

# MAPEAMENTO DOS ISÓTOPOS ESTÁVEIS DA ÁGUA DE TORNEIRA EM MINAS GERAIS: POTENCIAL FERRAMENTA PARA A GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS

João Paulo Sena Souza<sup>1</sup>

## INTRODUÇÃO

O ciclo hidrológico é complexo, com múltiplas interações e processos que variam dependendo da escala espacial e temporal. Por isso, a gestão dos recursos hídricos depende de uma série de observações e medidas que integram de forma mais eficiente possível a complexidade do ciclo hidrológico. Isótopos estáveis de água ( $\delta^2\text{H}$  e  $\delta^{18}\text{O}$ ) são parâmetros integradores que indicam processos de transporte, armazenamento e fonte de água nos diferentes componentes do ciclo hidrológico. O principal impulsionador da variação espacial dos isótopos da água nos ecossistemas terrestres é a circulação atmosférica proveniente da evaporação oceânica e da precipitação meteórica ao longo do continente (BOWEN et al., 2019).

Devido ao efeito de fracionamento isotópico,  $\delta^2\text{H}$  e  $\delta^{18}\text{O}$  apresentam padrões de variação espaço-temporal distintos. Portanto, através da análise isotópica da água em diversos componentes do sistema hidrológico é possível determinar com precisão parâmetros como o ciclo de renovação, o tempo de retenção e a taxa do ciclo da água. Esses dados fornecem um suporte robusto para a exploração aprofundada do mecanismo de formação do escoamento em bacias hidrográficas, a análise das relações de conversão entre diferentes corpos d'água, o estudo do processo do ciclo hidrológico das bacias e a previsão de mudanças climáticas (BOWEN et al., 2019). Sendo assim,  $\delta^2\text{H}$  e  $\delta^{18}\text{O}$  são considerados "impressões digitais" dos corpos d'água (GIBSON & REID, 2010).

Devido às semelhanças nas variações isotópicas entre a água da torneira e suas fontes, os isótopos presentes na água da torneira podem ser considerados como um *proxy* para inferir características das fontes de água, mesmo na ausência de dados isotópicos diretos da precipitação ou da água subterrânea (BOWEN et al., 2019). Bowen et al. (2007) observaram que a distribuição espacial desses isótopos era semelhante àquela encontrada

---

<sup>1</sup> Doutor em Ciências Ambientais; Professor do Departamento de Geociências da Universidade Estadual de Montes Claros, [joao.souza@unimontes.br](mailto:joao.souza@unimontes.br);

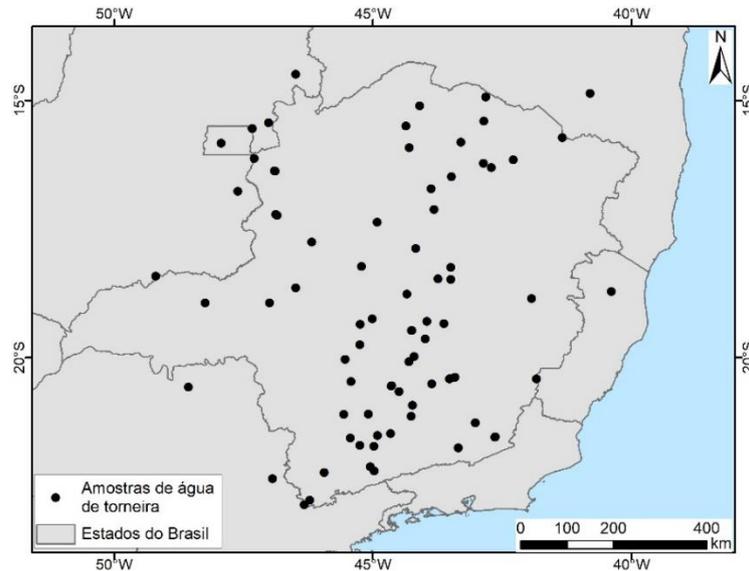
na precipitação nos Estados Unidos. West et al (2014) mostraram que o padrão de distribuição dos isótopos na água da torneira correspondia ao dos isótopos na água subterrânea local na África do Sul. Good et al. (2014) basearam-se na distribuição espacial dos isótopos tanto na água da torneira quanto nas fontes potenciais para identificar a contribuição de fontes de água de outras regiões no oeste dos Estados Unidos. Estudos mais recentes apresentaram variações regionais significativas na composição isotópica da água da torneira na China, decorrentes das diversas fontes de abastecimento (WANG et al., 2018). Em síntese, a relação entre os isótopos estáveis da água da torneira com as fontes potenciais de água para abastecimento pode fornecer informações sobre a pesquisa de recursos hídricos locais, indicando potenciais fontes de água e a sazonalidade do sistema de abastecimento. Esta abordagem pode ser uma interface entre o sistema hidrológico e os sistemas humanos (BOWEN et al., 2019).

