

Artigo Técnico

Avaliação de fatores intervenientes no desempenho de estações de tratamento de água

Evaluation intervening factors in the performance of water treatment plants

Mariângela Dutra de Oliveira^{1*} , Dejaneyne Paiva Zamprogno Bianchi¹ ,
Juliana Freitas Ramos da Fonseca¹ , Nestor Alcides Gorza Júnior² , Marcelo Libânio³ 

RESUMO

O objetivo do trabalho consistiu em avaliar a influência da sazonalidade, da eventual sobrecarga hidráulica, do porte, do custo e da idade no desempenho de estações convencionais de tratamento de água pela análise de confiabilidade como ferramenta de avaliação. Para tal, empregaram-se dados operacionais do efluente de 20 estações operadas pelo mesmo prestador referentes ao período 2009-2014. As análises estatísticas mostraram que o desempenho, em termos de turbidez do efluente, elevou-se no período de estiagem em relação ao chuvoso e nas unidades de pequeno porte avaliadas. No mesmo contexto, a quase totalidade das estações submetidas à sobrecarga hidráulica apresentou desempenho inferior. A determinação da faixa de turbidez requerida na saída da estação, pela análise de confiabilidade, mostrou-se importante ferramenta de gestão permitindo hierarquizar ações de melhorias nos sistemas. Não se verificou correlação entre o nível de confiabilidade e o custo do tratamento e a idade da estação.

Palavras-chave: avaliação de desempenho; análise de confiabilidade; tratamento de água.

ABSTRACT

The objective of this work was to evaluate the influence of seasonality, possible hydraulic overload, size, cost, and age of the station in the performance of conventional water treatment stations based on reliability analysis as an evaluation tool. For this purpose, operational data of the effluent from 20 stations operated by the same provider for the 2009-2014 period were used. Statistical analyses showed that the performance was increased in the dry season compared to the rainy one and in the small units evaluated. In the same scenario, almost all the stations submitted to hydraulic overload exhibit inferior performance. The determination of turbidity range required at the exit of the station, through the reliability analysis, proved to be an important management tool, allowing to hierarchize improvement actions in the systems. In addition, there was no correlation between the level of reliability and the treatment cost and the age of the station.

Keywords: performance evaluation; reliability analysis; water treatment.

INTRODUÇÃO

Avaliação de desempenho de estações de tratamento de água

Diversos fatores intervêm no desempenho das estações de tratamento de água, destacando-se as características da água bruta, os parâmetros hidráulicos relacionados aos processos e às operações unitárias inerentes à potabilização, a acurácia da operação e as metas de qualidade da água tratada. Falhas no tratamento podem expor a comunidade a riscos à saúde, por meio das doenças intestinais e outras de veiculação hídrica.

Entre os fatores mencionados no desempenho das estações, as características da água bruta ocupam posição de relevo na qualidade do efluente tratado. Embora seja difícil estabelecer hierarquias absolutas acerca dos parâmetros de

qualidade das águas naturais para fins de tratabilidade, *E. coli*, cor verdadeira, concentração (ou densidade) de cianobactérias e turbidez têm sido aludidos como os mais relevantes para mananciais com baixas concentrações de pesticidas e metais-traço (OLIVEIRA *et al.*, 2019). Em países tropicais, onde se verificam baixos níveis de coleta e tratamento de esgotos, a definição da tecnologia de potabilização comumente fia-se na magnitude da turbidez e da cor verdadeira (Cunha; SABOGAL-PAZ; DODDS, 2016).

Para o adequado desempenho, três características da estação de tratamento fazem-se necessárias: robustez, resiliência e confiabilidade. A primeira pode ser definida como a capacidade de a estação manter a produção de água tratada com qualidade estável, independentemente das variações que possam ocorrer nas características da água bruta. Essa característica explica — e em muitos cenários justifica — a prevalência da tecnologia convencional de potabilização

¹Instituto Federal do Espírito Santo - Vitória (ES), Brasil.

²Companhia Espírito Santo de Saneamento - Vitória (ES), Brasil.

³Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais - Belo Horizonte (MG), Brasil.

*Autora correspondente: mariangeladutra@ifes.edu.br

Conflitos de interesse: os autores declaram não haver conflito de interesses.

Financiamento: nenhum.

Recebido: 25/11/2018 - **Aceito:** 30/06/2020 - **Reg. ABES:** 20180203

no Brasil e no mundo. Já a resiliência expressa a velocidade com que a estação retorna ao seu desempenho normal após algum distúrbio, geralmente causado pela deterioração da qualidade da água bruta ou por problemas operacionais, por exemplo, interrupção da adição de coagulante. Por fim, a confiabilidade — na qual o cerne do artigo se insere — avalia a probabilidade de a estação atender às metas de qualidade em determinado período de tempo, metas impostas pela legislação vigente ou definidas pelo próprio prestador de serviço de abastecimento de água (ZHANG *et al.*, 2012).

A conjunção dessas três características traduz-se usualmente na tecnologia convencional de potabilização — também denominada “ciclo completo”, dotada de unidades de mistura rápida, floculação, decantação (ou flotação), filtração e desinfecção —, a mais empregada nos países tropicais pela menor qualidade da água bruta durante o período chuvoso. No Brasil, cerca de 70% da população urbana (aproximadamente 124 milhões de pessoas) é abastecida por sistemas conectados a estações convencionais. Considerando os mananciais superficiais, estima-se esse percentual em 94% da população urbana abastecida por mais de 5.500 estações convencionais de tratamento de água (IBGE, 2015). Apenas a Companhia de Saneamento de Minas Gerais (Copasa) responde pela operação de algo como 592 unidades distribuídas em todo estado.

Esforços na avaliação de desempenho das estações comumente restringem-se ao percentual de amostras ou ao tempo de operação no qual o efluente atende aos limites estabelecidos pelo padrão de potabilidade. Em contexto mais amplo, estudo contemplou 75 estações de tratamento de água na Pennsylvania (EUA) operadas por distintos prestadores, utilizando dez anos de registros de turbidez efluente. Avaliaram-se a magnitude da população abastecida, o emprego e o tipo de coagulante, a taxa de filtração e o tipo de meio filtrante, o tipo de manancial, a tecnologia de tratamento e a idade da estação. O estudo estatístico apontou que 95% das médias anuais e dos valores máximos mensais de turbidez foram inferiores a 0,2 e 0,3 uT, respectivamente. As estações que não empregavam coagulantes apresentaram desempenho inferior, contudo a eficiência da coagulação independeu do tipo de sal empregado e da turbidez da água bruta. Em relação ao tipo de manancial, as estações, cuja água bruta era captada de rios, obtiveram significativamente melhor desempenho quando comparadas às unidades com afluentes de fontes e reservatórios, os últimos de turbidez mais baixa e menos susceptíveis às variações sazonais dessa característica. Para a magnitude da população abastecida e a idade das estações, unidades que atendiam às pequenas comunidades, população inferior a 3.300 habitantes, apresentaram desempenho inferior quando comparadas àquelas destinadas a cidades de maior porte, com população superior a 100 mil habitantes. Todavia, estações que abasteciam populações nos intervalos de 3.300–10.000 e 10.001–100.000 habitantes tiveram desempenho praticamente idêntico. Os demais fatores avaliados — idade da estação, tecnologia de tratamento, tipo de meio filtrante e taxa de filtração — não foram estatisticamente significativos. Por fim, concluiu-se que os fatores usualmente considerados mais relevantes no desempenho adquirem igual relevância quando comparados a fatores intangíveis, tais como a adequada operação das unidades inseridas na análise (Lusardi; Consonery, 1999).

Em relação à influência da sazonalidade na qualidade da água tratada, pesquisa contemplou seis estações de diferentes portes e tecnologias de tratamento localizadas na Região Centro-Oeste do Brasil, operadas pelo mesmo prestador, distribuídas em uma área de 5.800 km² de precipitação anual média de 1.750 mm. Duas das estações avaliadas vinculavam-se a captações em

reservatórios de acumulação, usualmente menos susceptíveis às variações das características da água dadas as precipitações. Nenhuma das estações apresentou melhor desempenho no período chuvoso em relação ao de estiagem, evidenciando a relevância da qualidade do afluente. No mesmo contexto, não se verificou melhor qualidade da água filtrada nas duas estações de maior porte — vazões médias de 4.400 e 1.750 L.s⁻¹ — em relação às duas de menor porte (idem de 32 e 33 L.s⁻¹) (MELO *et al.*, 2016).

Em realidade dispar em relação ao Brasil e principalmente aos países desenvolvidos, Birhane, Hishe e Tenagshaw (2019) também avaliaram a influência da sazonalidade no desempenho de uma estação convencional de tratamento de água na cidade de Gambella no interior da Etiópia (vazão afluente da ordem de 116 L.s⁻¹). Os resultados indicaram que cor, turbidez, sólidos dissolvidos e *E. coli* estavam em desconformidade com o padrão de potabilidade da Organização Mundial da Saúde (WHO, 2011) no período seco, e, no período chuvoso, a esses parâmetros era acrescido o alumínio. Os autores observaram ainda eficiência geral da estação de 58 e 48% para os períodos seco e chuvoso, respectivamente, em termos de atendimento ao padrão de potabilidade. A disparidade confirma-se pela magnitude da turbidez da água tratada no período seco (~11 uT), elevando-se ainda mais no período chuvoso (~30 uT).

