o programa estatístico, ainda na planilha foi realizada a substituição de todos os zeros por "NA" (not available), que são interpretados pelo R como dados faltantes.

Outro ponto importante foi a substituição do separador decimal, pois os dados do HidroWeb utilizam a vírgula, no entanto, o R só reconhece o ponto como separador decimal. Além disso, ainda antes da exportação, os dados foram verticalizados, ou seja, criou-se uma única coluna contendo todos os valores, sendo que em cada linha havia os dados diários das séries históricas, de cada estação fluviométrica. Posteriormente, os dados foram importados para o programa estatístico.

2.3 Análise estatística das séries históricas

As análises estatísticas das séries históricas de dados diários de vazões e cotas do nível d'água das estações fluviométricas da bacia do rio Doce foram realizadas por meio de testes não paramétricos. Para isso, os testes foram implementados no programa R, utilizando-se as equações de cada um, conforme descritas em Naghettini e Pinto (2007) e apresentadas a seguir.

Pelo teste de aleatoriedade, analisou-se a série dos dados hidrológicos quanto à variação por consequência das causas naturais. O teste utilizado neste trabalho foi o do Número de Inflexões (Equação 1).

$$E(p) = \frac{2(N - 2)}{3} \quad (1)$$

Em que:

$E(p)$ é o número esperado de inflexões;

N é o tamanho da amostra (número de observações).

Considerando que a hipótese nula (H_0) é a da amostra ser aleatória, a estatística do teste é representada pela Equação 2.

$$T = \frac{p - E(p)}{\sqrt{Var(p)}} \quad (2)$$

Em que:

T é a estatística do teste não paramétrico;

p é o número de inflexões observados nos dados;

$Var(p)$ é a variância do número de inflexões (Equação 3).

$$Var(p) = \frac{16N - 29}{90} \quad (3)$$

Com um nível de significância de 5%, a hipótese nula é rejeitada caso $|T| > Z_{97,5}$ (teste bilateral).

O teste de independência analisou a possibilidade de os dados da amostra influenciarem em qualquer outra observação feita anteriormente. Para essa verificação foi utilizado o teste de Wald e Wolfowitz. Considerando que a hipótese nula é a da amostra ser independente, a estatística do teste é representada na Equação 4.

$$T = \frac{R - E[R]}{\sqrt{VAR[R]}} \quad (4)$$

Em que:

T é a estatística do teste não paramétrico;

R é um coeficiente do teste de Wald e Wolfowitz;

$E[R]$ é a média do coeficiente R ;

$Var[R]$ é a variância do coeficiente R .

O coeficiente R foi calculado utilizando a Equação 5.

$$R = \sum_{i=1}^{N-1} X'_i X'_{i+1} + X'_1 X'_N \quad (5)$$

Em que:

N é o tamanho da amostra;

X'_i é a diferença entre um dado da amostra na posição i e a média amostral dos dados.

Caso a série histórica seja independente, o coeficiente R segue uma distribuição normal com média $E[R]$ calculada conforme a Equação 6.

$$E[R] = -\frac{s_2}{N-1} \quad (6)$$

Em que s é uma variável do teste calculada utilizando as Equação 7 e 8.

$$s_r = Nm'_r \quad (7)$$

$$m'_r = \frac{\sum_{i=1}^N (X'_i)^r}{N} \quad (8)$$

O r denota a ordem dos momentos amostrais com relação à origem. E variância do coeficiente R é dada pela Equação 9.

$$Var[R] = \frac{s_2^2 - s_4}{N-1} + \frac{s_2^2 - 2s_4}{(N-1)(N-2)} - \frac{s_2^2}{(N-1)^2} \quad (9)$$

Com um nível de significância de 5%, a hipótese nula é rejeitada caso $|T| > Z_{97,5}$ (teste bilateral).

