

Qualidade da água em diferentes fases operacionais da estação de tratamento de água de Macapá

O objetivo da presente pesquisa foi testar estatisticamente a variação de parâmetros de qualidade da água com base em indicadores de etapas operacionais unitárias da Estação de Tratamento de Água de Macapá (ETAM)/Amapá-Brasil. A metodologia consistiu em: a) análise de séries temporais disponíveis de parâmetros da qualidade da água (Cloro (Cl), pH, Turbidez e Cor Aparente) durante os meses de julho e agosto de 2016, 2017 e 2019; b) monitoramento e verificação de parâmetros da qualidade da água (Cl, pH, Turbidez e Cor Aparente, Coliformes Totais e E. coli (junho a agosto de 2021)) para testar sua conformidade com a legislação e confrontá-los com as séries históricas, analisando suas variações após a expansão da ETAM; c) testar estatisticamente a influência de variáveis independentes da qualidade da água e fatores operacionais (ETA 1, 2 e 3; Hora; Dia; Mês; Ano; Etapa Operacional de Captação, Flocculação, Decantação, Filtração e Desinfecção) na concentração de Cl (Kruskal-Wallis, regressões simples e múltiplas, $\alpha < 0,05$). Os resultados mostraram que a concentração de Cl variou significativamente com todos os parâmetros e fatores (exceto 'Mês' do Ano) ($p < 0,05$). Análises de regressões múltiplas indicaram que a concentração de Cl foi significativamente correlacionada com as variáveis 'Dia, Ano e Cor Aparente da série' (Raj2(GL=2107, F = 340,1) = 0,33, $p < 0,001$). Na análise da série atual de 2021 não foi observada variação significativa de Cl com Coliformes Totais e E. coli, sendo este resultado paradoxalmente oposto aos anos 2016, 2017 e 2019. Na aplicação de coagulantes e polímeros em testes de jarros, observou-se falhas operacionais de dosagens, indicando ineficiência de controle de insumos químicos na ETAM. Conclui-se que a variação dos parâmetros da qualidade da água da série histórica é dependente de fatores operacionais (ETA, Etapa, Hora, Dia e Ano). Entretanto, não foi confirmada a hipótese de melhoria da qualidade da água após a expansão da ETA2 ($p < 0,01$). Isto é, a modernização da infraestrutura não impactou positivamente a eficiência geral da ETAM. Pelo contrário, a qualidade da água tratada não atendeu aos estabelecidos pela Portaria GM/MS Nº 888, de 4 de 05/2021. Ou seja, a ETA3 não foi mais eficiente na desinfecção por Cl que as primeiras. Assim, confirma-se a hipótese de que a melhoria da infraestrutura da ETAM não impactou diretamente na eficiência e conformidade dos padrões de qualidade da água produzida. Este fato reduziu suas potencialidades operacionais e não refletiu em aumento da eficiência operacional das operações unitárias.

Palavras-chave: Abastecimento de água; Teste de Jarro; Monitoramento; Séries Temporais; Amazônia.