Apesar do avanço científico recente, o Brasil ainda não apresentou um avanço significativo em pesquisas com o uso de isótopos estáveis da água da torneira para a gestão dos recursos hídricos. Neste contexto, o objetivo deste estudo foi analisar a variação espacial e temporal dos isótopos estáveis na água da torneira e testar o potencial uso destas variáveis como *proxy* para a gestão dos recursos hídricos em escala regional. O recorte escolhido foi o Estado de Minas Gerais (MG), que possui grande variabilidade climática e extensão territorial. O primeiro objetivo específico foi testar se nos valores de  $\delta^2\text{H}$  e  $\delta^{18}\text{O}$  da água da torneira variam de acordo com a estação do ano. O segundo objetivo específico foi testar a autocorrelação espacial das amostras de água da torneira coletadas ao longo de MG para realizar um mapeamento com o uso de geoestatística e descrever o padrão espacial encontrado.

## **MATERIAIS E MÉTODOS**

Foram coletadas 85 amostras de água em 70 municípios de Minas Gerais e estados vizinhos (Figura 1). Foi realizada uma amostragem por oportunidade, que envolveu carregar *kits* de amostras em viagens de carro ou enviar esses *kits* a colegas em todo o Estado ou cidades próximas em estados vizinhos.

Figura 1 – Localização das amostras de água de torneira.



As análises das razões isotópicas  $R(^2\text{H}/^1\text{H})$  e  $R(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})$  foram realizadas simultaneamente em um sistema de espectrometria de massas de razão isotópica de fluxo contínuo CF-IRMS no Centro de Isótopos Estáveis da UNESP de Botucatu – SP.

Para testar a influência da sazonalidade da coleta nos valores isotópicos da água de torneira, foi realizado o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis, seguido pelo teste de Dunn para comparações par a par. Os grupos comparados nos testes foram as estações do ano no momento da coleta.

Para testar a autocorrelação espacial entre os valores isotópicos, os dados foram agrupados pela coordenada geográfica. Para as amostras coletadas nas mesmas coordenadas geográficas foram calculadas as médias dos valores isotópicos. Os dados foram transformados em dados espaciais. Posteriormente, foram ajustados semivariogramas experimentais. Os modelos ajustados nos semivariogramas foram usados como base para a interpolação por krigagem ordinária dos valores isotópicos.

Para testar o desempenho da predição espacial da krigagem foi realizada uma validação cruzada *Leave-One-Out* (LOO). Na LOO, o modelo prevê o valor de um ponto de dados deixando de fora aquele valor específico observado durante o procedimento e, em seguida, repete o procedimento para todos os pontos de dados observados. Após a validação cruzada, apresentamos o coeficiente de determinação para predição ( $R^2$ ) e a raiz do erro quadrático médio (RMSE) entre os valores previstos e observados. Todos os procedimentos estatísticos foram realizados no *software R* (R Core Team, 2023).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores de  $\delta^2\text{H}$  da água de torneira variaram de -50,05 ‰ a -5,77 ‰, com média de -35,62 ‰ (Tabela 1). Os valores de  $\delta^{18}\text{O}$  da água de torneira variaram de -7,97 ‰ a -1,96 ‰, com média de -5,42 ‰ (Tabela 1).

