

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

A TURBIDEZ DAS ÁGUAS TRATADAS COMO FATOR DE RISCO DE DOENÇAS DIARREICAS AGUDAS (DDAs) NO DISTRITO SEDE DE MARIANA-MG

Gabrielle Totti Nepomuceno¹; Isabel Francisco de Araújo Reis²; Aníbal da Fonseca Santiago³

Abstract: The municipality of Mariana faces challenges related to its water supply systems, which include the collection and mixing of surface water with groundwater, the use of simple disinfection systems, and the distribution of raw water to the population either directly or mixed with treated water. This context favors the emergence of Acute Diarrheal Diseases (ADD), important indicators of environmental quality. In 2023, Mariana stood out negatively among municipalities of the same size in the state of Minas Gerais, ranking second in the number of ADD cases. Given this scenario, it is essential to conduct a study that assesses the influence of turbidity on ADD cases in the municipality. Turbidity is a parameter widely used as an indirect indicator of microbiological contamination and failures in water treatment processes, and is therefore an essential tool for monitoring water quality. To this end, an ecological study was conducted, relating the turbidity values of water treated in full-cycle Water Treatment Plants (WTPs) to the number of cases of DDA recorded in patient records of the Unified Health System (SUS) in 2023. Under the conditions of the model—a negative binomial regression model with a logarithmic link and adjustment without the inclusion of offset—the study showed that for each unit increase in water turbidity, the expected number of cases of DDA increases by 55.3%.

Resumo: O município de Mariana apresenta desafios relacionados aos seus sistemas de abastecimento de água, que incluem a captação e mistura de água superficial com água subterrânea, o uso de sistemas com desinfecção simples e a distribuição de água bruta para a população de forma direta ou misturada com a água tratada. Esse contexto favorece o surgimento de Doenças Diarreicas Agudas (DDAs), importantes indicadores da qualidade ambiental. Em 2023, Mariana se destacou negativamente entre os municípios de mesmo porte no estado de Minas Gerais, ocupando a segunda posição em número de casos de DDA. Diante desse cenário, torna-se fundamental realizar um estudo que avalie a influência da turbidez nos casos de DDA no município. A turbidez é um parâmetro amplamente utilizado como indicador indireto de contaminação microbiológica e de falhas nos processos de tratamento da água, sendo, portanto, uma ferramenta essencial para a vigilância da qualidade da água. Para isso, foi realizado um estudo ecológico, relacionando os valores de turbidez da água tratada em Estações de Tratamento de Água (ETAs) de ciclo completo com o número de casos de DDA registrados em prontuários de pacientes do Sistema Único de Saúde (SUS) no ano de 2023. Nas condições do modelo - modelo de regressão binomial negativo

¹) **Gabrielle Totti Nepomuceno:** Graduada em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP).

²) **Isabel Francisco de Araújo Reis:** Bacharela e Licenciada em Ciências Biológicas (UFOP) e mestre em Sustentabilidade Socioeconômica Ambiental (UFOP). Bióloga do Serviço Autônomo de Água e Esgoto de Mariana (SAAE/Mariana), Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Escola de Minas (UFOP).

³) **Aníbal da Fonseca Santiago:** Doutor em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Viçosa (UFV). Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP).

com link logarítmico e ajuste sem a inclusão de offset, o estudo demonstrou que, a cada aumento de uma unidade na turbidez da água, o número esperado de casos de DDA aumenta em 55,3%.

Palavras-Chave: sistemas de abastecimento; avaliação de risco; casos de DDA.

INTRODUÇÃO

Partículas suspensas na água são responsáveis pelo aumento da turbidez e constituem em uma ampla variedade de substâncias biológicas e inorgânicas, incluindo águas residuais provenientes da falta de esgotamento sanitário, partículas organominerais oriundas do escoamento superficial, algas e precipitados de calcário. Essas partículas podem continuar presentes nas águas de abastecimento mesmo após passarem por tratamento e atuarem como vetores para patógenos associados às Doenças Diarreicas Agudas (DDAs) (Beaudeau, 2014). As DDAs são doenças infecciosas gastrointestinais que se caracterizam pela ocorrência de no mínimo três episódios de diarreia aguda no período de 24 horas, podendo ocorrer náusea, vômito, febre e dor abdominal (Brasil, 2024).