Water quality in unit operations in the Macapá water treatment plant

The objective of the present research was to statistically test the variation of water quality parameters based on indicators of unit operational stages of the Macapá Water Treatment Station (ETAM)/Amapá-Brasil. The methodology consisted of following steps: a) analysis of available time series of water quality parameters (Chlorine (Cl), pH, Turbidity and Apparent Color) during the months of July and August 2016, 2017 and 2019; b) monitoring and verification of water quality parameters (Cl, pH, Turbidity and Apparent Color, Total Coliforms and E. coli (June to August 2021)) to test their compliance with legislation and compare them with historical series, analyzing its variations after the expansion of the ETAM; c) statistically test the influence of independent variables of water quality and operational factors (ETA 1, 2 and 3; Hour; Day; Month; Year; raw water Supply, Flocculation, Decantation, Filtration and Disinfection) on the concentration of Cl (Kruskal-Wallis, single and multiple regressions, $\alpha < 0.05$). The results showed that the Cl concentration varied significantly with all parameters and factors (except 'Month' of Year) ($p < 0.05$). Multiple regression analyzes indicated that Cl concentration was significantly correlated with the variables 'Day, Year and Apparent Color of the series' (Raj2(GL=2107, F = 340.1) = 0.33, $p < 0.001$). In the analysis of the current series of 2021, no significant variation of Cl with Total Coliforms and E. coli was observed, being this result paradoxically opposite for the years 2016, 2017 and 2019. In the application of coagulants and polymers in jar tests, failures were observed operational dosages, indicating inefficiency in the control of chemical inputs at ETAM. We concluded that the variation of the water quality parameters of the historical series is dependent on operational factors (ETA, Stage, Hour, Day and Year). However, the hypothesis of improved water quality after the expansion of ETA2 was not confirmed ($p < 0.01$). That is, the modernization of the infrastructure did not positively impact the overall efficiency of ETAM. On the contrary, the quality of the treated water did not meet those established by Ordinance GM/MS No. 888, of 05/4/2021. That is, ETA3 was not more efficient in disinfection by Cl than the first ones. Thus, the hypothesis that the improvement of the ETAM infrastructure did not directly impact the efficiency and compliance of the produced water quality standards is confirmed. This fact reduced its operational potential and did not lead to an increase in the operational efficiency of unit operations.

Keywords: Water Supply; Jar Test; Monitoring; Time Series; Amazonian.

Topic: Engenharia Sanitária

Received: 05/06/2022

Approved: 29/06/2022

Reviewed anonymously in the process of blind peer.

João Paulo Santos Amaral 
Universidade Federal do Amapá, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/7918448218742630>
<http://orcid.org/0000-0001-7166-1795>
joaoamrl@gmail.com

Alan Cavalcanti da Cunha 
Universidade Federal do Amapá, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/2181817533284030>
<http://orcid.org/0000-0002-1846-9486>
alancunha@unifap.br



DOI: 10.6008/CBPC2179-6858.2022.006.0010

Referencing this:

AMARAL, J. P. S.; CUNHA, A. C.. Qualidade da água em diferentes fases operacionais da estação de tratamento de água de Macapá. **Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais**, v.13, n.6, p.107-124, 2022. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2022.006.0010>

INTRODUÇÃO

A eficiência do sistema de abastecimento de água está diretamente relacionada com a qualidade de vida da população (TSUTYIA, 2006). Mas o crescimento populacional e a demanda por água potável, associada com a falta de investimento no setor e aumento da poluição dos mananciais como os esgotos sanitários, têm deteriorado as condições operacionais dos sistemas de abastecimento de água em muitos municípios brasileiros. Neste contexto, o Estado do Amapá tem apresentado indicadores sanitários e de saúde pública ruins (ARAÚJO et al., 2021; VIEGAS et al., 2021; SOUSA et al., 2021; GROTT et al., 2018).

Deste modo, até os mananciais de abastecimento na Amazônia têm se tornado cada vez mais pressionados e poluídos, e até agravados pelos crescentes impactos das mudanças climáticas traduzidas pelos alagamentos, enchentes que causam frequentes problemas ambientais e sanitários que contribuem com a problemática da qualidade da água de abastecimento na região, cujos prejuízos em alguns casos superam o orçamento municipal anual (PINHEIRO et al., 2008; VIEGAS et al., 2021; SOUSA et al., 2021) com em Laranjal do Jari em 2000 (OLIVEIRA et al., 2014; OLIVEIRA et al., 2015). Todos estes fatores têm gerado debates e reflexões sobre a vulnerabilidade e a natureza finita dos recursos hídricos (BEZERRA et al., 2019), limitando seus usos no saneamento básico. Esse fato é revelador ao se observar os principais indicadores de abastecimento de água, resíduos sólidos, sistemas de drenagem e esgotamento sanitário na Amazônia, especialmente no Amapá (VIEGAS et al., 2021; ARAÚJO et al., 2021; SOUSA et al., 2021; FLORES et al., 2022).