Trabalhos com abordagem mais restritiva vêm sendo desenvolvidos. Gupta e Shrivastava (2008) utilizaram análise determinística para definir parâmetros ótimos de projeto e análise de confiabilidade com base no atendimento aos padrões de sólidos suspensos na água filtrada. Concluíram que é possível obter um melhor nível de confiabilidade da estação quando o padrão de controle é mais flexível e que o custo do tratamento se eleva com o nível de confiabilidade almejado.

Além das características da água bruta, algumas especificidades da estação de tratamento podem impactar a qualidade do efluente. Alterações ao longo dos anos dos parâmetros de projeto adotados pelo prestador (p. ex., tempo de floculação, velocidade de sedimentação ou taxa de filtração) e o estado de conservação das unidades tornam compreensível eventual qualidade inferior do efluente de estações mais velhas. Em contrapartida, tais unidades são mais susceptíveis a ampliações dada principalmente a elevação da demanda.

Em semelhante vertente, o porte da estação — quase sempre associado ao porte da cidade que a abriga — eleva a possibilidade de operação mais acurada na perspectiva de que maiores recursos financeiros culminem, também, com maior nível de instrução dos profissionais envolvidos com a potabilização. Esse paradigma é explicitado pela Organização Mundial da Saúde (WHO, 2011), que alude à provável operação mais frágil de estações que abastecem população inferior a 10 mil habitantes.

Li *et al.* (2014) utilizaram análise multivariada de Monte Carlo para avaliar o desempenho de estação de tratamento de água em Ohio (EUA), com base em parâmetros de qualidade da água bruta e tratada. Os resultados indicaram risco de que a água tratada possa exceder os padrões de carbono orgânico total levando a possíveis violações na formação de subprodutos da desinfecção. Adaptações operacionais e uso de carvão ativado podem minimizar o risco, mas apresentam elevação do custo associado à potabilização.

Segundo Santana, Zhang e Mihelcic (2014), mudanças na qualidade da água bruta podem alterar a operação e o uso de energia utilizada na estação de tratamento. Estudo realizado na estação de Tampa (Flórida/EUA), vazão afluente da ordem de 2.980 L.s⁻¹, composta das etapas de coagulação, floculação, sedimentação, ozonização, carvão ativado biológico, filtração e desinfecção, visou avaliar o impacto da qualidade da água bruta no dispêndio de energia elétrica. Com

base nos dados de operação e utilizando métodos estatísticos, tais como correlação de Pearson e regressão linear, evidenciou-se que a alteração na qualidade da água bruta ocasionou aumento de 14,5% no consumo de energia associado, principalmente, à mudança na dosagem de produtos químicos e ao tratamento e à disposição do lodo e das águas de lavagem dos filtros.

Szpak e Thorzewska-Cieslak (2017) avaliaram o desempenho de estação de médio porte na Polónia abastecida por dois mananciais, vazão afluente de aproximadamente 200 L.s⁻¹ proveniente de manancial superficial e 4,0 L.s⁻¹ de manancial subterrâneo. O estudo realizou-se com base nos dados operacionais (tempo médio de operação livre de falhas, característica das unidades e qualidade da água bruta e tratada expressa pela turbidez) indicando que a proteção da água bruta, a automação, o monitoramento completo da estação e da qualidade da água e o plano de emergência são fundamentais para assegurar o nível de segurança e a confiabilidade de uma estação.

A avaliação do desempenho das estações comumente verifica-se sob dois prismas. O primeiro, mais reducionista, centra-se apenas no percentual de análises de qualidade da água tratada que atendam aos limites estabelecidos pelo prestador, por vezes mais rigorosos que o padrão de potabilidade vigente. Em segundo contexto, aliado à qualidade do efluente, insere-se o custo de potabilização, contemplando despesas com energia elétrica, produtos químicos e pessoal de operação.

Análise de confiabilidade

Conforme mencionado, no que tange à qualidade da água tratada, a avaliação de desempenho das estações de tratamento comumente realiza-se por meio do percentual de atendimento — em termos de número de amostras — aos requisitos do padrão de potabilidade vigente, como no mencionado estudo realizado na Pennsylvania. Especificamente para turbidez efluente, o padrão de potabilidade no Brasil apresentava metas progressivas a partir de 2013 para atendimento ao limite de 0,5 uT, atingindo em dezembro de 2014 mínimo de 75% das amostras de água tratada. A partir de 2016, esse percentual se elevou para 95% das amostras do efluente tratado, porcentagem mantida no último padrão de potabilidade (BRASIL, 2021).

Em cenário mais abrangente, a confiabilidade de uma estação pode ser definida como a probabilidade de se obter desempenho adequado, em período específico de tempo e sob determinadas condições. Em outras palavras, a confiabilidade consiste na probabilidade, por exemplo, de se obter água tratada com turbidez inferior a 0,5 uT ou cor aparente inferior a 15 uH ao longo de um ano de operação.

Com esse objetivo, Niku, Schroeder e Samaniego (1979) desenvolveram método baseado em análises probabilísticas relacionando a concentração média do constituinte com os valores limites a serem atendidos. Esse método tem sido muito utilizado para avaliar o desempenho de estações de tratamento de esgotos (NIKU *et al.*, 1981; NIKU; SCHROEDER; HAUGH, 1982; OLIVEIRA; VON SPERLING, 2008), mas pouco utilizado para estações de tratamento de água.

Alguns aspectos devem ser observados no emprego da análise de confiabilidade:

- O método é extremamente sensível à distribuição de probabilidades dos valores do parâmetro analisado, sendo mais adequado a dados que seguem a distribuição lognormal;
- Os resultados tendem a ser mais confiáveis quando as amostragens são realizadas com frequência regular e em intervalos relativamente curtos,

proporcionando número de dados que garanta a representatividade do processo. Dessa forma, é possível assumir que o percentual de amostras dentro do padrão é igual à fração do tempo em que a operação é satisfatória e, portanto, igual ao nível de confiabilidade para o aspecto avaliado.

Segundo Oliveira e Von Sperling (2008), valores de coeficiente de variação (CV) de 0,1 e 3,3 levam a um mesmo coeficiente de confiabilidade (CC). Na Figura 1, ilustra-se distribuição lognormal com cinco valores de CV que apresentam a mesma média aritmética. Ao diminuir o valor de CV, tem-se maior simetria na forma da distribuição e, ao se aumentar o CV, tem-se maior concentração de valores à esquerda (assimetria à direita). A melhor medida de tendência central para distribuições lognormal é a média geométrica, relativamente insensível a outliers em um conjunto de dados. Outra propriedade importante da distribuição lognormal é o fato de que a média aritmética é sempre maior que a mediana.

Para aplicar a análise de confiabilidade, faz-se necessária a determinação do CC que relaciona os limites estabelecidos para determinado parâmetro aos seus registros na água tratada por uma base probabilística. De posse do CC e do valor máximo estabelecido, por exemplo para turbidez efluente de 0,5 uT, é possível obter o valor médio para a água tratada de modo que atenda a meta durante certo tempo, mesmo com a variabilidade inerente à operação da estação. O valor médio requerido e o CC podem ser obtidos por meio das Equações 1 e 2, respectivamente.

$$X_{Avg} = CC \cdot X_{Max} \quad (1)$$

Na qual:

X_{Avg} = valor médio do parâmetro para água tratada;

X_{Max} = valor limite do parâmetro para a água tratada (meta do prestador ou padrão de qualidade).

$$CC = \sqrt{CV^2 + 1} \times \exp[-Z_{1-\alpha} \sqrt{\ln(CV^2 + 1)}] \quad (2)$$

Na qual:

CV = coeficiente de variação;

$Z_{(1-\alpha)}$ = variável normal central reduzida correspondente à probabilidade de não cumprimento da legislação.

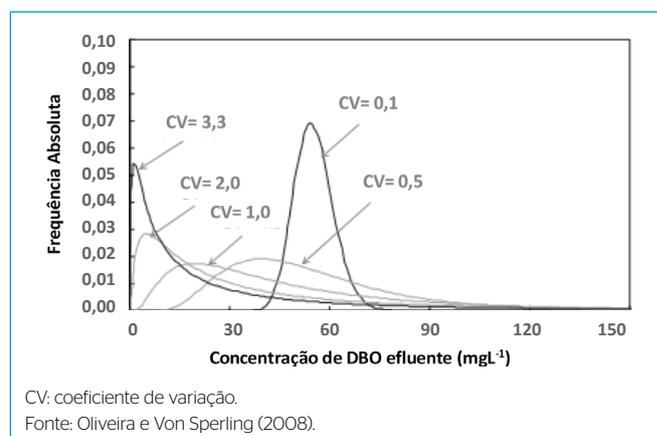


Figura 1 - Modelo de probabilidade lognormal mostrando diferenças na forma para uma média aritmética constante (55,2 mg/L) e variações de coeficiente de variação entre 0,1 e 3,3.

OBS.: De acordo com a probabilidade acumulada (confiabilidade), esse parâmetro assume os valores de 2,326 (99%), 1,645 (95%), 1,282 (90%), 0,842 (80%), 0,525 (70%), 0,253 (60%) e 0 (50%).

Exemplificando, para aplicar a análise de confiabilidade para uma estação cujos registros de turbidez do efluente ao longo de dois anos resultam em CV de 0,53, tem-se a Figura 2. Por meio das Equações 1 e 2, determinam-se os graus de confiabilidade em função das metas ou padrões a serem atingidos (0,1 uT, 0,3 uT ou 1,0 uT), sendo possível obter a turbidez média efluente desejada para o sistema. Assim, o nível de confiabilidade (porcentagem do tempo em que a meta é cumprida) e a turbidez média efluente a ser atingida são mostrados na Figura 2.