Surtos de DDAs podem estar associados a diferentes fatores de risco. A turbidez pode ser considerada um desses fatores, pois é um importante indicador da remoção de patógenos em processos de filtração em Estações de Tratamento de Água (ETAs). Assim, para avaliação da eficiência de remoção de protozoários, torna-se necessário o uso de indicadores de remoção de partículas, como a turbidez, pois em faixas de turbidez menores que 0,3 uT, o tratamento em ciclo completo remove 3log (99,7%) de *Giardia*, sendo 0,5 log na decantação e 2 log na filtração (Oliveira; Bastos; Silva, 2018). Nessa mesma faixa de turbidez, o tratamento de ciclo completo remove 3 log (99,9%) de *Cryptosporidium*, sendo 0,5 log de *Cryptosporidium* na decantação e 2,5 log na filtração (Oliveira; Bastos; Silva, 2018).

A turbidez elevada pode atuar como um indicador indireto da presença de patógenos resistentes à cloração, como o *Cryptosporidium*, reforçando a importância do monitoramento rigoroso desse parâmetro como uma medida preventiva fundamental para evitar surtos de origem hídrica. No surto de criptosporidiose ocorrido em Milwaukee em 1993, observou-se uma associação direta entre o aumento acentuado da turbidez da água tratada e a presença de oocistos de *Cryptosporidium*, sendo estimado que 403.000 pessoas tiveram diarreia aquosa nesse surto (Mac Kenzie *et al.*, 1994). Associação significativa foi associada ao aumento de turbidez e a maior incidência de DDA, possivelmente devido à presença de partículas que servem como abrigo para microrganismos resistentes aos processos convencionais de tratamento (Muio *et al.*, 2020).

Entre os municípios de Minas Gerais, Mariana se destacou por apresentar grande número de casos de DDA, se comparado a média brasileira para o mesmo ano. Diante desse cenário e das peculiaridades do Sistema de Abastecimento de Água (SAA) do município, o presente estudo teve o objetivo de avaliar a influência que alterações de turbidez possuem no número de casos de DDA dos sistemas de tratamento de ciclo completo, do município de Mariana, MG. Todas as etapas do estudo seguiram os princípios éticos em pesquisa, tendo sido previamente aprovadas pelo Comitê de Ética em Pesquisa da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), sob o número de protocolo CAAE: 80122524.7000.5150.

MATERIAIS E MÉTODOS

Área de estudo

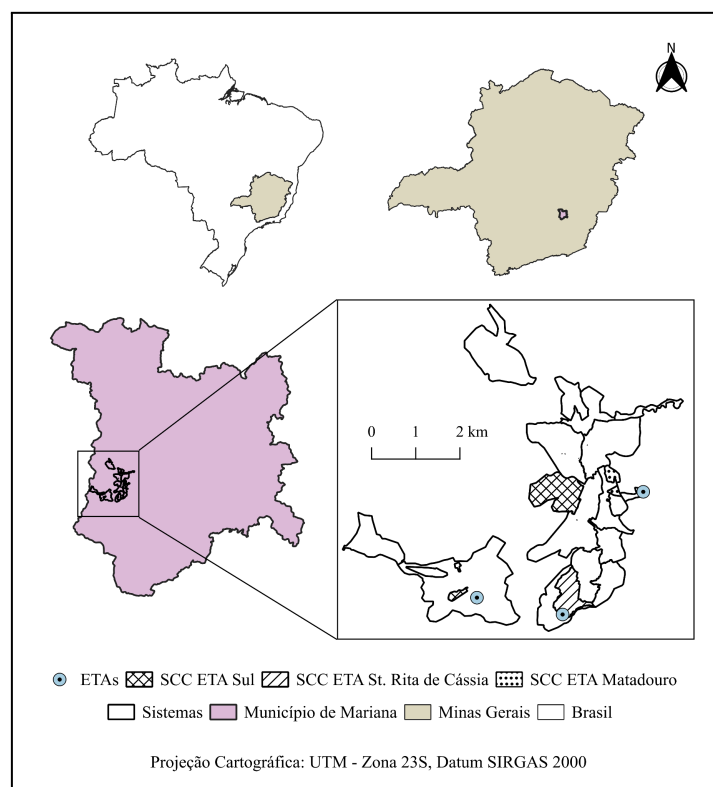
Mariana é um município da microrregião Ouro Preto situado no Estado de Minas Gerais, Brasil. Com uma população de 61.387 habitantes (IBGE, 2022), Mariana conta com Sistemas de Abastecimento de Água (SAAs) que realizam o tratamento por meio de Estações de Tratamento de Água (ETAs) de ciclo completo ou por meio da desinfecção simples. As fontes de captação desses sistemas são de água superficial e subterrânea. O município apresenta ainda uma parte da população abastecida por água bruta e por sistemas onde ocorre a mistura de água proveniente de diferentes tipos de tratamento, fontes superficiais ou subterrâneas e água bruta.