Para se testar a homogeneidade das séries históricas foi realizada a verificação dos dados a fim de perceber se eles são semelhantes ou provenientes de uma mesma população. Para isso, aplicou-se o teste não paramétrico proposto por Mann e Whitney. Considerando os dados de uma amostra qualquer de tamanho N $\{X_1, X_2, X_3, \dots, X_n\}$, a qual foi separada em duas sub amostras, sendo $\{X_1, X_2, X_3, \dots, X_{N_1}\}$ de tamanho N_1 e $\{X_{N_1+1}, X_{N_1+2}, X_{N_1+3}, \dots, X_N\}$ de tamanho N_2 , de forma que $N_1 + N_2 = N$. Os tamanhos das sub amostras devem ser aproximados, de modo que $N_1 \leq N_2$. A amostra completa (tamanho N) foi ordenada de forma crescente e os seus elementos receberam uma classificação de ordem m .

O coeficiente V do teste é dada pelo menor valor entre as Equações 10 e 11.

$$V_1 = N_1 N_2 + \frac{N_1(N_1 + 1)}{2} - R_1 \quad (10)$$

$$V_2 = N_1 N_2 - V_1 \quad (11)$$

Em que:

V_1 e V_2 são coeficientes do teste de Mann e Whitney;

N_1 é o tamanho da sub amostra 1;

N_2 é o tamanho da sub amostra 2;

R_1 é o somatório das classificações dos dados da primeira sub amostra (tamanho N_1).

Caso a série histórica seja homogênea e $N_1, N_2 > 20$, o coeficiente V segue uma distribuição normal com média calculada utilizando a Equação 12.

$$E[V] = \frac{N_1 N_2}{2} \quad (12)$$

$E[V]$ é a média do coeficiente V .

A variância do coeficiente V ($Var[V]$) foi calculada por meio da Equação 13.

$$VAR[V] = \frac{N_1 N_2 (N_1 + N_2 + 1)}{12} \quad (13)$$

A estatística T do teste é representada pela Equação 14.

$$T = \frac{V - E[V]}{\sqrt{VAR[V]}} \quad (14)$$

Sendo a hipótese nula dada que a amostra é homogênea, com um nível de significância de 5%, ela é rejeitada caso $|T| > Z_{97,5}$ (teste bilateral).

Com relação à estacionariedade, Bauzha e Gorbachova (2017) apresentaram que o teste é baseado na suposição que o processo de geração do fluxo está em equilíbrio em torno de uma média subjacente e sua variação permanece constante ao longo do tempo. O teste de estacionariedade verificou se os dados, sem as variações aleatórias, não possuíam alterações, sendo que neste trabalho se utilizou o teste de Spearman. Considerando os dados de uma amostra qualquer de tamanho N $\{X_1, X_2, X_3, \dots, X_n\}$, foi analisado o coeficiente de correlação entre a ordem de ocorrência T_t e a ordem de classificação crescente m_t dos elementos.

Por meio da Equação 15 foi calculado o coeficiente r_s do teste de Spearman.

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum_{t=1}^N (m_t - T_t)^2}{N^3 - N} \quad (15)$$

Em que:

T_t é a ordem de ocorrência dos dados;

m_t é a classificação crescente dos dados.

Caso a série histórica tenha tamanho $N > 10$, o coeficiente r_s segue uma distribuição normal, sendo a sua média ($E[r_s]$) obtida na Equação 16 e sua variância ($VAR[r_s]$) na Equação 17.

$$E[r_s] = 0 \quad (16)$$

$$VAR[r_s] = \frac{1}{N-1} \quad (17)$$

Considerando que a hipótese nula é a de que T_t e m_t não tenham correlação, a estatística T do teste é representada pela Equação 18.

$$T = \frac{r_s}{\sqrt{VAR[r_s]}} \quad (18)$$

Se $|T| > Z_{97,5}$ (teste bilateral), a hipótese nula é rejeitada a um nível de significância de 5%.