De acordo com a Figura 2, para que o padrão de 0,5 uT fosse atingido em 95% do tempo (meta em vigor a partir de dezembro de 2015), o efluente da estação deveria apresentar turbidez média de 0,26 uT. Dessa forma, considerando o histórico de desempenho da estação avaliada, a análise de confiabilidade possibilita definir o valor médio de determinado parâmetro que o efluente deve apresentar para atingir meta de qualidade estabelecida pela legislação ou agência reguladora, transcendendo simples avaliação de atendimento ao padrão de potabilidade.

A aplicação dessa ferramenta para estações com menor percentual de atendimento aos padrões de potabilidade — situação usual em países em desenvolvimento — fornece referência de desempenho a ser atingida pela concessionária do serviço de abastecimento de água. Em contrapartida, seu emprego torna-se menos relevante para estações com maior percentual de atendimento aos mesmos requisitos de qualidade do efluente.

Essa última premissa confirmou-se no estudo de Oliveira *et al.* (2014) no qual a análise de confiabilidade foi empregada na avaliação de estação de tratamento de filtração direta de grande porte ($\sim 4.400 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$) com captação em reservatório de acumulação. Consideraram-se 56 meses de registros da água tratada das médias diárias de turbidez (por turbidímetro de escoamento contínuo), cor aparente, pH e residuais de cloro, alumínio e flúor. Concluiu-se que, à exceção da turbidez, todas médias diárias observadas dos demais parâmetros apresentaram-se inferiores aos valores estimados para atendimento ao padrão de potabilidade, constituindo indicador da alta confiabilidade da estação.

Nesse cenário, o objetivo geral do trabalho consistiu em avaliar a influência da sazonalidade, da eventual sobrecarga hidráulica, do porte e da idade da estação aplicando a análise de confiabilidade como ferramenta de avaliação de desempenho. O espaço amostral abarcou 20 estações convencionais de tratamento de água operadas pelo mesmo prestador, localizadas na Região Sudeste

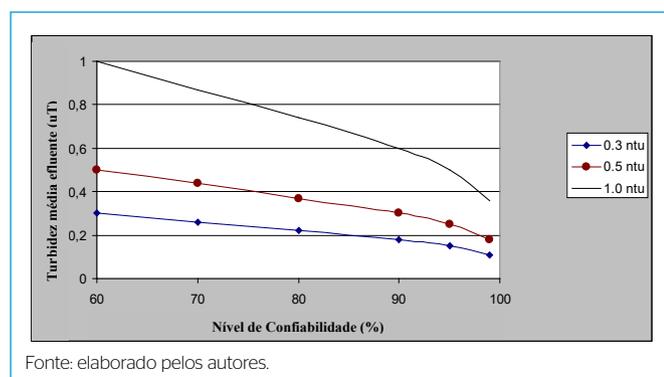


Figura 2 – Exemplo de valor médio de turbidez efluente em função do nível de confiabilidade para três metas de qualidade.

do Brasil, com diferentes características de água bruta, utilizando dados operacionais diários referentes predominantemente ao período de 2009 a 2014.

METODOLOGIA

Coleta e consolidação dos dados

Os dados secundários de água tratada originaram-se de 20 estações de tratamento que fornecem somatório de vazão média da ordem de $3,7 \text{ m}^3/\text{s}$, respondendo pelo abastecimento de 19 municípios distribuídos no mesmo estado do Brasil (área de $46,095 \text{ km}^2$) e de aproximadamente 1,8 milhão de pessoas (46% da população). Na cessão dos dados pela companhia estadual de saneamento, estabeleceu-se manutenção do sigilo para publicação.

As análises dos parâmetros avaliados realizaram-se de acordo com procedimentos padronizados (APHA; AWWA; WEF, 2005), utilizando-se na totalidade das estações equipamentos de bancada (para cor aparente colorímetro com disco comparador). Em nenhuma das estações amostradas empregava-se turbidímetro de escoamento contínuo, que tende a apresentar valores mais baixos para água filtrada quando comparado aos equipamentos de bancada (TEIXEIRA *et al.*, 2004). Cabe ainda ressaltar que os operadores das estações — responsáveis pela geração dos dados —, como funcionários da mesma companhia estadual de saneamento, receberam treinamento similar para realizar as análises e a calibração dos equipamentos. Tal constatação relacionada à origem dos dados favoreceu a comparação de desempenho entre as estações amostradas. A água bruta afluente às estações amostradas advinha de cursos d'água com captação direta e para apenas uma unidade de reservatório de acumulação.

Os dados foram submetidos à análise de consistência para identificar valores atípicos. As observações atípicas podem ser consideradas *outliers* ou dados inconsistentes. Esses dados são substancialmente diferentes do restante e sua ocorrência pode indicar características reais da população ou erros de medição ou de registro, que podem distorcer seriamente os resultados dos testes estatísticos. Por exemplo, registros de turbidez e cor aparente na água tratada superiores a 15 uT e 100 uH, respectivamente, foram excluídos do espaço amostral por inconsistência.

Análise estatística dos dados

Realizou-se a análise estatística dos dados contemplando: número de dados disponíveis, média, mediana, valores máximo e mínimo, percentis 10, 25, 75 e 90%, desvio padrão e CV. Adicionalmente, verificou-se a normalidade dos dados por meio da determinação dos coeficientes de assimetria e curtose. Por fim, para verificar a aderência dos dados à distribuição lognormal, aplicaram-se o teste χ^2 e o teste gráfico Normal Probability Plot por meio do *software* Statistica (STATSOFT, 2007; LEVINE *et al.*, 2008).

Análise de confiabilidade

O conjunto amostral foi dividido em três subgrupos de estações em função da magnitude da vazão média afluente (Q): pequeno ($Q < 50 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$), médio ($50 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1} < Q < 200 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$) e grande porte ($Q > 200 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$), aptas a abastecerem, respectivamente, populações inferiores a 25 mil pessoas, entre 25 mil e 100 mil e superiores a 100 mil pessoas.

Inicialmente, determinou-se o nível de confiabilidade para cada estação amostrada, e, para tal, pautou-se a análise nos registros médios diários de turbidez e cor aparente (\bar{X} Obs), nos coeficientes de variação (CVObs) dos dados históricos de tais registros e nos limites máximos estabelecidos pela legislação vigente (XMax). Utilizaram-se dados efluentes das 20 estações amostradas referentes

predominantemente ao período de 2009 a 2014. Os valores limite (XMax) considerados foram: 1,0 uT e 0,5 uT para turbidez e 15 uH para cor aparente, conforme definido nas Portarias nº 518 e 2.914 (BRASIL, 2004, 2011), limites mantidos na Portaria nº 888 (BRASIL, 2021). Em relação à turbidez da água tratada, avaliou-se também o atendimento às metas do padrão dos EUA de 0,1 e 0,3 uT (USEPA, 2009).

Empregaram-se para determinar o nível de confiabilidade ($Z_{(1-\alpha)}$) as Equações 3 e 4 nos dois períodos hidrológicos posteriormente definidos com base nos dados pluviométricos.

$$CC = \frac{\bar{X}_{Obs}}{X_{Max}} \quad (3)$$

$$Z_{(1-\alpha)} = - \frac{\ln \left[CC - \frac{1}{\sqrt{(CV_{Obs^2+1})}} \right]}{\sqrt{\ln (CV_{Obs^2+1})}} \quad (4)$$

Realizaram-se dois testes de hipótese não paramétricos:

- teste U de Mann-Whitney, com nível de significância de 5%, para comparar os períodos hidrológicos considerando as variáveis de interesse;
- teste de hipótese não paramétrico de Kruskal Wallis e, em seguida, teste de comparações múltiplas, com nível de significância de 5%, para comparar os parâmetros de interesse de cada subgrupo de estações.

No segundo momento, tomou-se como referência o nível de confiabilidade de 95%, para determinar o valor médio (\bar{X}) requerido para turbidez da água tratada garantindo o atendimento ao padrão ou à meta estabelecida em 95% do tempo. Os valores médios requeridos (\bar{X}) serão discutidos com base nos valores médios observados (\bar{X} Obs).

Análise de custo do tratamento

Os custos com o tratamento contemplaram as despesas com pessoal exclusivamente envolvido na potabilização, produtos químicos e energia elétrica. Para consolidação do custo do tratamento, utilizaram-se os Planos de Carreira e Remuneração da Concessionária para obter os salários médios dos operadores e o consumo mensal de energia elétrica e produtos químicos (coagulante, alcalinizante, cloro e flúor). Elaborou-se gráfico para interpretar os custos com tratamento por estação e os custos médios do tratamento por porte de estação ($Q < 50 \text{ L.s}^{-1}$; $50 \text{ L.s}^{-1} < Q < 200 \text{ L.s}^{-1}$; $Q > 200 \text{ L.s}^{-1}$).

Por fim, avaliaram-se, utilizando o teste U de Mann-Whitney com nível de significância de 5%, a existência de diferença nos custos em função do período hidrológico e a correlação envolvendo a turbidez efluente e as variáveis custo total de tratamento, custo com produtos químicos, custo com coagulante, nível de confiabilidade, índice de sobrecarga, vazão média afluente e idade da estação.

Para tal, empregou-se o coeficiente de correlação de Spearman (ρ), por meio da Equação 5, verificando a intensidade da relação entre as variáveis.