Além dessas características, Mariana se destacou entre os municípios da microrregião de Ouro Preto por apresentar no ano de 2023 o maior número de notificações de DDA. Entre os seis municípios de porte semelhante do Estado de Minas Gerais, se destacou, por apresentar grande número de casos de DDA, perdendo apenas para o município de Formiga. No ano de 2023, o município apresentou aproximadamente 5.000 casos por 100.000 habitantes. O Brasil, apresentou nesse mesmo período, cerca de 3.000 casos de DDA a cada 100.000 habitantes (Brasil, 2024).

Diante desse cenário epidemiológico e das peculiaridades do Sistema de Abastecimento de Água (SAA) do município, considera-se relevante desenvolver a presente pesquisa, que visa avaliar a influência da turbidez da água tratada dos SAAs de ciclo completo no número de casos de DDA.

Na FIGURA 1 são apresentados os SAAs do distrito sede e em destaque estão as áreas atendidas pelos três sistemas de ciclo completo - Sistema de Ciclo Completo ETA Santa Rita de Cássia (SCC ETA Santa Rita de Cássia); Sistema de Ciclo Completo ETA Sul (SCC ETA Sul); Sistema de Ciclo Completo ETA Matadouro (SCC ETA Matadouro) e suas respectivas Estações de Tratamento de Água (ETAs).

Figura 1 - Mapa de Localização da Área de Estudo.



Coleta dos dados de saúde

No estudo foram avaliados 4313 prontuários impressos de pacientes que apresentavam sintomas de DDA e procuraram o atendimento no serviço de saúde, no ano de 2023, sendo 252 de pacientes residentes em distritos rurais e 4.061 no distrito sede. Desses, 785 residiam na área que recebia água tratada por ciclo completo. O SCC Santa Rita de Cássia apresentou 344 casos, sendo que a população abastecida por esse sistema é de 4287. O SCC ETA Sul, teve 393 casos, sendo que a população abastecida é de 4489 pessoas e o SCC Matadouro apresentou 48 casos e uma população abastecida de 1281. A coleta de dados ocorreu semanalmente, entre setembro e dezembro de 2024, no setor de vigilância epidemiológica da Secretaria Municipal de Saúde de Mariana, MG, Brasil, com avaliação individual dos prontuários. Após a coleta dos dados dos pacientes, seus endereços foram georreferenciados e posteriormente identificados na área do município onde ocorre o tratamento por ciclo completo. Posteriormente, foi construído um mapa de calor com o objetivo de assegurar o sigilo dos dados dos casos georreferenciados dos pacientes. Para isso, foi aplicada a estimativa de densidade Kernel à camada vetorial de pontos dos casos, sendo o resultado mapeado no software QGIS. Foram estabelecidos como parâmetros de processamento a função de estimativa de intensidade quártica, o tamanho do pixel igual a 2 e o tamanho do raio igual a 300 m.