Após os dados das séries históricas serem importados para o R, implementou-se uma função para realizar todos os testes não paramétricos citados. Tal função recebeu como parâmetros de entrada o vetor com os dados, o ano inicial e o ano final de cada série.

Os dados obtidos no HidroWeb são diários, porém os testes foram aplicados para médias mensais. Isso se deu, pois as vazões médias são as mais importantes para o planejamento da bacia, já que representam a disponibilidade de água. Além disso, são utilizadas para a determinação do potencial energético da bacia e na regularização de vazão.

Assim, a primeira parte da função implementada visava retornar uma matriz com as vazões médias mensais para cada estação fluviométrica. Separadamente, a função desenvolvida no R também retornou uma matriz com as cotas médias mensais do nível d'água de cada estação. A função fez a contagem de dia por dia, mês por mês e ano por ano. Por isso, foi necessário que o primeiro dado importado para o R fosse 01 de janeiro do ano inicial da série. Também foram levados em consideração os anos bissextos.

Os testes não foram aplicados nas estações fluviométricas que apresentaram poucos dados registrados, pois seriam obtidos resultados não confiáveis. Morettin e Bussab (2010) apresentaram que, para que o resultado do teste seja confiável, a amostra deve possuir tamanho maior que 30, sendo este o valor adotado neste trabalho.

Como mencionado, a implementação dos testes (aleatoriedade, independência, homogeneidade e estacionariedade, nesta ordem) foi realizada por meio de uma função desenvolvida no R. Assim, posteriormente os dados mensais da matriz gerada foram testados, sendo que a cada teste aplicado, a função apresentou o seguinte texto impresso na tela: “*Rejeita-se H_0 a um nível de significância de 5%*”, ou “*Não se rejeita H_0 a um nível de significância de 5%*”. Adicionalmente, caso o

número de dados não fosse o mínimo exigido para a aplicação do teste, a função imprimia o aviso “*ATENÇÃO! Os dados disponíveis não são o suficiente para um teste confiável*”.

Como havia muitas séries históricas a serem testadas, já que 211 estações fluviométricas da bacia do rio Doce possuíam dados de vazões e cotas de nível d’água, desenvolveu-se uma função no R para que as centenas de arquivos fossem lidos automaticamente e, posteriormente, os testes não paramétricos fossem aplicados. Ao final, também de forma automática, a função registrava o resultado obtido.

3. Resultados e discussão

Após a organização dos dados e aplicação da função desenvolvida no programa R, verificou-se que, das 211 estações da bacia do rio Doce, quatro (1,90%) não possuíam dados de cotas do nível d’água disponíveis e 12 (5,69%) possuíam quantidade insuficiente de dados para a aplicação dos testes. Para as 195 estações restantes, a média do período de avaliação foi de 26,91 anos, sendo que o maior período foi de 91 anos.

Com relação à análise das vazões médias, 70 estações apresentaram dados não disponíveis, o que corresponde a 33,18%, e cinco (2,37%) estavam com dados insuficientes para aplicação dos testes de hipóteses. Em média, as estações possuíam 20,42 anos de dados registrados, de forma que o maior período foi de 86 anos.

Assim, como se observou que houve muitas estações que não possuíam dados registrados nas suas séries históricas ou possuíam dados insuficientes para a aplicação dos testes não paramétricos, ressalta-se que é importante e necessário que os futuros estudos a serem realizados na bacia promovam o preenchimento das falhas de dados. Carvalho e Ruiz (2016) relataram que o preenchimento auxilia no desenvolvimento de projetos que dependam da análise de séries históricas extensas.

Os testes não paramétricos foram realizados de forma individual para cada estação fluviométrica, para os dados de vazões e cotas de níveis d’água mensais. Na Tabela 1, a coluna “S” indica as séries que possuíam aleatoriedade, independência, homogeneidade e/ou estacionariedade, enquanto “N” indica que os dados não seguiam essas características.