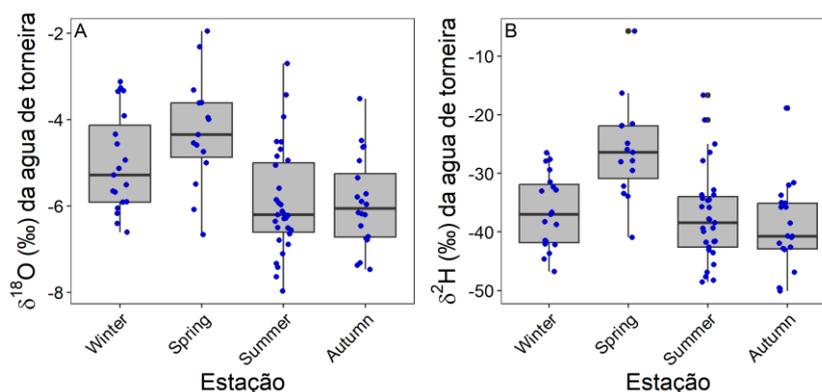
Tabela 1 – Estatística descritiva dos valores isotópicos das 85 amostras de água de torneira coletadas.

	Desvio							
	Média	Padrão	Mediana	Mínimo	Máximo	Amplitude	Assimetria	Curtose
$\delta^2\text{H}$ (‰)	-35,62	8,67	-35,8	-50,05	-5,77	44,28	0,7	0,47
$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	-5,42	1,33	-5,72	-7,97	-1,96	6,01	0,44	-0,52

O teste de Kriskal-Wallis mostrou que há diferença significativa entre os valores de  $\delta^{18}\text{O}$  da água de torneira coletadas em diferentes estações do ano ( $\chi^2 = 19,44$ ; p-valor < 0,05). Porém, o teste de Dunn mostrou as diferenças significativas ocorreram entre o Inverno e o Verão ( $Z = -2,65$ ; p-valor < 0,05), Primavera e Verão ( $Z = -3,76$ ; p-valor < 0,05) e entre Primavera e Outono ( $Z = -3,36$ ; p-valor < 0,05). Não houve diferença significativa entre Inverno e Primavera, Inverno e Outono, e Verão e Outono.

Para os valores de  $\delta^2\text{H}$  da água de torneira, o teste de Kriskal-Wallis também apontou diferenças significativas ( $\chi^2 = 21,29$ ; p-valor < 0,05). Porém, o teste de Dunn apontou diferenças significativas apenas nas comparações que envolviam as amostras coletadas na Primavera (p-valor < 0,05). As diferenças são apresentadas na Figura 2.

Figura 2 – Boxplot mostrando a distribuição dos valores de  $\delta^{18}\text{O}$  (A) e  $\delta^2\text{H}$  (B) da água de torneira para a estação do ano no momento da coleta: inverno (*winter*), primavera (*spring*), verão (*summer*) e outono (*autumn*).

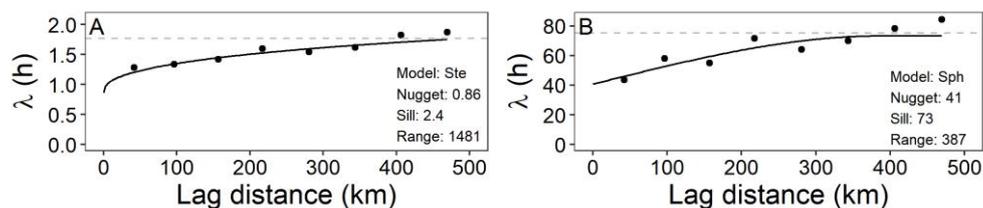


Para os valores de  $\delta^2\text{H}$  da água de torneira, o teste de Kruskal-Wallis também apontou diferenças significativas ( $\chi^2 = 21,29$ ; p-valor  $< 0,05$ ). Porém, o teste de Dunn apontou diferenças significativas apenas nas comparações que envolviam as amostras coletadas na Primavera (p-valor  $< 0,05$ ). As diferenças são apresentadas na Figura 2.

Os valores mais elevados no Inverno e Primavera podem indicar um efeito da evaporação nas fontes de água superficial. Durante o inverno os índices de umidade aumentam, aumentando a evapotranspiração nos ambientes. A evaporação deixa a água mais enriquecida em isótopos mais pesados, refletindo nos valores isotópicos da água (BOWEN et al., 2019). Esse padrão indica que na maioria dos locais amostrados as fontes de água para abastecimento são superficiais, confirmando os dados apontados pelo relatório Atlas da Água, publicado pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) (ANA, 2021).

A análise dos semivariogramas mostrou que há uma autocorrelação espacial dos valores isotópicos da água de torneira em Minas Gerais, tanto para  $\delta^{18}\text{O}$  (Figura 3A) quanto para  $\delta^2\text{H}$  (Figura 3B). O patamar (Sill) de ambos os semivariogramas alcançaram a variância dos dados, indicando uma boa representação dos modelos (Figura 3).