Coleta dos dados de qualidade da água

Foram coletadas as médias diárias de turbidez dos três SAAs de ciclo completo por meio do sistema Gestcom (ETA Web) utilizado pelo Serviço Autônomo de Água e Esgoto de Mariana. Esse sistema reúne os registros diários de parâmetros físicos, químicos e biológicos monitorados nas estações de tratamento. A turbidez da água é medida na água bruta, na água pós-filtração e na água tratada pós desinfecção. No estudo foi considerada a turbidez da água tratada pós desinfecção. A determinação da turbidez seguiu o método nefelométrico descrito no método 2130 B (APHA, 2017), sendo que os ensaios ocorriam a cada duas horas. Após a realização dos ensaios, os resultados da turbidez são registrados no sistema ETA WEB que calcula automaticamente as médias diárias. Esses dados foram integrados à planilha das notificações de DDA, permitindo a visualização conjunta dos valores das três ETAs em uma única coluna.

Análise estatística dos dados

Foi realizado um estudo ecológico para avaliar os impactos que a turbidez da água tratada em estações de tratamento de ciclo completo possuem no número de casos de DDA. Nesse contexto, o conjunto de dados analisados consistiu no número diário de casos de DDA registrados em pessoas que ingerem água de sistemas de ciclo completo (variável dependente) e as médias diárias dos ensaios de turbidez que são realizadas a cada duas horas (variável independente). Inicialmente foi testada a hipótese de equidispersão dos dados por meio do cálculo da média e da variância do número de casos de DDA de pacientes que são abastecidos com água tratada por ciclo completo por meio do software R. Detectada a superdispersão procedeu-se a aplicação do modelo binomial negativo. O modelo de regressão binomial negativo com link logarítmico foi utilizado para analisar o número de casos de DDA em função da turbidez da água, sem a inclusão de offset, pois a análise focou no número absoluto de casos. Esse modelo é adequado para dados de contagem com superdispersão, ou seja, quando a variância dos dados é maior que a média, como é comum em dados epidemiológicos (Molla; Muniswamy, 2012). A estrutura log-linear do modelo relaciona o logaritmo natural do valor esperado dos casos à turbidez da água, permitindo interpretar o coeficiente estimado como um efeito multiplicativo sobre a taxa esperada de casos. Assim, a

exponenciação do coeficiente fornece a razão de taxas (*incidence rate ratio* – IRR), que indica o fator de aumento esperado no número de casos para cada unidade adicional de turbidez, conforme descrito por Johnson *et al.* (2021).

Para conhecer o risco do aumento da turbidez nos casos de DDA foi calculado o risco, ou seja, a razão de taxas ou *rate ratio*, também chamada de *incidence rate ratio* (IRR). O modelo está representado na Equação 1.

$$\log(\mu_i) = \beta_0 + \beta_1 \times \text{turbidez}_i \quad (1)$$

Onde:

μ_i é o valor esperado do número de casos para a observação i (ou seja, $E[\text{casos}_i]$)

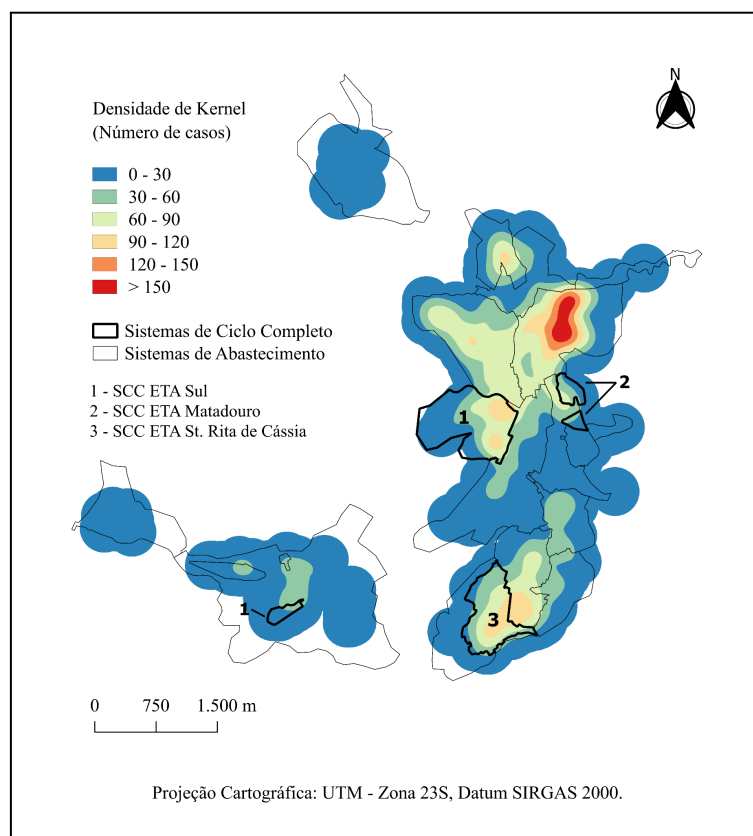
β_0 é o intercepto (estimado no seu modelo: -0,54562)