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n di^2}{n^3 - n} \quad (5)$$

Em que:

n = o número de pares (x_i, y_i);

di = (postos de x_i entre os valores de x) - (posto de y_i entre os valores de y).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Número de dados consolidados e definição dos períodos hidrológicos

Na análise de consistência dos dados referentes às estações amostradas, conforme salientado, excluíram-se os dias com registros considerados inconsistentes ou com erros de registro. Os demais dados, totalizando mais de 110 mil para os três parâmetros, foram utilizados na íntegra por serem considerados passíveis de ocorrer. Realizou-se a estatística descritiva dos dados. Como esperado, os dados não apresentaram normalidade, sendo, portanto, tratados com estatística não paramétrica.

A série histórica de precipitação nos 19 municípios do estado associados às 20 estações amostradas apontou distribuição espacial de precipitações aproximadamente uniforme entre os anos 2007 e 2015. O período chuvoso correspondeu aos meses de outubro a abril, perfazendo cerca de 80% do volume anual precipitado, e o período seco de maio a setembro. A altura anual de precipitação variou de 1.300 a 1.400 mm (Incapar, 2017).

Análise estatística dos dados

Realizou-se a estatística descritiva básica dos registros de turbidez e cor aparente do efluente de cada estação, identificando-se que os dados não apresentaram uma distribuição normal. Para confirmar a distribuição dos dados, aplicou-se o teste de aderência χ^2 , como exemplificado na Figura 3.

O teste de aderência χ^2 mostrou que não há aderência à distribuição lognormal. No entanto, como os dados mostram assimetria à direita, bastante semelhante à função de densidade de probabilidade relacionada à distribuição de probabilidade lognormal, aplicou-se o modelo de confiabilidade desenvolvido por Niku, Schroeder e Samaniego (1979). Essa característica também foi observada por Oliveira e Von Sperling (2008) e Melo *et al.* (2016).

Análise de confiabilidade

Para desenvolver este estudo, empregaram-se os padrões/metapas para turbidez da água filtrada como metas para a água tratada. Dessa forma, avaliou-se o atendimento aos padrões de turbidez de 1,0 e 0,5 uT, conforme estabelecido nas Portarias nº 518, vigente até 2012, e 2.914, vigente em 2013 e 2014 (BRASIL, 2004, 2011), e o atendimento às metas 0,3 e 0,1 uT, estabelecidas pela United States Environmental Protection Agency (USEPA, 2009). A justificativa para as duas metas mais restritivas vincula-se à Portaria nº 2.914 (BRASIL, 2011) e à USEPA (2009). A primeira recomenda turbidez da água filtrada menor ou igual a 0,3 uT em 95% das amostras mensais, quando a média aritmética da concentração de oocistos de *Cryptosporidium spp.* na água bruta for maior ou igual a 3,0 oocistos.L⁻¹. Já a USEPA (2009) apresenta a meta de 0,1 uT como condição de otimização do tratamento. Os registros de cor foram analisados conforme a Portaria nº 888, que manteve os limites da Portaria nº 2.914 e da USEPA (15 uH).

Utilizando o teste U de Mann-Whitney, no nível de significância de 5%, observou-se que há diferença significativa entre os níveis de confiabilidade para os períodos seco e chuvoso para atender ao padrão de 1,0 e 0,5 uT. Em relação às demais metas, não há diferença significativa no nível de confiabilidade para o conjunto de estações analisadas. Verificou-se que o percentual de atendimento às metas de turbidez efluente é significativamente menor no período chuvoso quando comparado ao período seco. Essa primeira conclusão coaduna-se com mencionado trabalho de Melo *et al.* (2016).

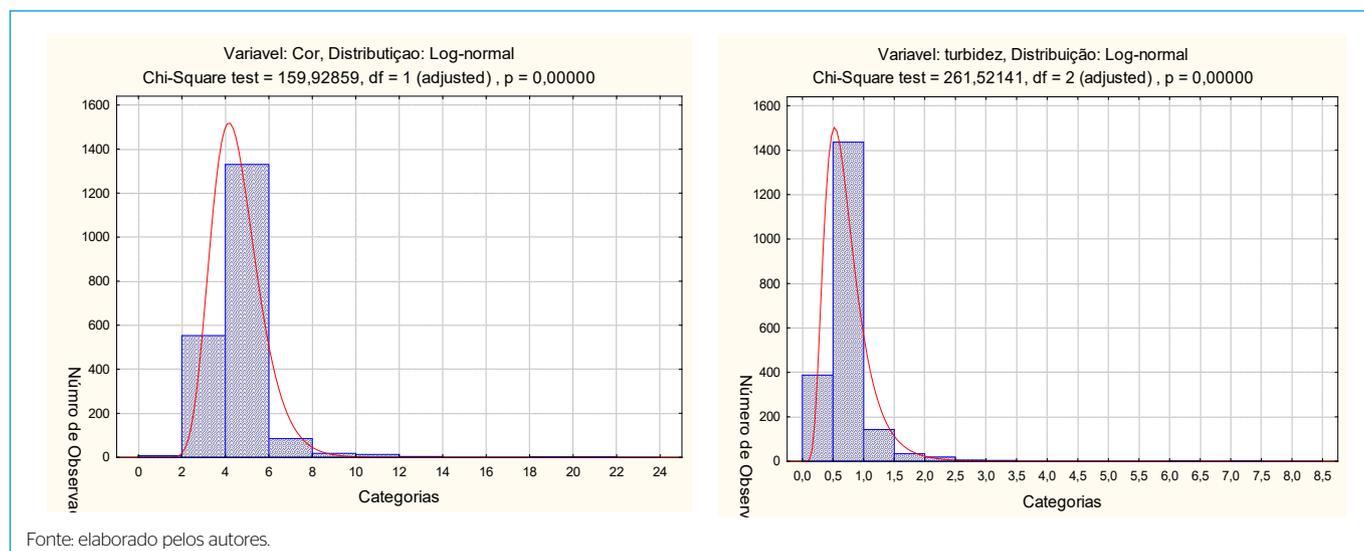


Figura 3 - Exemplo de aplicação do teste de aderência qui-quadrado para os dados da estação de tratamento de água II.

Essa constatação sugere que a avaliação de desempenho de estações de tratamento em regiões tropicais deva se fiar nos dados referentes ao período chuvoso, quando limitações hidráulicas ou operacionais das estações se tornam mais evidentes pela menor qualidade da água bruta. A exceção a tal perspectiva se manifestaria quando a água bruta se origina de mananciais léticos com elevada concentração de matéria orgânica de origem vegetal ou susceptíveis a eventos de eutrofização no período de estiagem. Esta última perspectiva poderia se manifestar em apenas uma das estações amostradas (ETA IV).

O nível de confiabilidade está indicado na Tabela 1 para o período chuvoso. Adicionalmente, apresentam-se também na Tabela 1 o índice de sobrecarga (razão entre a vazão média afluente e a vazão de projeto) e a idade das estações considerando como referência o primeiro ano dos dados utilizados para cada unidade (2009).

O elevado atendimento às metas pelas estações amostradas para cor no período chuvoso, e ainda maior no período seco, concorreu para que as avaliações subsequentes se realizassem apenas para turbidez efluente.

Da Tabela 1 observa-se, conforme esperado, que, quanto mais restritiva a meta de turbidez, mais difícil é o seu atendimento, o que foi verificado também por Gupta e Shrivastava (2008). O atendimento à meta 0,5 uT ainda é relativamente baixo considerando que os dados abordam um período de transição entre as Portarias nº 518/04 e 2.914/11 (BRASIL, 2004, 2011) e consequente adequação das estações aos novos padrões. Os padrões de cor aparente atendem ao limite, com percentual acima de 95,9%.

As três estações com menor percentual de atendimento à meta de turbidez da água tratada de 1,0 uT (I, XVIII e XX) operavam com sobrecarga em ambos períodos hidrológicos amostrados. Tais condições de sobrecarga parecem interferir mais no desempenho das estações de menor porte, localizadas em pequenos municípios onde a operação tenderia a ser menos acurada. Contudo não se observou correlação significativa entre a vazão e o índice de sobrecarga (Figura 4A).

Em contrapartida, a unidade com segundo maior índice de sobrecarga (ETA X, com 26%) e uma das estações mais velhas do grupo amostral (44 anos)

apresentou o melhor desempenho entre as estações analisadas. Pôde-se observar correlação significativa entre a idade da estação e o índice de sobrecarga. O fato do efluente da ETA X ter índices elevados de atendimento às metas indica acurácia na operação e, muito provavelmente, manancial mais preservado das ações antrópicas.

Em relação à idade da estação, não se verificou influência significativa nos percentuais de atendimento às metas de turbidez. Provavelmente, conforme salientado, ampliações nas estações mais antigas devem ter contribuído para reduzir o índice de sobrecarga e favorecer o desempenho. Essa constatação também foi verificada no mencionado estudo realizado na Pennsylvania (Lusardi; Consonery, 1999).

Aplicou-se o teste Kruskal-Wallis, para o nível de significância de 5%, verificando se havia diferença significativa entre os valores de tendência central da turbidez da água tratada das 20 estações amostradas. A comparação foi realizada considerando os três subgrupos definidos em função da magnitude da vazão média afluente, conforme mostra a Figura 4. Observou-se que predominantemente as estações apresentam diferença significativa entre os valores centrais de turbidez da água tratada nos grupos de mesma faixa de vazão.

Com intuito de facilitar a interpretação dos resultados dos testes não paramétricos de Kruskal-Wallis, elaboraram-se as Figuras 5, 6 e 7. Tais figuras objetivam identificar diferenças estatisticamente significativas no desempenho entre as estações de cada subgrupo, considerando a turbidez da água tratada no período chuvoso.

No mesmo contexto, aplicou-se o teste Kruskal-Wallis, para o nível de significância de 5%, verificando se há diferença significativa entre os valores de tendência central da turbidez efluente em função do porte das estações amostradas, conforme as Figuras 8 e 9.