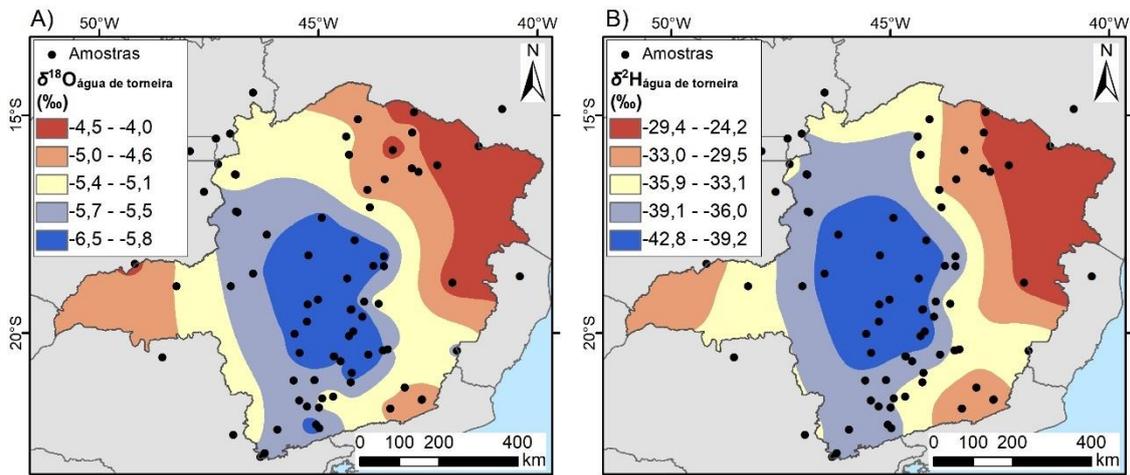
Figura 3 – Semivariogramas ajustados para os dados de  $\delta^{18}\text{O}$  (A) e  $\delta^2\text{H}$  (B) da água de torneira. A linha tracejada representa a variância dos dados.



Com a confirmação da autocorrelação espacial foi possível realizar a krigagem ordinária. A validação cruzada LOO da krigagem espacial mostrou um desempenho fraco de predição. Porém, ambos foram significativos (p-valor  $< 0,05$ ). Para  $\delta^{18}\text{O}$  o RMSE foi de 0.98 %, com um  $R^2$  de 0,10 (p-valor  $< 0,05$ ). Para o  $\delta^2\text{H}$ , o RMSE foi de 6.08, com um  $R^2$  de 0,13 (p-valor  $< 0,05$ ). O baixo desempenho das predições era esperado considerando a alta complexidade dos fatores que regem a distribuição espacial da água de torneira. O fato de ser significativo mostra o potencial do mapeamento dos isótopos da água de torneira em representar aspectos do ciclo hidrológico em escala regional.

Confirmando o que era esperado, o padrão espacial dos valores isotópicos da água de torneira são similares para os dois isótopo (Figura 4). O padrão espacial mostrou valores mais elevados de  $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta^2\text{H}$  da água de torneira nas porções norte e nordeste da área de estudos (Figura 4). Além disso, os menores valores estão concentrados nas áreas centrais de MG. Esse padrão espacial reflete padrões conhecidos para valores isotópicos da precipitação no Brasil (GASTMANS et al., 2017).

Figura 4 – Mapas de isótopos estáveis (Isoscapes) de  $\delta^{18}\text{O}$  (A) e  $\delta^2\text{H}$  (B) da água de torneira. Interpolação por krigagem ordinária geradas com base nos modelos de semivariogramas apresentados na Figura 3.



A distribuição isotópica da precipitação sofre a influência da continentalidade. Quanto maior é a circulação continental das massas de água na atmosfera, menores serão os valores isotópicos da precipitação (GASTMANS et al., 2017). A altitude também exerce uma influência nesse processo. Portanto, os valores menores nas regiões centrais podem indicar um sistema de abastecimento que depende das precipitações de grande circulação continental, como as chuvas causadas pelo Sistema de Convergência do Atlântico Sul. Indicam também uma influência da altitude causada pela Serra do Espinhaço.