β_1 é o coeficiente da variável turbidez (estimado 0,44016)

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A FIGURA 2 mostra o mapa de calor de Kernel que representa a densidade de DDAs nos sistemas de ciclo completo do município de Mariana.

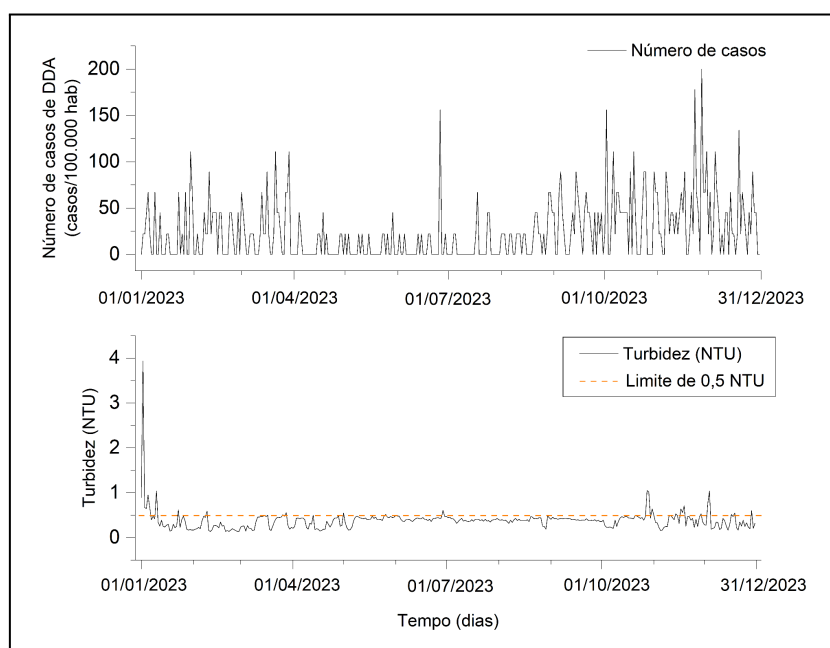
Figura 2 - Mapa de calor de Kernel



O mapa de calor foi categorizado em seis classes de densidade de casos de DDA: 0–30, 30–60, 60–90, 90–120, 120–150 e >150 casos. A partir da análise espacial, foi possível identificar três áreas com maior concentração de casos. A principal área é representada por uma mancha na cor vermelha, correspondente à densidade superior a 150 casos, localizada na porção norte, onde a água de abastecimento não é tratada por tratamento de ciclo completo. Além disso, foram identificadas duas manchas com densidade entre 90 e 120 casos, situadas nas áreas de abrangência dos SCC ETA Sul e SCC ETA Santa Rita de Cássia.

A FIGURA 3 mostra o número de casos de DDA por 100.000 habitantes e a turbidez no SCC ETA Sul.

Figura 3 - Número de casos de DDA por 100.000 habitantes e variações de turbidez no SCC ETA Sul.