Tabela 1 – Resultados dos testes não paramétricos aplicados nas séries históricas de vazões e cotas de níveis d’água mensais das estações fluviométricas da bacia do rio Doce.

Propriedade estatística	Variável	S	N
Aleatoriedade	Cota	0	195
	Vazão	0	136
Independência	Cota	3	192
	Vazão	1	135
Homogeneidade	Cota	58	137
	Vazão	70	66
Estacionariedade	Cota	76	119
	Vazão	72	64

Fonte: Autor (2023).

Com base nos resultados da Tabela 1, tem-se que nenhuma estação fluviométrica apresentou série aleatória de médias mensais de cotas do nível d’água e de vazões. Isso mostra que os dados hidrológicos não possuem picos de variações em consequência de causas naturais. Ferreira et al. (2020), para uma estação fluviométrica da bacia do rio Doce, também obtiveram que a variação das vazões tem causas antropológicas, ligadas ao uso e ocupação do solo.

Com relação à independência, houve um baixo número de estações fluviométricas que apresentam essa característica em suas séries de médias mensais de cotas do nível d’água (três estações) e vazões (uma estação). As estações independentes quanto às cotas foram as de códigos 56846890, 56415000 e 56610000. Já a estação de código 56661000 apresentou série de vazões médias mensais independentes.

Quanto à estacionariedade, mais estações fluviométricas possuíram essa característica, sendo que 76 (36,02% em relação ao total da bacia do rio Doce) apresentaram dados médios mensais estacionários de cota do nível d’água e 72 (34,12%) de vazão. As estações estacionárias estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Estações que possuem séries estacionárias.

Cotas médias do nível d’água

56695000, 56991000, 56681000, 56989500, 56987900, 56990500, 56993550, 56992500, 56719998, 56993300, 56565000, 56055000, 56630000, 56230000, 56974000, 56997200, 56780000, 56540001, 56635000, 56470000, 56925001, 56640000, 56182000, 56994500, 56994505, 56994502, 56943000, 56935000, 56340000, 56846890, 56590000, 56976000, 56847000, 56846900, 56246000, 56999000, 56380000, 56090000, 56185000, 56744500, 56510000, 56993005, 56993002, 56992900, 56400000, 56998100, 56998005, 56989001, 56989000, 56350000, 56659999, 56207000, 56963000, 56835000, 56633000, 56195000, 56105000, 56995500, 56995500, 56430000, 56631500, 56820000, 56350000, 56210000, 56948005, 56978000, 56924100, 56924000, 56919500, 56927000, 56015000, 56650000, 56170000, 56520000, 56892000, 56996000
Vazões médias
56500000, 56695000, 56991000, 56990990, 56681000, 56992000, 56997000, 56990500, 56940000, 56719998, 56336001, 56565000, 56974000, 56012000, 56540001, 56539000, 56720000, 56635000, 56470000, 56640000, 56985000, 56182000, 56994502, 56943000, 56700000, 56935000, 56983000, 56590000, 56976000, 56847000, 56846900, 56005000, 56780005, 56670000, 56880000, 56960005, 56185000, 56850000, 56988500, 56993002, 56400000, 56991500, 56155000, 56998100, 56960000, 56150000, 56696000, 56460000, 56989001, 56989000, 56825000, 56659999, 56659998, 56661000, 56152000, 56963000, 56982000, 56570000, 56633000, 56195000, 56105000, 56995500, 56995500, 56430000, 56631500, 56160000, 56158000, 56485000, 56948005, 56385000, 56990000, 56065000, 56130000

Fonte: Autor (2023).

Apesar do número mais elevado de estações que apresentaram essa característica, comparada às demais, a estacionariedade deve ser analisada com maior rigor estatístico, como recomenda Li et al. (2022). Isso se deve ao fato de existirem diversos fatores que afetam a tendência dos dados, como mudanças climáticas e atividades humanas. Assim, recomenda-se que mais de um teste estatístico seja aplicado para confirmar a hipótese da estacionariedade.