Em relação ao porte das estações, verificou-se que as de pequeno porte tenderam a produzir efluente de melhor qualidade quando comparadas às de grande porte. Essa percepção contraria as mencionadas pesquisas realizadas na Pennsylvania (Lusardi; Consonery, 1999) e no Japão (OHNO *et al.*, 2009), e provavelmente decorre da melhor qualidade da água bruta captada em mananciais mais preservados da atividade antrópica.

Tabela 1 – Nível de confiabilidade (%) no atendimento às metas e aos padrões de potabilidade para as estações amostradas no período.

ETA	Limites/metras de turbidez				Cor (%)	Idade da estação (anos)	Vazão média (L/s)	Índice de sobrecarga (%)
	1,0 uT (%)	0,5 uT (%)	0,3 uT (%)	0,1 uT (%)				
I	65,7	37,6	19,9	2,4	99,9	15	286	28
II	77,7	28,5	6,1	0,0	100,0	32	1.951	0
III	73,4	43,6	22,9	2,3	99,4	15	185	0
IV	95,8	57,1	16,8	0,0	99,9	35	119	0
V	82,4	68,2	55,5	27,9	100,0	22	26	0
VI	87,8	69,6	51,3	15,9	100,0	28	37	3
VII	75,1	41,9	19,6	1,2	100,0	41	80	0
VIII	91,9	34,0	4,0	0,0	96,5	36	42	5
IX	88,5	70,9	52,8	16,8	95,9	15	39	0
X	98,3	87,1	65,5	12,0	100,0	44	47	26
XI	85,6	44,3	15,1	0,2	99,5	36	39	0
XII	88,7	70,1	51,0	14,6	100,0	34	81	7
XIII	89,0	74,3	59,1	24,8	99,4	43	65	12
XIV	92,4	71,1	46,4	7,0	99,8	32	391	18
XV	97,0	75,0	41,5	1,7	100,0	36	43	14
XVI	89,9	68,7	46,3	9,0	100,0	25	96	11
XVII	95,0	83,7	68,9	29,1	100,0	37	42	10
XVIII	56,2	23,3	8,3	0,3	99,6	26	40	8
XIX	79,7	61,2	45,3	16,2	98,3	39	51	15
XX	79,2	50,4	28,1	3,2	100,0	42	68	19

Fonte: elaborado pelos autores.

ETA: estação de tratamento de água.

Determinação do nível de turbidez requerido

Adotando nível de confiabilidade de 95% para o cálculo do CC, utilizaram-se os coeficientes de variação observados (CV_{obs}) efetivamente apresentados pelas estações e os padrões e metas de interesse (XMax). Esse percentual vinculou-se aos requisitos dos mencionados padrões de potabilidade brasileiros para o percentual de amostras da turbidez efluente. Na Figura 10, apresenta-se a relação CC e CV para estações amostradas considerando a turbidez da água tratada no período chuvoso.

Pode-se perceber que, quanto maior o CV, menor o valor do CC, permitindo inferir que a estação tem desempenho mais instável. A estação V caracteriza bem essa situação nos períodos tanto de chuvas quanto de estiagem (este não apresentado por exiguidade de espaço). É fundamental para o desempenho de uma estação a manutenção da estabilidade da operação associada à eficiência e ao atendimento a metas e padrões estabelecidos.

Na Tabela 2, apresentam-se os valores médios observados e os valores médios requeridos de turbidez efluente para que em 95% do tempo as metas estipuladas sejam atendidas, destacando-se quando tal ocorreu.

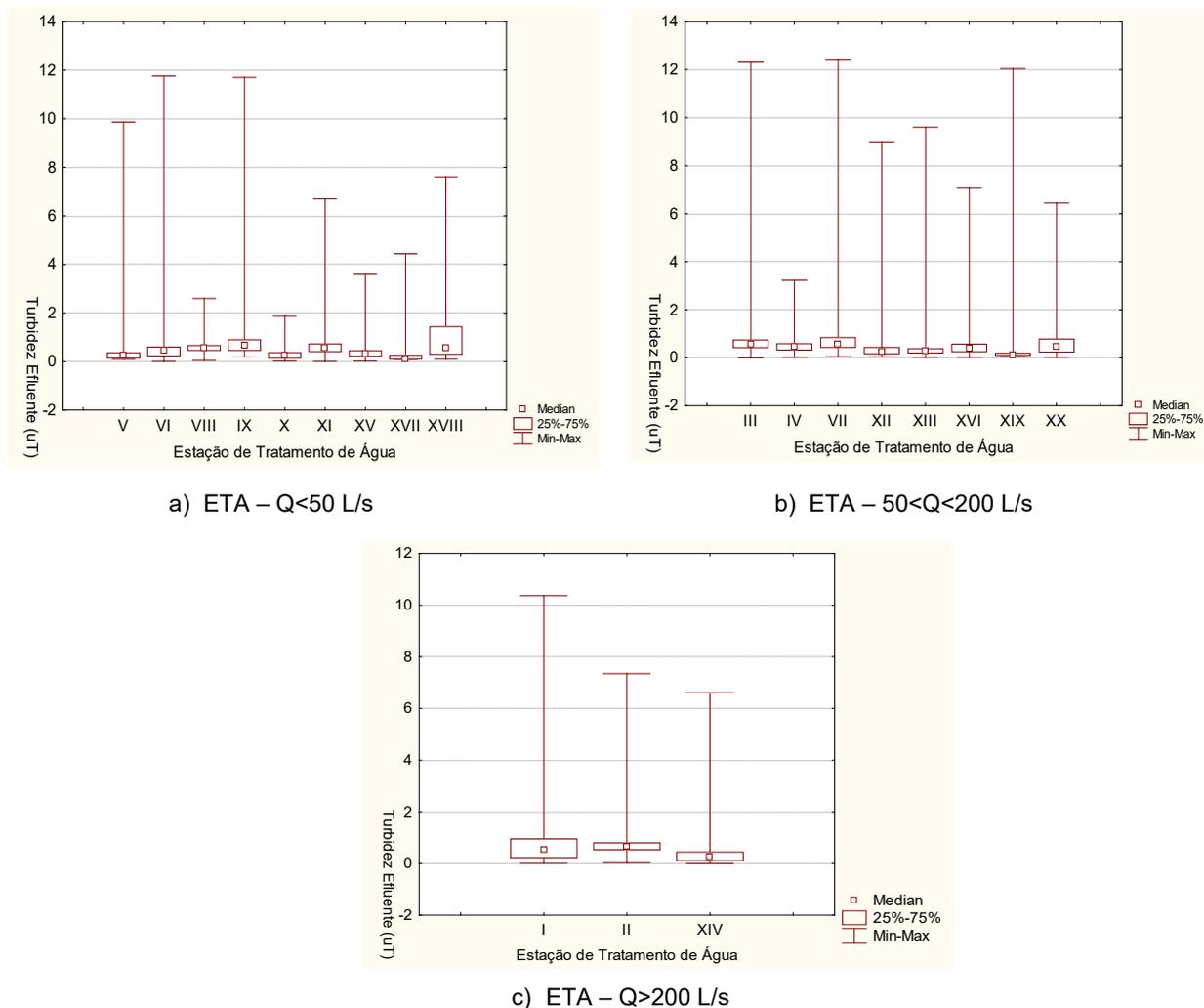
Pela Tabela 2, evidencia-se que, conforme mencionado, nenhuma estação amostrada obteve melhor desempenho no período chuvoso em relação ao período de estiagem. Igualmente, as estações não produziram efluente

com turbidez média que atendesse ao nível de confiabilidade de 95% às metas 0,3 e 0,1 uT.

Das 20 estações amostradas, 9 unidades não atenderam à meta 1,0 uT nos períodos chuvoso e seco, demandando maior atenção quanto às suas condições físicas, hidráulicas e operacionais; 7 unidades atenderam à meta 1,0 uT em 95% do tempo apenas no período seco, indicando que a preservação dos mananciais deve ser considerada como fator primordial para a melhoria do desempenho.

Apenas quatro unidades atenderam à meta 1,0 uT nos dois períodos hidrológicos, devendo-se otimizar o tratamento para atendimento à meta 0,5 uT (em vigor a partir de 2016 para 95% das amostras). A ETA X merece destaque como única estação que, além de atender à meta 1,0 uT nos dois períodos hidrológicos, também atendeu à meta 0,5 uT no período seco.

Por fim, infere-se que, para a meta menos exigente (1,0 uT) para as estações que apresentaram percentual de atendimento igual ou superior a 95% (IV, X, XV e XVII), a análise de confiabilidade mostrou-se, conforme salientado, menos relevante. Para as demais estações, sua importância evidencia-se pelo estabelecimento do valor médio desejado para atendimento às metas em 95% das amostras (ou do tempo de funcionamento da estação). Essa informação poderá nortear a operação da unidade no que tange à duração das carreiras de filtração, ao ajuste da dose ótima de coagulante, à avaliação da eficiência



ETA: estação de tratamento de água.
Fonte: elaborado pelos autores.

Figura 4 - Variabilidade da turbidez da água tratada para estações amostradas em função da vazão afluente.

da lavagem das unidades filtrantes e, eventualmente, à frequência de limpeza dos decantadores.