As porções norte e nordeste de MG apresentaram os maiores valores, que podem indicar a fragilidade do sistema de abastecimento. Uma delas pode ser a grande influência da evaporação no fracionamento isotópico, que deixa os valores mais elevados em fontes de água superficial. Outra explicação pode ser a dependência de chuvas convectivas ou de massas de ar de procedência direta do Oceano Atlântico para abastecer os sistemas de abastecimento (GASTMANS et al., 2017).

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados apresentados neste estudo são preliminares e devem ser interpretados com cautela. As principais fragilidades estão na representatividade temporal e espacial das amostras e no baixo desempenho dos modelos de predição espacial. Por outro lado, o estudo evidencia o potencial pouco explorado do uso da água de torneira como uma variável integradora do ciclo hidrológico. A água da torneira é uma amostra facilmente coletada e apresenta uma fonte viável de informação sobre a variabilidade espacial isotópica. Estudos meteorológicos e hidrológicos regionais podem incorporar essas informações para responderem questões ou confirmarem hipóteses sobre as principais fontes de água de um sistema de abastecimento. Recomenda-se esforços futuros para reunir amostras espaciais e temporais mais representativas.

**Palavras-chave:** Isoscapes; isótopos estáveis, abastecimento de água, geoestatística.

## AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais - FAPEMIG pelos financiamentos de pesquisa no âmbito do Edital nº 001/2021 Universal (Processo APQ-02912-21) e do Edital nº 004/2023 - Centros de Tecnologia e Infraestrutura para Pesquisa na UEMG e UNIMONTES (Processo APQ-03759-23); e pelo apoio a participação coletiva em eventos de caráter técnico-científico no país com a Chamada nº 13-2023 (Processo PCE-00393-24). À todos os voluntários que participaram da coleta de água.

## REFERÊNCIAS

- ANA. **Atlas águas: segurança hídrica do abastecimento urbano**. Ed 2nd. 2021.  
Disponível em:  
<https://portal1.snirh.gov.br/ana/apps/storymaps/stories/1d27ae7adb7f4baeb224d5893cc2173>.
- BOWEN, G. J., CAI, Z., FIORELLA, R. P., & PUTMAN, A. L. Isotopes in the water cycle: Regional- to global-scale patterns and applications. **Annual Review of Earth and Planetary Sciences**, v. 47, p. 453–479, 2019.

BOWEN, G. J., EHLERINGER, J. R., CHESSON, L. A., STANGE, E., & CERLING, T. E. Stable isotope ratios of tap water in the contiguous United States. **Water Resources Research**, v. 43, p. 1–12, 2007.

GASTMANS, D., SANTOS, V., GALHARDI, J. A., GROMBONI, J. F., BATISTA, L. V., MIOTLINSKI, K., CHANG, H. K., & GOVONE, J. S. Controls over spatial and seasonal variations on isotopic composition of the precipitation along the central and eastern portion of Brazil. **Isotopes in Environmental and Health Studies**, v. 53, p. 518–538. 2017.

GIBSON, J. J. & REID, R. Stable isotope fingerprint of open-water evaporation losses and effective drainage area fluctuations in a subarctic shield watershed. **Journal of Hydrology**, v. 381, P. 142-150, 2010.

GOOD, S. P., KENNEDY, C. D., STALKER, J. C., CHESSON, L. A., VALENZUELA, L. O., BEASLEY, M. M., EHLERINGER, J. R., & BOWEN, G. J. Patterns of local and nonlocal water resource use across the western U.S. determined via stable isotope intercomparisons. **Water Resources Research**, v. 50, p. 8034–8049, 2014.

R Core Team (2023). R: A Language and Environment for Statistical Computing. **R Foundation for Statistical Computing**. Vienna. Austria. Disponível em: <https://www.R-project.org/>.

WANG, S., ZHANG, M., BOWEN, G. J., LIU, X., DU, M., CHEN, F., QIU, X., WANG, L., CHE, Y., & ZHAO, G. Water Source Signatures in the Spatial and Seasonal Isotope Variation of Chinese Tap Waters. **Water Resources Research**, v. 54, p. 9131–9143. 2018.

WEST, A. G., FEBRUARY, E. C., & BOWEN, G. J. (2014). Spatial analysis of hydrogen and oxygen stable isotopes (“isoscapes”) in ground water and tap water across South Africa. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 145, p. 213–222, 2014.