De acordo com a Tabela 1, foi observado que 27,49% das estações possuíam séries médias mensais homogêneas quanto às cotas do nível d'água e 33,18% quanto às vazões. Assim, estas séries apresentaram pequenas variações de vazões e cotas ao longo do período examinado. Isso mostra a capacidade da bacia em oferecer recursos hídricos e subsídios, bem como também a viabilidade de ocupação e expansão urbana em seu entorno. Na Tabela 3 estão apresentados os códigos das estações fluviométricas que possuíam séries médias mensais de cotas do nível d'água e vazões homogêneas.

Tabela 3 – Estações que possuem séries homogêneas.

Cotas médias do nível d'água
56695000, 56991000, 56990990, 56050000, 56760000, 56989500, 56989400, 56993550, 56992500, 56719998, 56993300, 56565000, 56055000, 56630000, 56230000, 56997200, 56995000, 56780000, 56635000, 56470000, 56182000, 56994500, 56994510, 56994502, 56750000, 56935000, 56340000, 56590000, 56986000, 56976000, 56846900, 56380000, 56240000, 56775000, 56744500, 56510000, 56993005, 56993002, 56400000, 56998100, 56998000, 56989001, 56350000, 56028000, 56633000, 56195000, 56105000, 56995500, 56995500, 56631500, 56947000, 56948005, 56415000, 56015000, 56650000, 56170000, 56520000, 56892000
Vazões médias
56991000, 56990990, 56989400, 56990500, 56940000, 56719998, 56565000, 56055000, 56012000, 56995000, 56539000, 56720000, 56900000, 56635000, 56470000, 56985000, 56182000, 56994510, 56994502, 56632000, 56750000, 56935000, 56340000, 56983000, 56590000, 56986000, 56976000, 56846900, 56005000, 56337000, 56880000, 56960005, 56090000, 56510000, 56988500, 56400000, 56991500, 56155000, 56998100, 56960000, 56150000, 56696000, 56989001, 56659999, 56659998, 56963000, 56982000, 56570000, 56028000, 56633000, 56195000, 56995500, 56995500, 56430000, 56631500, 56160000, 56110005, 56158000, 56485000, 56948005, 56415000, 56978000, 56385000, 56990000, 56065000, 56085000, 56130000, 56170000, 56520000, 56892000

Fonte: Autor (2023).

Avaliando as estações que apresentaram resultados positivos para as análises, tem-se que 35 foram estacionárias simultaneamente quanto à vazão e cota do nível d'água, o que corresponde a 16,59% do número total de estações fluviométricas existentes na bacia do rio Doce. Tem-se também que 34 (16,11%) possuíam séries históricas homogêneas

tanto para vazões quanto para cotas do nível d'água. No caso de aleatoriedade e independência, nenhuma estação apresentou resultado positivo de forma simultânea para cota e vazão.

Assim, observa-se que, apesar de nível d'água e vazão estarem diretamente relacionadas, ocorreu de uma mesma estação fluviométrica possuir série estacionária para vazão e não estacionária para a cota do nível d'água e vice-versa. O mesmo fato foi observado para a homogeneidade e independência. Esse fato revela as deficiências e incertezas contidas nas técnicas de monitoramento de vazão e nível d'água. Além disso, cabe ressaltar que cada teste de hipótese possui o seu poder, ou seja, há uma probabilidade de se rejeitar a hipótese nula quando ela é verdadeira.

Com base nas análises realizadas, observou-se que, tanto para cota do nível d'água, quanto para vazão, nenhuma estação apresentou dados que fossem simultaneamente aleatório, independente, homogêneo e estacionário. Dessa forma, a suposição destas premissas, típicas em estudos hidrológicos, podem ser enganosas na maior parte das séries, o que, consequentemente, produz estatísticas não representativas e afetam a qualidade e o resultado do projeto. Assim, os estudos devem aplicar algum teste estatístico para verificar a hipótese, ao invés de simplesmente assumi-la como verdadeira. Posteriormente, caso a premissa não seja aceita, existe a possibilidade de aplicação de técnicas que corrijam as tendências para as condições atuais.