O estado do Amapá apresenta um dos piores índices de saneamento básico do Brasil (BRASIL, 2021). E mesmo na capital Macapá historicamente estes índices têm sido mantidos baixos, principalmente na dimensão de abastecimento de água (CUNHA et al., 2004; CUNHA et al., 2005; ARAÚJO et al., 2021). Esse problema decorre de vários fatores, mas é possível destacar a crescente poluição que compromete a qualidade da água dos mananciais devido à falta ou deficiência de saneamento básico (OLIVEIRA et al., 2019), cujos reflexos são revelados nos indicadores de qualidade de vida da população, manifestando-se em forma de surtos de doenças de notificação compulsória de transmissão hídrica — NCTH (VIANA et al., 2016; VIEGAS et al., 2021; SOUSA et al., 2021).

Esse quadro atual do saneamento básico no estado do Amapá não somente é um reflexo da histórica falta de planejamento e investimento nesse setor (CUNHA et al., 2012; BRASIL, 2021; GROTT et al., 2021; ARAÚJO et al., 2021), mas também é resultado de uma profunda deterioração da infraestrutura e da falta de investimentos e políticas públicas eficientes que dificultam a sua própria existência e funcionamento, mesmo nas sedes municipais. Mas esta tendência se agrava nas zonas rurais do interior do estado (UNIFAP, 2021; ARAÚJO et al., 2021). Dentre as infraestruturas mais deficitárias é possível citar as Estações de Tratamento de Água (ETA) e as redes de distribuição como as mais proeminentes.

Contudo, legalmente é ainda necessário que os sistemas de abastecimento de água atendam minimamente aos parâmetros de potabilidade da água para consumo humano, atualmente representado pelos indicadores da Portaria nº 888 do Ministério da Saúde de 4 de maio de 2021. Na Portaria constam os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água, inclusive detalhes e exigências a serem

cumpridas ao longo das operações unitárias das ETAs, como cloração e pós-cloração (BRASIL, 2021).

No entanto, na prática, nem sempre é possível manter os padrões legais previstos na lei, sendo necessário monitorar continuamente cada uma das etapas operacionais das ETA. Este é um procedimento legalmente definido para verificar sua variação durante cada etapa dos processos de tratamento (VON SPERLING, 2005; TSUTYIA, 2006; KERRY et al., 2012). No caso da água bruta do Baixo Rio Amazonas, que alimenta o sistema de captação da Estação de Tratamento de Água de Macapá (ETAM), é possível observar tanto a influência hidrológica (sazonal - grande escala) quanto das marés semidiurnas (microescala), frequentemente influenciadas pela precipitação sazonal e biogeoquímica regional que modificam significativamente sua qualidade (PINHEIRO et al., 2008; ABREU et al., 2020; OLIVEIRA et al., 2019).

O principal sistema de abastecimento de água do Estado do Amapá é a ETAM. Até 2021 era operada pela Companhia de Água e Esgoto do Amapá (CAESA). Mas, atualmente, foi desestatizada em função de sua histórica ineficiência, problemas de qualidade da água e deficiência da capacidade de distribuição em vários bairros de Macapá. Dessa forma, a prestação de serviço está sendo substituída em todas as sedes municipais pela nova Concessionária Saneamento Amapá (CSA), formada pelas empresas Equatorial Participações e Investimentos III S.A. e SAM Ambiental e Engenharia, a qual está assumindo a operação das ETAs nas sedes municipais em todo o Estado do Amapá a partir de então (UNIFAP, 2021).