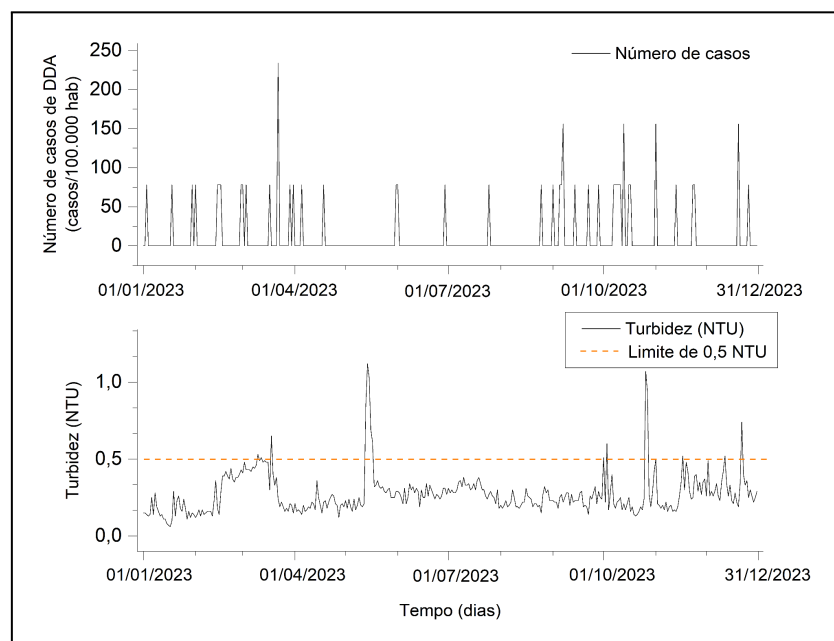


A FIGURA 3 demonstra que durante grande parte do período de estiagem (abril a agosto), a incidência de DDA no SCC ETA Sul foi, em geral, reduzida. A principal exceção ocorreu no mês de junho, quando se observou um pico pontual de 150 casos em um dos dias analisados, e no mês de setembro, em que a incidência passou de aproximadamente 50 para 100 ao final do mês. Nos meses de janeiro a março, os valores oscilaram entre aproximadamente 25 e 125 casos por 100.000 habitantes. Entre setembro e dezembro, a taxa de incidência variou entre 75 e 200 casos por 100.000 habitantes.

Observa-se também, que os valores de turbidez no SCC ETA Sul não ultrapassaram o limite de 5 NTU estabelecido pela Portaria GM/MS nº 888/2021. No entanto, em alguns momentos, os valores ultrapassaram o limite de 0,5 NTU recomendado por BASTOS *et al* (2013) para assegurar a eficácia na remoção de *Cryptosporidium* e garantir a segurança microbiológica da água. O maior pico de turbidez foi observado em janeiro, atingindo aproximadamente 4 NTU. Entre os meses de fevereiro e novembro, os valores mantiveram-se predominantemente inferiores a 0,5 NTU, com tendência de elevação a partir de novembro, alcançando valores próximos a 1 NTU. Esses dados reforçam a relação entre o aumento da turbidez da água nos períodos chuvosos e a elevação da ocorrência de DDA.

A FIGURA 4 mostra a incidência de DDA e as variações de turbidez no SCC ETA Matadouro no ano de 2023.

Figura 4 - Número de casos de DDA por 100.000 habitantes e variações de turbidez no SCC ETA Matadouro.