4. Considerações finais

Ao longo desse trabalho foram apresentados os fundamentos que nortearam a análise de aleatoriedade, independência, estacionariedade e homogeneidade de médias mensais de vazões e cotas de nível d'água das séries históricas das estações fluviométricas localizadas na bacia do rio Doce. Com base nos resultados obtidos, tem-se que:

- Das 211 estações verificadas, aproximadamente, 7,5% não possuíam dados médios mensais de cotas de nível d'água ou estes eram insuficientes para a aplicação dos testes de hipóteses. No caso das vazões médias, o valor aumentou e chegou a, aproximadamente, 35,5% das estações fluviométricas.

- Nenhuma estação apresentou dados médios mensais aleatórios, tanto para cota média do nível d'água quanto para as vazões. No caso de independência, houve três estações que apresentaram para o caso da cota média do nível d'água e apenas uma para vazão média. Isso indica que os dados das séries históricas possuem constantes variações, não seguindo um padrão. Além disso, há indicação de que o comportamento hidrológico tem sido afetado por ações antrópicas, como a construção de barragens.

- Para o caso da homogeneidade, houve 58 e 70 estações fluviométricas que apresentaram esta característica para os dados de cota e vazão, respectivamente.

- O total de 76 estações possuíam dados estacionários para cota e 72 para vazão.

- Apesar de cota de nível d'água e vazão serem variáveis diretamente relacionadas, apenas 35 estações foram estacionárias simultaneamente quanto aos dois parâmetros. No caso da homogeneidade, este valor reduziu para 34. Assim, observa-se que as variações dos dados podem estar relacionadas com as incertezas e erros na sua medição.

- Não houve nenhuma estação que apresentou, simultaneamente, série aleatória, independente, estacionária e homogênea, isso tanto para vazão média quanto para cota média do nível d'água. Assim, os estudos hidrológicos a serem realizados na bacia devem se atentar para o fato antes de admitirem estas quatro premissas.

Para trabalhos futuros, sugere-se que a metodologia deste artigo seja aplicada para a verificação de aleatoriedade, independência, homogeneidade e estacionariedade nas séries de vazões mínimas e máximas da bacia. Além disso, seria interessante a avaliação em outras bacias hidrográficas.

Referências

- Almeida, F. C. Análise multicritério na definição de áreas prioritárias para recuperação florestal na bacia do Rio Doce, em Minas Gerais. *Nativa*, v. 8, n. 1, 81-90, 2020. <http://dx.doi.org/10.31413/nativa.v8i1.8130>.
- Badham, J.; Elsawah, S.; Guillaume J. H. A.; Hamilton, S. H.; Hunt, R. J.; Jakeman, A. J.; Pierce, S. A.; Snow, V. O.; Babbar-Sebens, M.; Fu, B.; Gober, P.; Hill, M. C.; Iwanaga, T.; Loucks, D. P.; Merritt W. S.; Peckham, S. D.; Richmond, A. K.; Zare, F.; Ames, D.; Bammer, G. Effective modeling for Integrated Water Resource Management: a guide to contextual practices by phases and steps and future opportunities. *Environmental Modelling and Software*, v. 116, 40–56, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.02.013>.