Análise de custo do tratamento

Os custos do tratamento por estação podem ser observados na Figura 11. Não se obtiveram dados de custo da ETA XX. A ETA II com maior vazão, localizada na região metropolitana da capital do estado, é a que apresenta maior gasto com produtos químicos. Não foram identificados fatores intervenientes que determinaram maior gasto com energia nas estações VII, XVI e XVIII. As estações de pequeno porte apresentaram os maiores gastos com pessoal. Essa condição se associa à manutenção do corpo técnico aliada ao aumento da qualificação profissional e ao próprio plano de cargos e salários da empresa que favorece incrementos de ganhos. Estes, usualmente, não se relacionam ao aumento da força de trabalho na operação nem ao volume de água tratada.

Em média, as despesas com pessoal respondem por 68% dos custos totais, possível explicação para tal remete ao fato de os profissionais envolvidos no

tratamento pertencerem à mesma empresa e, dessa forma, estarem vinculados ao mesmo plano de cargos e salários. As despesas com coagulantes correspondem em média a 61% das despesas gerais com produtos químicos nas estações.

Dessa forma, como esperado, os custos totais apresentaram-se mais elevados para as estações de menor porte atingindo US\$ 54/100 m³, da ordem de US\$ 26/100m³ para unidades de médio porte, reduzindo-se para US\$ 12/100 m³ nas estações de grande porte.

Os custos com tratamento total e com coagulante não tiveram diferença significativa entre os períodos hidrológicos. Para os parâmetros custo com coagulante/100m³ e índice de sobrecarga (%), apesar de não ser significativa a diferença entre os períodos hidrológicos, tem-se indicativo de maior gasto com produtos químicos e maior sobrecarga na ETA no período chuvoso (a vazão afluente às ETA eleva-se no período chuvoso). Esses dados corroboram o estudo de Santana, Zhang e Mihelcic (2014) que indica que a piora da qualidade da água durante o período chuvoso determina aumento na necessidade de produto químico e consequentemente nos custos associados (Figura 12).

ETA V	ETA VI	ETA VIII	ETA IX	ETA X	ETA XI	ETA XV	ETA XVII	ETA XVIII	
	↑	↑	↑	↓	↑	↑	↓	↑	<i>ETA V</i>
↓		↑	↑	↓	↑	↓	↓	↑	<i>ETA VI</i>
↓	↓		=	↓	=	↓	↓	↓	<i>ETA VIII</i>
↓	↓	=		↓	↓	↓	↓	↓	<i>ETA IX</i>
↑	↑	↑	↑		↑	↑	↓	↑	<i>ETA X</i>
↓	↓	=	↑	↓		↓	↓	=	<i>ETA XI</i>
↓	↑	↑	↑	↓	↑		↓	↑	<i>ETA XV</i>
↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑		↑	<i>ETA XVII</i>
↓	↓	↑	↑	↓	=	↓	↓		<i>ETA XVIII</i>

Fonte: elaborado pelos autores.
 † Estação em negrito (acima) estatisticamente diferente/superior à estação em itálico (coluna à direita); ↓ Estação em negrito (acima) estatisticamente diferente/inferior à estação em itálico (coluna à direita); = Estação em negrito (acima) sem diferenças significativas em relação à estação em itálico (à direita); ETA: estação de tratamento de água.

Figura 5 - Diferenças significativas ($\alpha = 5\%$) entre cada estação (em negrito) em relação às demais (em itálico) para turbidez da água tratada no período chuvoso entre estações com vazão inferior a 50 L/s.

ETA III	ETA IV	ETA VII	ETA XII	ETA XIII	ETA XVI	ETA XIX	ETA XX	
	↓	=	↓	↓	↓	↓	↓	<i>ETA III</i>
↑		↑	↓	↓	↓	↓	=	<i>ETA IV</i>
=	↓		↓	↓	↓	↓	↓	<i>ETA VII</i>
↑	↑	↑		=	↑	↓	↑	<i>ETA XII</i>
↑	↑	↑	=		↑	↓	↑	<i>ETA XIII</i>
↑	↑	↑	↓	↓		↓	↑	<i>ETA XVI</i>
↑	↑	↑	↑	↑	↑		↑	<i>ETA XIX</i>
↑	=	↑	↓	↓	↓	↓		<i>ETA XX</i>

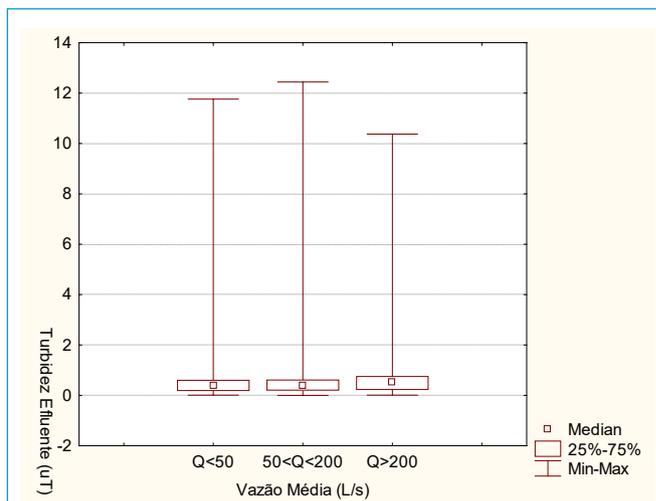
Fonte: elaborado pelos autores.
 ETA: estação de tratamento de água.

Figura 6 - Diferenças significativas ($\alpha = 5\%$) entre cada estação (em negrito) em relação às demais (em itálico) para turbidez da água tratada no período chuvoso entre estações com vazão entre 50 e 200 L/s.

ETA I	ETA II	ETA XIV	
	↑	↓	<i>ETA III</i>
↓		↓	<i>ETA IV</i>
↑	↓		<i>ETA VII</i>

ETA: estação de tratamento de água.
 Fonte: elaborado pelos autores.

Figura 7 - Diferenças significativas ($\alpha = 5\%$) entre cada estação (em negrito) em relação às demais (em itálico) para turbidez da água tratada no período chuvoso entre estações com vazão superior a 200 L/s.



Fonte: elaborado pelos autores.

Figura 8 - Variabilidade da turbidez da água tratada em função da magnitude da vazão afluente.

ETA Q > 50L/s	ETA 50L/s < Q < 200L/s	ETA Q > 200L/s	
	↑	↑	<i>ETA Q > 50L/s</i>
↓		↑	<i>ETA 50L/s < Q < 200L/s</i>
↓	↓		<i>ETA Q > 200L/s</i>

ETA: estação de tratamento de água.
 Fonte: elaborado pelos autores.

Figura 9 - Diferenças significativas ($\alpha = 5\%$) entre estação (em negrito) em relação às demais (em itálico) para turbidez da água tratada em função do porte da estação.

Por fim, não se verificou correlação significativa entre o custo com produtos químicos e as variáveis nível de confiabilidade, índice de sobrecarga, vazão média afluente, idade da estação bem como turbidez efluente.

Quando avaliada a correlação com o custo total do tratamento, verifica-se correlação significativa com o índice de sobrecarga e a vazão afluente. Contudo a afirmativa de Gupta e Shrivastava (2008), indicando aumento no custo do tratamento em função do nível de confiabilidade das estações, não foi observada no conjunto de dados analisados.

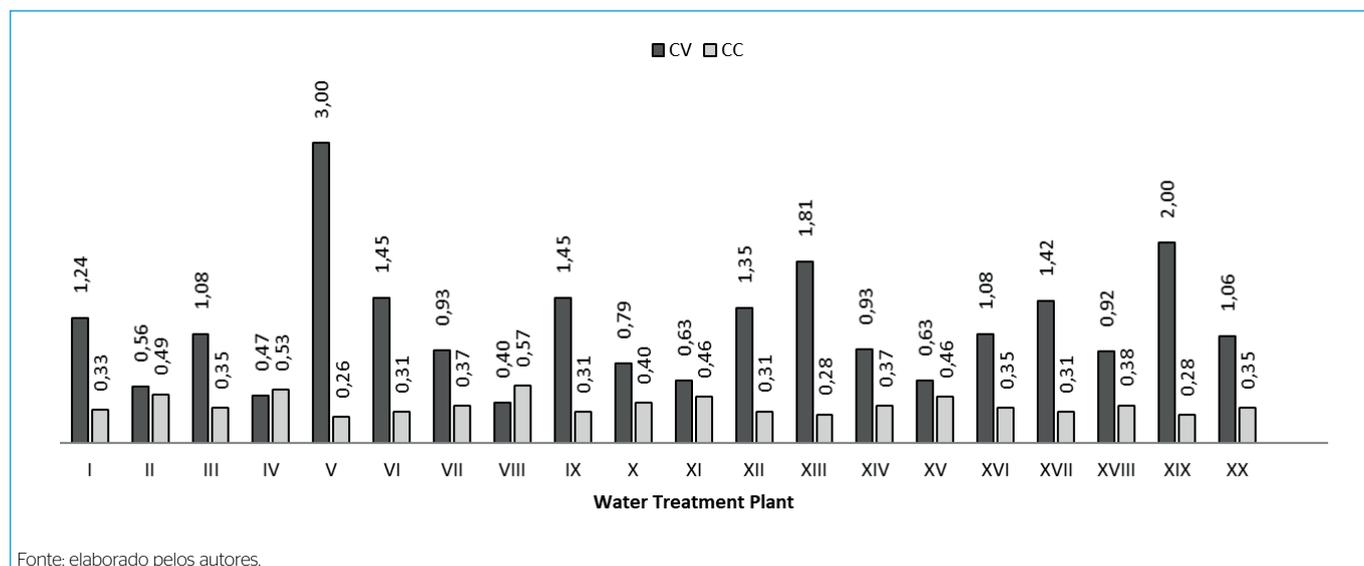


Figura 10 - Comparação entre coeficiente de confiabilidade e coeficiente de variação da turbidez efluente no período chuvoso para as estações amostradas.