Essa nova concessão está ocorrendo também sob a ótica do novo marco legal do saneamento básico, amparado na Lei nº 14.026/2020 (BRASIL, 2020), cujo objetivo é “universalizar” o saneamento básico no Brasil através do aumento da competitividade entre o setor público e privado visando viabilizar o melhor custo-benefício do serviço prestado para os usuários. Assim, o processo de nova concessão pelos próximos 35 anos tem o desafio de superar as limitações de infraestrutura e operacionais nos municípios, focado na superação do histórico déficit da demanda de serviços básicos de saneamento no Amapá, principalmente água e esgoto (ARAÚJO et al., 2021; VIEGAS et al., 2021).

No presente estudo, o foco principal é verificar a conformidade dos padrões da qualidade da água de abastecimento da ETAM em diferentes fases ou etapas de tratamento. Isto é, influenciada pela dinâmica operacional, sendo uma inédita contribuição aos estudos de saneamento básico do Estado do Amapá, avaliando-se parâmetros-chave da qualidade da água (Cloro (Cl), pH, Turbidez e Cor Aparente, e eventualmente coliformes totais e *Escherichia Coli*) nas três subestações de tratamento da água (ETA 1, ETA 2 e ETA 3 ao longo de suas respectivas etapas operacionais (coagulação, floculação, decantação, filtração e desinfecção).

A nossa hipótese principal a ser testada estatisticamente é que a variação de parâmetros-chave depende da idade da infraestrutura da ETA e do estágio operacional unitário. Além disso, o grau de conformidade legal da qualidade da água frente à Portaria MS nº 888/2021 deve melhorar com a modernização da ETA. Isto é, com a evolução das séries históricas disponíveis (2016, 2017 e 2019 - julho e agosto), culminando em períodos mais recentes a partir de construção de infraestruturas mais novas e modernas (avaliação *in situ* em 2021). Complementarmente, foi testado o pH ótimo (*Jar test*) para o qual a concentrações de coagulantes seriam ótimas, sugerindo um nível de tratamento ideal. Isto é, a eficiência do

tratamento na fase de desinfecção (Cl) com as melhorias infra estruturais estaria legalmente mais compatível com a Portaria (Portaria MS nº 888/2021) na medida em as ETAs 1, 2 e 3 fossem implementadas.

METODOLOGIA

Este trabalho tem como embasamento dois bancos de dados: o primeiro são os dados das séries históricas disponíveis de qualidade da água tratada da ETAM fornecidos pela CAESA e referentes aos meses de julho e agosto dos anos de 2016, 2017 e 2019. Para comparações, os dados complementares obtidos *in situ* foram coletados em quatro campanhas realizadas em julho e agosto de 2021. O objetivo foi possibilitar a comparação com as das séries históricas anteriores. As séries históricas de 2016 a 2019 apresentaram 3243 unidades amostrais (N = 3243 amostras, incluindo-se todos os parâmetros de qualidade da água).

As variáveis selecionadas foram apenas os parâmetros-chave de tratamento na ETA, obtidas ao longo das fases de tratamento da água de abastecimento, mas coincidentes com os da Portaria do MS (Cl, Turbidez, Cor Aparente e pH). Por outro lado, os dados coletados em 2021, além desses, incluíram coliformes totais termotolerantes (coliformes totais) e *E. coli*. Na coleta de 2021 foram realizadas coletas mais detalhadas de amostras de água nas etapas específicas de tratamento (água bruta, floculada, decantada, filtrada e tratada).

Descrição da Estação de Tratamento de Água de Macapá (ETAM)

A Estação de Tratamento Água de Macapá (ETAM) está localizada no bairro do Trem, a 700 m da orla do Rio Amazonas, no perímetro urbano compreendido entre as ruas Jovino Dinoá e Odilardo Silva e avenidas 13 de setembro e Clodóvio Coelho. As coordenadas geográficas são 0.0231, -51.0600 (OLIVEIRA et al., 2019).

A ETAM opera atualmente com três módulos de tratamento de água: Estação de Tratamento de Água 1 (ETA 1), Estação de Tratamento de Água 2 (ETA 2) e Estação de Tratamento de Água 3 (ETA 3) (Figura 1).