- BARBOSA, S. E. S. *Análise de dados hidrológicos e regionalização de vazões da bacia do rio do Carmo*. Ouro Preto, 2004.188f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2004.
- Câmara, R. K. C.; Rocha, E. J. P.; Protázio, J. M. B.; Queiroz, J. C.; Ribeiro, W, M, N.; Siqueira, I. S.; Lima, A. M. M. Modelagem hidrológica estocástica aplicada ao rio Tocantins para a cidade de Marabá - PA. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 31, n. 1, 11-23, 2016. <https://doi.org/10.1590/0102-778620140092>.
- COSTA, K. T. *Avaliação de distribuições de probabilidades das vazões médias diárias máximas anuais do Brasil*. Belo Horizonte, 2014. 212f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.
- Detzel, D. H. M.; Bessa, M. R.; Vallejos, C. A. V.; Santos, A. B.; Thomsen, L. S.; Mine, M. R. M.; Bloor, M. L.; Estrócio, J. P. Estacionariedade das afluentes às usinas hidrelétricas brasileiras. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 16, n. 3, 95-111, 2011. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v16n3.p95-111>.
- Ferreira, F. L. V.; Rodrigues, L. N.; Almeida, L. T.; Teixeira, D. B. S. Tendência em séries hidrológicas e de mudanças no uso e cobertura da terra da bacia hidrográfica do rio Guanhanes, Minas Gerais. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, v. 3, n. 2, 447-459, 2020. <https://doi.org/10.34188/bjaerv3n2-004>.
- Heidarpour, B.; Saghaian, B.; Yazdi, J.; Azamathulla, H. M. Effect of extraordinary large floods on at-site flood frequency. *Water Resources Management*, v. 31, 4187-4205, 2017. <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1739-x>.
- Hodgkins, G. A.; Whitfield, P. H.; Burn, D. H. Climate-driven variability in the occurrence of major floods across North America and Eutorpe. *Journal of Hydrology*, v. 552, 704-717, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.07.027>.
- Li, Q.; Zeng, H.; Liu, P.; Li, Z.; Yu, W.; Zhou, H. Bivariate nonstationary extreme flood risk estimation using mixture distribution and copula function for the longmen reservoir, north China. *Water*, v.14, n. 4, 1-16, 2022. <https://doi.org/10.3390/w14040604>.
- Morettin, P. A.; Bussab, W. O. *Estatística básica*. São Paulo: Saraiva, 2010. 6 ed.
- Naghetini, M.; Pinto, E. J. A. *Hidrologia estatística*. Belo Horizonte: CPRM, 2007.
- Silva, L. E. F. Análise de tendência em séries históricas de vazão: uso de teste estatístico paramétrico. *Brazilian Applied Science Review*, v. 4, n. 3, 998-1018, 2020. <https://doi.org/10.34115/basrv4n3-020>.
- Silva, R. K. F.; Lima, E. K. N.; Groppo, J. D. Análise de tendência das séries temporais de vazão na bacia do Rio Doce. In: CONGRESSO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE - POÇOS DE ÁGUAS TERMAIS E MINERAIS, 2017, Poços de Caldas-MG. *Anais...IFSULDEMINAS*, 2017. p. 1-3. Disponível em: <http://www.meioambientepocos.com.br/anais-simposio/anais-simposio/trabalhos/273.pdf>. Acesso em: 23 de maio de 2022.
- Teixeira, E. K. C.; Coelho, M. M. L. P.; Pinto, E. J. A.; Diniz, J. G.; Saliba, A. P. M. Coeficiente de rugosidade de Manning para o rio Doce. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 23, 1-12, 2018. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.231820180013>.
- Uliana, E. M.; Silva, D. D.; Uliana, E. M.; Rodrigues, B. S.; Corrêdo, L. P. Análise de tendência em séries históricas de vazão e precipitação: uso de teste estatístico não paramétrico. *Revista Ambiente e Água*, v. 10, n. 1, 1-7, 2015. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1427>.
- Valverde, A. E. L.; Silva, D. D.; Pruski, F. F.; Leite, H. G.; Brandão, V. S. Análise regional de chuvas intensas para a bacia do Rio Doce. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 8, n. 4, 157-168, 2003. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v8n4.p157-168>.