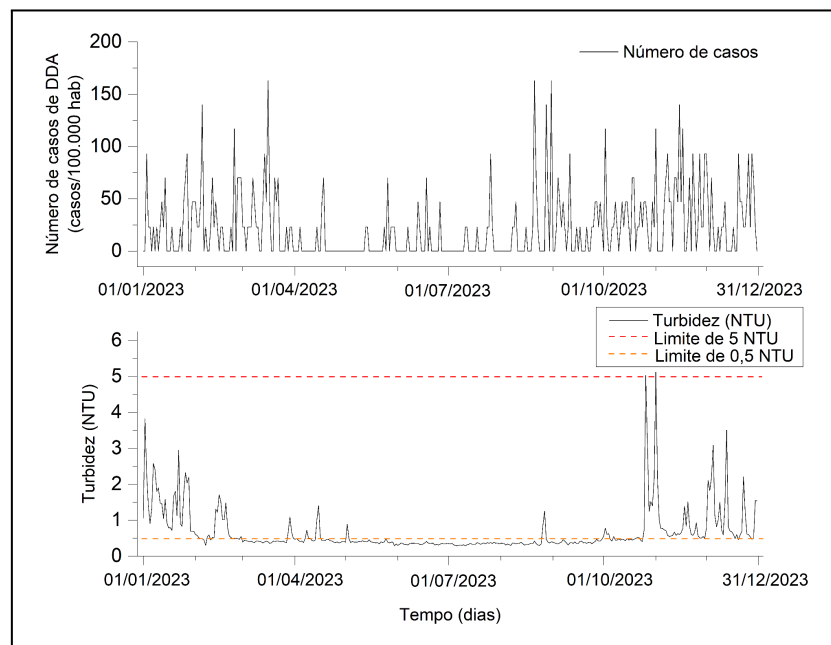


Ao analisar o gráfico de turbidez, percebe-se que a maioria dos valores estão dentro do limite de recomendados de 0,5 NTU recomendado por Bastos *et al* (2018), com exceções nos meses de maio e novembro, que obtiveram valores maiores que 1 NTU. Entre os 365 valores de turbidez avaliados, 31 estão na faixa de 0,11 – 0,15, 232 na faixa de 0,16 – 0,30, 83 na faixa de 0,31 – 0,50, e 19 acima de 0,5.

A FIGURA 4 mostra uma tendência geral de estabilidade na incidência ao longo do ano, com valores próximos de 75 casos por 100.000 habitantes. Destacam-se, entretanto, cinco episódios de elevação expressiva: um pico em março, com aproximadamente 225 casos/100.000 habitantes, e outros quatro picos nos meses de setembro, outubro e dezembro, com valores próximos a 150 casos/100.000 habitantes. Durante o período de estiagem (abril a setembro), observou-se uma redução das notificações, com valores abaixo de 75 casos/100.000 habitantes, e em sua maioria próximos ou iguais a zero.

A FIGURA 5 mostra a incidência de DDA por 100.000 habitantes e os resultados de turbidez do SCC ETA Santa Rita de Cássia ocorridos no ano de 2023.

Figura 5 - Número de casos de DDA por 100.000 habitantes e variações de turbidez no SCC ETA Santa Rita de Cássia.



A FIGURA 5 mostra que nos meses chuvosos ocorreu maior incidência de DDA no SCC ETA Santa Rita de Cássia. Os meses de janeiro a março, e de setembro a dezembro, apresentaram valores acima de 70 casos/100.000 habitantes, chegando a 160 casos/100.000 habitantes em algumas datas específicas. Os meses de estiagem, com exceção do mês de setembro, apresentaram valores menores que 70 casos/100.000 habitantes, chegando a valores de incidência iguais a zero.

Picos de turbidez podem ser observados na FIGURA 5, com cerca de 128 médias diárias de turbidez acima do limite de 0,5 NTU, conforme recomendado por Bastos *et al.* (2018), o que pode representar um risco à segurança da água. Esse sistema foi o que apresentou o maior número de valores de turbidez acima do recomendado pela literatura. Dos 365 valores avaliados, 10 encontram-se na faixa de 0,16–0,30 NTU, 227 na faixa de 0,31–0,50 NTU e 128 acima de 0,5 NTU. Na TABELA 1 são apresentados os resultados do modelo de regressão binomial negativo.

Tabela 1 - Resultados da regressão binomial

Variável	Coef. (β)	Erro Padrão	IC 95% Inferior (β)	IC 95% Superior (β)	Valor p	IRR	IC 95% Inferior (IRR)	IC 95% Superior (IRR)
Intercepto	-0,546	0,0737	-0,69	-0,401	< 0,001 *	0,579	0,502	0,669
Turbidez	0,44	0,1069	0,23	0,65	< 0,001 *	1,553	1,259	1,915

O modelo apresentado na TABELA 1 revelou associação estatisticamente significativa entre a turbidez da água e a incidência de DDA. Esse resultado está em conformidade com os achados de Muoio *et al.* (2020) que encontrou associação significativa entre a turbidez e os casos de DDA. Em sua pesquisa, a variação da turbidez ocorrida na água tratada durante o período monitorado

demonstrou um risco incremental, em comparação ao valor basal, de 9% a 27% nas três ETAs localizadas na Toscana, Itália.