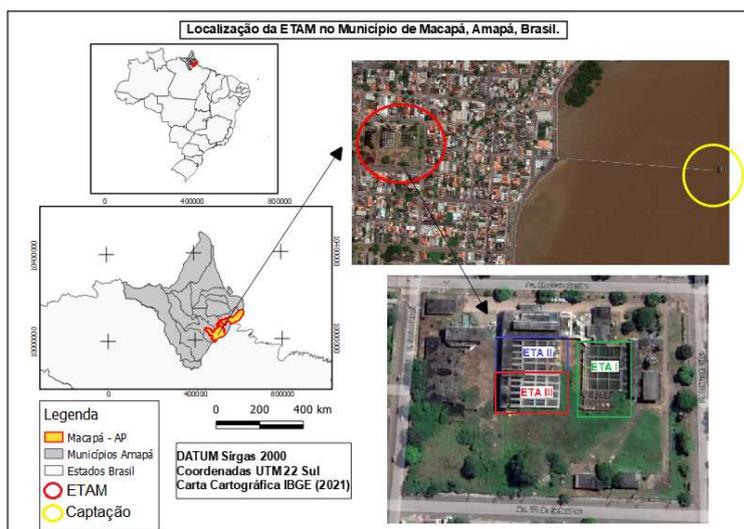


Figura 1: Localização da ETAM e dos módulos de tratamento (ETAs 1, 2 e 3). Fonte: Software QGIS3 e Google Maps (adaptado) (2022).

A partir da planta baixa da ETAM (Figura 2) é possível compreender a dinâmica e o fluxo de operação no sistema de tratamento de água.

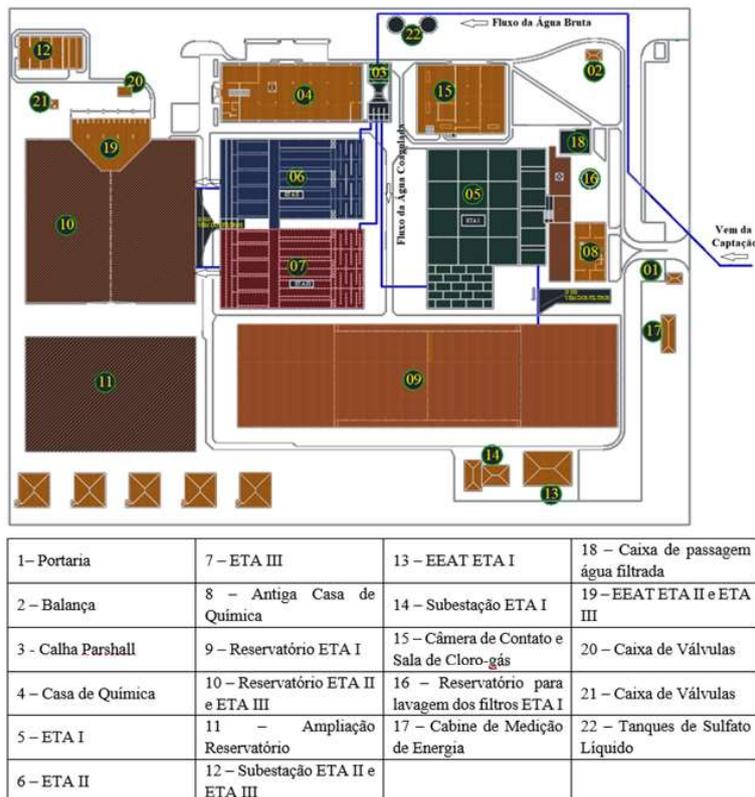


Figura 2: Localização dos módulos de tratamento (ETA 1, 2 e 3) na ETAM. Fonte: Google Earth (adaptado) (2022).

Destaca-se que a qualidade da água tratada das ETAs 2 e 3 é uma média do tratamento dessas duas ETAs. Ambas abastecem o mesmo reservatório. Desta forma, quando se refere à água tratada da ETA 2 ou ETA 3, nos referimos à água tratada da ‘ETA 23’, como indicado pelo fluxograma apresentado na figura 3.