Tabela 2 - Determinação da turbidez média efluente requerida em função das metas para nível de confiabilidade de 95%.

ETA	Período Hidrológico	Turbidez média observada (uT)	Metas de Turbidez média efluente requerida (uT)			
			1,0 uT	0,5 uT	0,3 uT	0,1 uT
I	Chuvoso	1,08	0,33	0,16	0,10	0,03
	Seco	0,62	0,32	0,16	0,10	0,03
II	Chuvoso	0,77	0,49	0,24	0,15	0,05
	Seco	0,69	0,50	0,25	0,15	0,05
III	Chuvoso	0,85	0,35	0,17	0,10	0,03
	Seco	0,54	0,49	0,24	0,15	0,05
IV	Chuvoso	0,51	0,53	0,26	0,16	0,05
	Seco	0,35	0,55	0,28	0,17	0,06
V	Chuvoso	0,77	0,26	0,13	0,08	0,03
	Seco	0,26	0,32	0,16	0,10	0,03
VI	Chuvoso	0,51	0,31	0,15	0,09	0,03
	Seco	0,43	0,46	0,23	0,14	0,05
VII	Chuvoso	0,80	0,37	0,19	0,11	0,04
	Seco	0,71	0,44	0,22	0,13	0,04
VIII	Chuvoso	0,63	0,57	0,29	0,17	0,06
	Seco	0,52	0,65	0,33	0,20	0,07
IX	Chuvoso	0,49	0,31	0,15	0,09	0,03
	Seco	0,37	0,35	0,18	0,11	0,04
X	Chuvoso	0,29	0,40	0,20	0,12	0,04
	Seco	0,20	0,45	0,22	0,13	0,04
XI	Chuvoso	0,64	0,46	0,23	0,14	0,05
	Seco	0,59	0,43	0,21	0,13	0,04

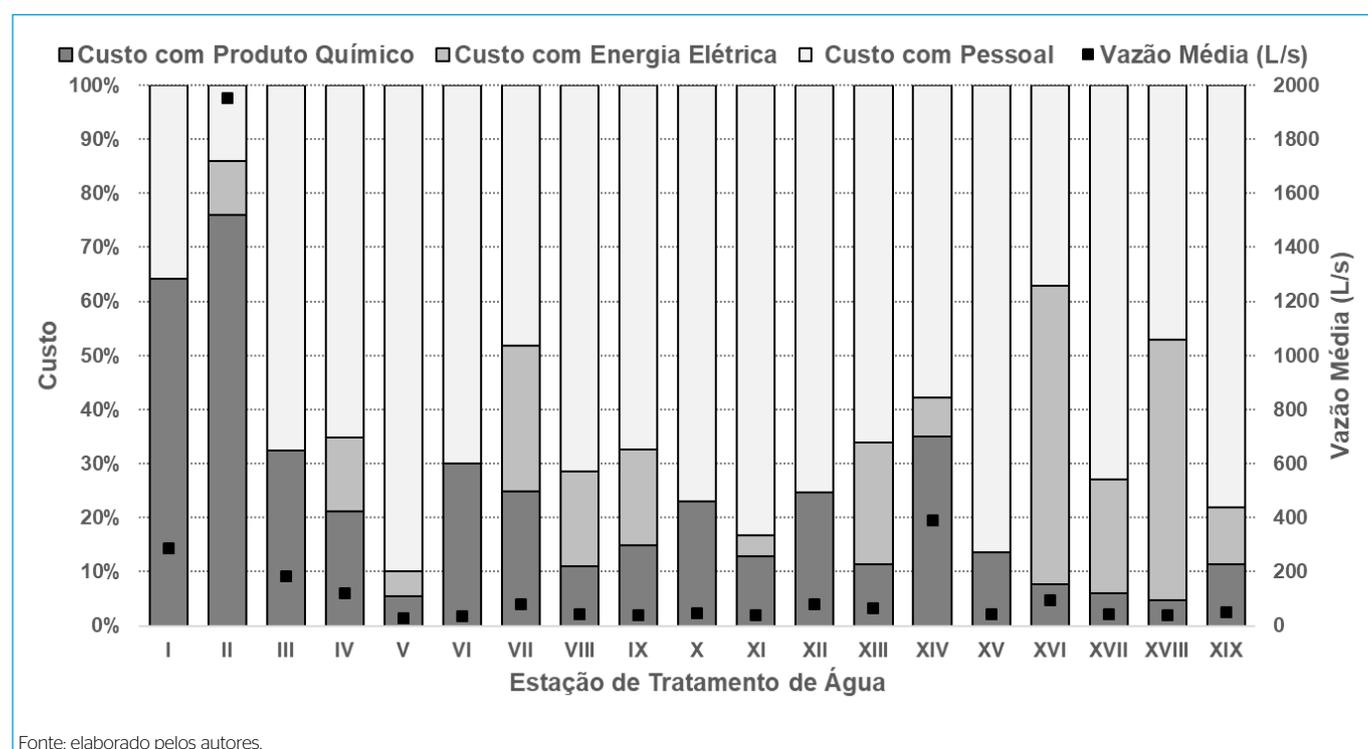
Continua..

Tabela 2 - Continuação.

ETA	Período Hidrológico	Turbidez média observada (uT)	Metas de Turbidez média efluente requerida (uT)			
			1,0 uT	0,5 uT	0,3 uT	0,1 uT
XII	Chuvoso	0,49	0,31	0,16	0,09	0,03
	Seco	0,36	0,27	0,13	0,08	0,03
XIII	Chuvoso	0,47	0,28	0,14	0,09	0,03
	Seco	0,26	0,41	0,21	0,12	0,04
XIV	Chuvoso	0,44	0,37	0,19	0,11	0,04
	Seco	0,25	0,44	0,22	0,13	0,04
XV	Chuvoso	0,40	0,46	0,23	0,14	0,05
	Seco	0,33	0,41	0,20	0,12	0,04
XVI	Chuvoso	0,48	0,35	0,17	0,10	0,03
	Seco	0,32	0,33	0,16	0,10	0,03
XVII	Chuvoso	0,31	0,31	0,15	0,09	0,03
	Seco	0,19	0,26	0,13	0,08	0,03
XVIII	Chuvoso	1,20	0,38	0,19	0,11	0,04
	Seco	0,88	0,36	0,18	0,11	0,04
XIX	Chuvoso	0,78	0,28	0,14	0,08	0,03
	Seco	0,16	0,26	0,13	0,08	0,03
XX	Chuvoso	0,72	0,35	0,18	0,11	0,04
	Seco	0,38	0,36	0,18	0,11	0,04

Fonte: elaborado pelos autores.

ETA: estação de tratamento de água.



Fonte: elaborado pelos autores.

Figura 11 - Custos total do tratamento por estação amostrada.

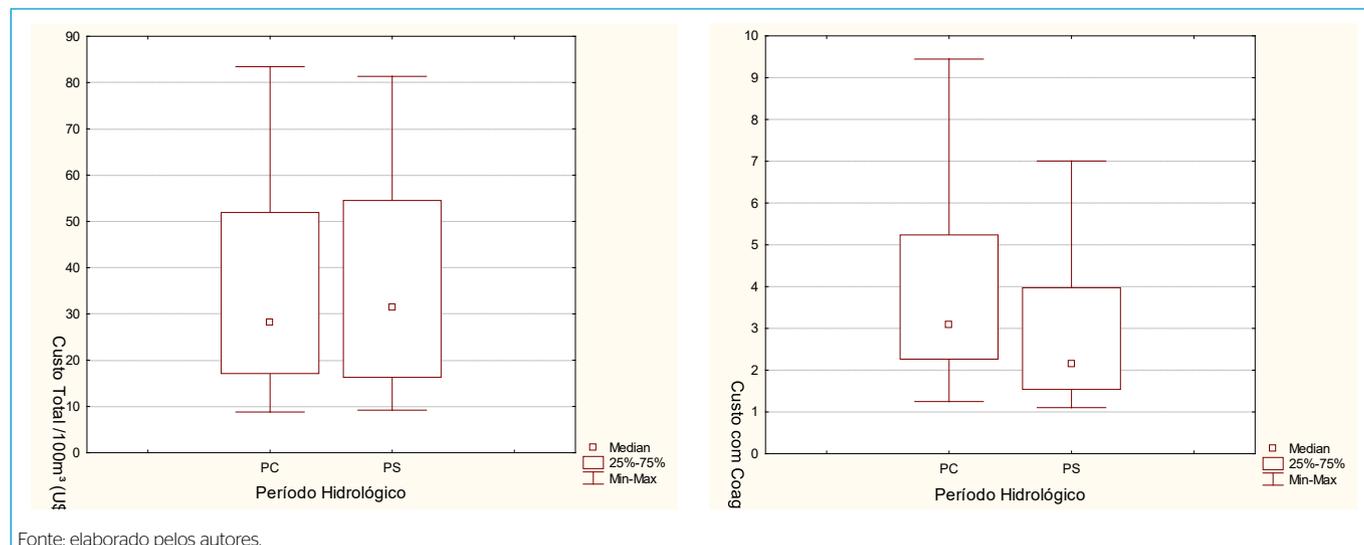


Figura 12 - Custos total e com coagulante (US\$) em função do período hidrológico.