No estudo, a cada aumento de uma unidade na turbidez, o número de casos de DDA aumentou em média 55,3% (IRR = 1,553; IC95%: 1,259 – 1,915; $p < 0,001$). Isso indica que a cada aumento de 1 unidade na turbidez da água, o número esperado de casos de DDA aumenta em 55,3%. Isso significa que um aumento de 1 NTU para 2 NTU na turbidez da água resulta num aumento esperado de aproximadamente 0,5 casos de DDA nesse cenário. Esse achado reforça o papel da turbidez como indicador de risco microbiológico à saúde pública.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste estudo, é proposto um procedimento para determinar o risco associado à turbidez da água tratada e a ocorrência de casos de DDA por dia. A abordagem utiliza séries temporais de dados coletados em três ETAs e o número de casos de DDA registrados no ano de 2023 no SUS. O risco associado à variação de 1 NTU de turbidez foi 1,553:IC95%: 1,259 – 1,915; $p < 0,001$, indicando que a cada aumento de 1 unidade na turbidez da água, o número esperado de casos de DDA aumenta em 55,3%. O risco foi avaliado utilizando o modelo de regressão binomial negativo.

Surto de DDA continuam ocorrendo em países de alta e baixa renda per capita, sendo a causa de mortes em todo o mundo. Assim, o procedimento apresentado na pesquisa que avaliou o impacto da turbidez da água no número de casos de DDA pode representar uma ferramenta útil para apoiar as decisões em sistemas de abastecimento de água.

AGRADECIMENTOS

O presente estudo foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e do Serviço Autônomo de Água e Esgoto de Mariana (SAAE/Mariana).

REFERÊNCIAS

APHA; AWWA; WEF. (2012). “Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater”. 22nd ed. Washington, D.C.: *American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation*.

BASTOS, R. K.X.; VIANA, D. B.; BELVILACQUA, P. D. (2013). “*Turbidity as a surrogate for Cryptosporidium removal by filtration in drinking-water QMRA models*”. *Water Science and Technology: Water Supply*. pp. 1209-1219.

BEAUDEAU, P.; SCHWARTZ, J.; LEVIN, R. (2014). “Drinking water quality and hospital admissions of elderly people for gastrointestinal illness in Eastern Massachusetts, 1998–2008”. *Water Research*, 52, pp. 188–198.

BRASIL. (2024). “Monitoramento das doenças diarreicas agudas”. *Ministério da Saúde*, Brasília, Distrito Federal.

JOHNSON, R. A.; CARLIN, J. B.; HOWE, L. D.; ORELLANA, L.; KRAMER, M. S. Making sense of some odd ratios: a tutorial and improvements to present practices in reporting and

visualizing quantities of interest for binary and count outcome models. *Statistics in Medicine*, v. 40, n. 20, p. 4563-4578, 10 set. 2021. DOI: 10.1002/sim.9145.

MAC KENZIE, W.R.; HOXIE, N.J.; PROCTOR, M.E.; GRADUS, M.S.; BLAIR, K.A.; PETERSON, D.E.; KAZMIERCZAK, J.J.; ADDISS, D.G.; FOX, K.R.; ROSE, J.B.; DAVIS, J.P. (1994). "A massive outbreak in Milwaukee of *Cryptosporidium* infection transmitted through the public water supply". *New England Journal of Medicine*, 331, pp. 161-167.

MAZUREK, L.; MIGUEL, C.B.; NETO, H.P.P.; ARAUJO, E.H.V.; ABREU, M.C.M.; NETO, J.M.; SILVA, G.P.; CARDOSO, M.S.; SOARES, S.C.; GÓES-NETO, A.; OLIVEIRA, C.J.F.; RODRIGUES, W.F. (2025). "Impact of transitioning to treated water on diarrhea reduction: A cross-sectional and ecological study in Southwestern Goiás, Brazil". *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 22(3), p. 436.

MOLLA, D.T.; B. MUNISWAMY. "Power of tests for negative binomial regression coefficients in count data". *Int J Mathe Archive*, v. 3, n. 8, 2012.

MUOIO, R.; et al. (2020). "Water safety plans and risk assessment: A novel procedure applied to treated water turbidity and gastrointestinal diseases". *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 223(1), pp. 281-288.

OLIVEIRA, K.C.; BASTOS, R.K.X.; SILVA, C.V. (2018). "Esporos de bactérias aeróbias são bons indicadores da eficiência do tratamento de água? Um estudo exploratório". *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 23, pp. 1103-1109.

VIEIRA, J.M.P. (2018). "*Água e Saúde Pública*". 1. ed. Lisboa: Edições Sílabo. 459 p.