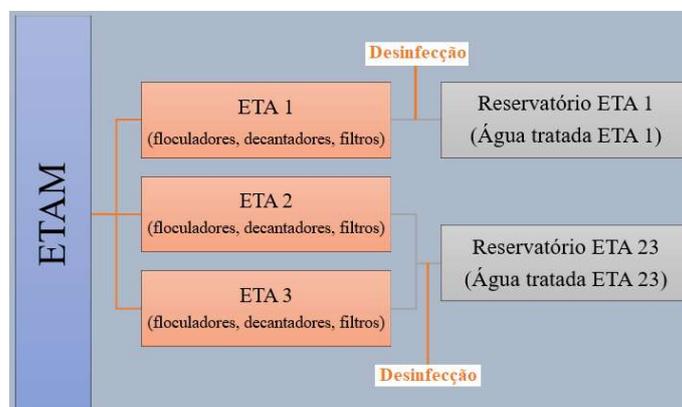


Figura 3: Localização dos módulos de tratamento (ETA 1, 2 e 3) na ETAM. Fonte: Google Earth (adaptado) (2022).

Dinâmica Operacional das ETAs 1, 2 e 3

Conforme indicado pelas figuras 1, 2 e 3, atualmente a ETAM conta com três módulos de tratamento (ETA 1, ETA 2 e ETA 3) abastecidos a partir da única calha Parshall da ETAM (item 3, figura 2). É importante ressaltar que o processo de coagulação é iniciado a partir da adição do coagulante no vertedor da calha Parshall, o qual é responsável pela mistura do coagulante com a massa líquida a partir da própria agitação proporcionada pelo formato construtivo do vertedor. O reagente coagulante é o Sulfato de Alumínio ($Al_2(SO_4)_3$), utilizado na forma líquida (solução 50% v/v) e/ou a partir de solução preparada *in situ* quando na forma sólida (embalagens de 25 Kg), produtos fornecidos pela empresa BAUMINAS QUÍMICA LDTA.

Na ETA 1 o processo inicia-se com a entrada de água já coagulada nos floculadores do tipo hidráulico de chicanas com fluxo vertical. Posteriormente ocorre a etapa de decantação. A ETA 1 é composta por 4 módulos de decantação dispostos de três decantadores do tipo convencional (piscinões) onde a água possui um fluxo laminar e ascendente e é coletada por calhas localizadas próximas à superfície e que direcionam a água para os respectivos filtros (figura 4).

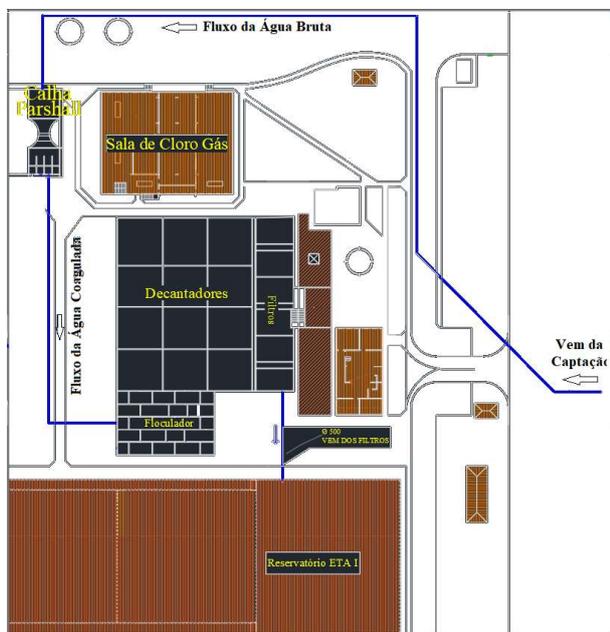


Figura 4: Planta baixa ETA 1.