CONCLUSÕES

Com base nos resultados do estudo, é possível concluir que:

- A avaliação de desempenho de estações de tratamento de água em países tropicais deve ser realizada com base nos dados operacionais do período chuvoso, pois a inevitável deterioração da água bruta vai evidenciar as limitações hidráulicas ou operacionais da unidade. As exceções apontam para mananciais eutrofizados ou com concentração elevada de matéria orgânica, predominantemente de origem vegetal. No presente estudo, essa perspectiva poderia se manifestar em apenas um dos mananciais associados às 20 estações amostradas;
- O estudo voltou a confirmar a adequabilidade do emprego da turbidez efluente como parâmetro relevante na avaliação de desempenho. A cor aparente, em ambos períodos hidrológicos, não se mostrou parâmetro adequado à avaliação, pois tende a equalizar o desempenho de estações de tratamento de água;
- Considerando a turbidez efluente como parâmetro de avaliação, a análise estatística apontou que as estações de pequeno porte amostradas tenderam a produzir água tratada de melhor qualidade quando comparadas às estações de grande porte, provavelmente pelas características da água bruta. Reforça essa premissa a tendência de maior uniformidade na operação das estações pelo mesmo prestador (companhia estadual de saneamento). No mesmo cenário, a idade das estações não se mostrou significativa em seu desempenho, indicando que, provavelmente, o índice de sobrecarga da unidade constitui o fator mais relevante para o desempenho;
- Estações cujos efluentes não atenderam às metas de 1,0 e 0,5 uT, em ambos períodos hidrológicos, provavelmente demandam intervenções na proteção ao manancial e nas características físicas das unidades, em termos de adequação ou ampliação;

- Para estações com elevado índice de atendimento às metas, a análise de confiabilidade mostrou-se menos relevante. Para as demais estações, a análise de confiabilidade está relacionada ao estabelecimento de um valor médio requerido para atendimento em 95% do tempo às metas, permitindo aos gestores balizar ações de melhorias na estação;
- Não se verificou correlação significativa entre o nível de confiabilidade e as demais variáveis analisadas, porte e idade da estação e custo do tratamento;
- As estações de pequeno porte apresentaram maior gasto com pessoal. Em média, esse insumo representou no espaço amostral 68% dos gastos totais e as despesas com coagulante representaram 61% dos gastos com produtos químicos;
- O custo total e de coagulantes não apresentou diferença significativa quando avaliado nos períodos hidrológicos, contudo se observou pequeno aumento nos gastos com coagulante no período chuvoso;
- Parece haver uma correlação significativa entre o custo total do tratamento e as variáveis índice de sobrecarga e vazão afluente à estação, mas não diretamente com o nível de confiabilidade da estação. As características da água bruta, vinculadas a mananciais menos impactados pela ocupação urbana, parecem representar papel mais relevante na qualidade do efluente.

CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

Oliveira, M. D.: Conceituação, Análise Formal, Escrita — Primeira Redação. Bianchi, D. P. Z.: Análise Formal, Escrita — Primeira Redação. Fonseca, J. F. R.: Curadoria de Dados, Análise Formal. Gorza Júnior, N. A.: Curadoria de Dados, Análise Formal, Metodologia. Libâneo, M.: Análise Formal, Escrita — Primeira Redação.

REFERÊNCIAS

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA); AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION (AWWA); WATER ENVIRONMENT FEDERATION (WEF). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 21. ed. Washington, DC.: American Public Health Association, 2005. 1220 p.

BIRHANE, B.S.; HISHE, T.G.; TENAGASHAW, D.Y. Performance Evaluation of Gambella Town Water Treatment Plant. *International Journal of Advanced Science and Engineering*, v. 6, n. 2, p. 1305-1312, 2019. <https://doi.org/10.29294/IJASE.6.2.2019.1305-1312>

- BRASIL. Ministério da Saúde. *Portaria nº 518*. Normas e padrão de potabilidade da água destinada ao consumo humano. Brasília, 2004.34 p.
- BRASIL. Ministério da Saúde. *Portaria nº 2.914*. Normas e padrão de potabilidade da água destinada ao consumo humano. Brasília, 2011. 53 p.
- BRASIL. Ministério da Saúde. *Portaria nº 888*. Normas e padrão de potabilidade da água destinada ao consumo humano. Brasília, 2021. 29 p.
- CUNHA, D.G.F.; SABOGAL-PAZ, L.P.; DODDS, W.K. Land use influence on raw surface water quality and treatment costs for drinking supply in São Paulo State (Brazil). *Ecological Engineering*, v. 94, p. 516-524, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.06.063>
- GUPTA, A.K.; SHRIVASTAVA, R.K. Optimal design of water treatment plant under uncertainty using genetic algorithm. *Environmental Progress*, v. 27, n. 1, p. 91-97, 2008. <https://doi.org/10.1002/ep.10254>
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). *Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008*. IBGE, 2015. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br>. Acesso em: 22 ago. 2019.
- INSTITUTO CAPIXABA DE PESQUISA, ASSISTÊNCIA TÉCNICA E EXTENSÃO RURAL (INCAPER). *Gráficos da Série Histórica*. INCAPER, 2017. Disponível em: <https://meteorologia.incaper.es.gov.br/graficos-da-serie-historica>. Acesso em: 20 jun. 2019.
- Levine, D.M.; Stephan, D.F.; Krehbiel, T.C.; Berenson, M.L. *Statistics for Managers Using Microsoft Excel*. 5. Ed. New York: Person Education, 2008. 858 p.
- LI, Z.; CLARK, R.M.; BUCHBERGER, S.G.; YANG, Y.J. Evaluation of climate change impact on drinking water treatment plant operation. *Journal of Environmental Engineering*, v. 140, n. 9, p. 401-405, 2014. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0000824](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000824)
- LUSARDI, P.J.; CONSONERY, P.J. Factors affecting filtered water turbidity. *JAWWA*, v. 91, n. 12, p. 28-40, 1999. <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.1999.tb08748.x>
- MELO, L.V.; OLIVEIRA, M.D.; LIBÂNIO, M.; OLIVEIRA, S.C. Applicability of statistical tools for evaluation of water treatment plants. *Desalination and Water Treatment*, v. 57, n. 30, p. 14024-14033, 2016. <https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1072586>
- NIKU, S.; SCHROEDER, E.D.; HAUGH, R.S. Reliability and stability of trickling filter processes. *Journal Water Pollution Control Association*, v. 54, n. 2, p. 129-134, 1982.
- NIKU, S.; SCHROEDER, E.D.; SAMANIEGO, F.J. Performance of activated sludge process and reliability-based design. *Journal Water Pollution Control Association*, v. 51, n. 12, p. 2841-2857, 1979.
- NIKU, S.; SCHROEDER, E.D.; TCHOBANOGLIOUS, G.; SAMANIEGO, F.J. *Performance of activated sludge process: reliability, stability and variability*. United States Environmental Protection Agency Grant nº R805097-01. Project Summary. Cincinnati: USEPA, 1981. 11 p.
- OLIVEIRA, M.D.; MELO, L.D.V.; QUEIROGA, L.L.; OLIVEIRA, S.; LIBÂNIO, M. Applying the reliability analysis to evaluate water treatment plants. *Water Science and Technology: Water Supply*, v. 14, n. 4, p. 634-642, 2014.
- OLIVEIRA, M.D.; REZENDE, O.L.T.; FONSECA, J.F.R.; LIBÂNIO, M. Evaluating the Surface Water Quality Index Fuzzy and its influence on water treatment. *Journal of Water Process Engineering*, v. 32, 100890, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.100890>
- OLIVEIRA, S.C.; VON SPERLING, M. Reliability analysis of wastewater treatment plants. *Water Research*, v. 42, n. 4-5, p. 1182-1194, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2007.09.001>
- OHNO, K.; KADOTA, E.; MATSUI, Y.; KONDO, Y.; MATSUSHITA, T.; MAGARA, Y. Plant capacity affects some basic indices of treated water quality: multivariate statistical analysis of drinking water treatment plants in Japan. *Journal of Water Supply: Research and Technology—AQUA*, v. 58, n. 7, p. 476-487, 2009. <https://doi.org/10.2166/aqua.2009.077>
- SANTANA, M.V.E.; ZHANG, Q.; MIHELIC, J.R. Influence of water quality on the embodied energy of drinking water treatment. *Environmental Science Technology*, v. 48, n. 5, p. 3084-3091, 2014. <https://doi.org/10.1021/es404300y>
- SZPAK, D.; THORZEWSKA-CIESLAK, B. Analysis and assessment of water treatment plant reliability. *Journal of Konbin*, v. 41, p. 21-38, 2017. <https://doi.org/10.1515/jok-2017-0002>
- STATSOFT. *Statistica (Data Analysis Software System)*. Version 7. São Paulo: StatSoft, 2007.
- TEIXEIRA, A.R.; SANTOS, E.P.C.; PÁDUA, V.L.; HELLER, L.; DI BERNARDO, L.; LIBÂNIO, M. A confiabilidade analítica dos valores de turbidez da água filtrada e seu efeito no cumprimento do padrão de potabilidade. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 9, n. 1, p. 65-72, 2004.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). *EPA Drinking water advice note n.5: Turbidity in drinking water*. Estados Unidos: USEPA, 2009. 11 p. Disponível em: <https://www.epa.ie/publications/compliance-enforcement/drinking-water/advice-guidance/Advice-Note-No5.pdf>. Acesso em: 15 nov. 2019.
- WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). *Guidelines for Drinking-water Quality*. 4. ed. Genebra: WHO, 2011.
- ZHANG, K.; ACHARI, G.; SADIQ, R.; LANGFORD, C.H.; DORE, M.H.I. An integrated performance assessment framework for water treatment plants. *Water Research*, v. 46, n. 6, p. 1673-1683, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.12.006>