Fonte: CAESA (adaptado) (2021).

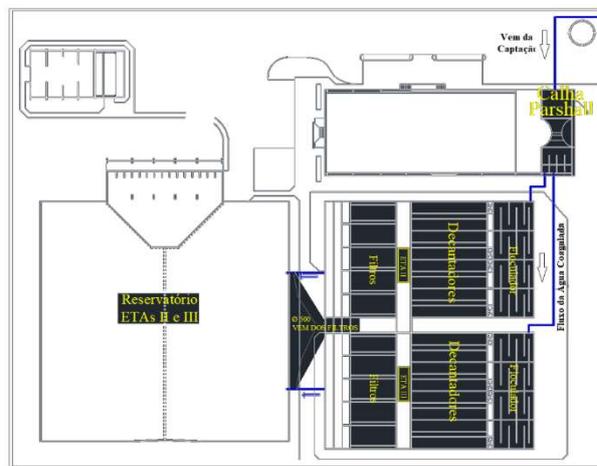


Figura 5: Planta baixa ETAs 2 e 3.

As ETAs 2 e 3 operam de forma semelhante, por apresentarem o mesmo modelo construtivo. Na realidade, a ETA 3 é uma expansão e duplicação da ETA 2. Ambas funcionam com quatro módulos de floculação do tipo hidráulico de chicanas com fluxo vertical. Os decantadores contam com 4 módulos de decantação dispostos paralelamente e cada módulo conta com dois decantadores, conforme observado na figura 5. A coleta da água decantada ocorre através de tubos perfurados submersos próximos à superfície, e depois é direcionada para calha coletora e levada para os filtros.

A planta baixa das ETA 2 e 3 (figura 5) ajuda a entender o processo durante as etapas do tratamento. Após a filtração, a água é desinfetada e ambas as ETAs abastecem o mesmo reservatório, ou seja, ocorre a mistura do líquido proveniente dessas unidades operacionais. Por esse motivo não há resultado da água tratada individuais da ETA 2 ou ETA 3. Portanto, a água tratada é denominada de ETA 23 (conforme apresentado no fluxograma da figura 3).

Jar Test para avaliar o pH ótimo de coagulação

A concentração ótima para a dosagem do coagulante é calculada a partir do Teste de Jarros realizado periodicamente no laboratório da CAESA. O Teste de Jarros, ou “Jar-Test”, é um ensaio feito em bancada, que reproduz as condições do processo de coagulação, floculação e decantação da ETA, objetivando a condição operacional de melhor eficiência possível, considerando-se as características da água a ser tratada, com a aplicação parcimoniosa dos reagentes e com o controle dos parâmetros durante o processo (TSUTUYIA,

2006).

A dinâmica do *Jar Test* consiste em coletar amostras da água bruta a ser tratada e dosar diferentes concentrações do coagulante (ou outra substância que possa ser verificada) em cada amostra. Durante o ensaio são mantidas as rotações e ao mesmo tempo de contato do reagente com a massa líquida em todos os jarros. Após o término do processo comparam-se os parâmetros (cor aparente, pH, turbidez) da amostra com os parâmetros da água. Após o ensaio, analisa-se qual concentração do coagulante apresentou melhor resultado (maior transparência da água bruta após adição de coagulante) (KERRY et al., 2012; TSUTYIA, 2006).

Pontos de Coleta e Análises Laboratoriais - Fase atual (2021)

Foram realizadas quatro campanhas de coleta de amostras em cada etapa do tratamento (água bruta, floculação, decantação, pós filtro e água tratada) nas três ETAs. As campanhas foram feitas em quatro dias diferentes: dia 20/07/2021, dia 28/07/2021, dia 04/08/2021 e dia 20/08/21. Os parâmetros-chave da qualidade da água e os equipamentos utilizados foram: pH (medidor de pH sensION+ PH31), turbidez (turbidímetro Policontrol AP2000), cor aparente e cloro (espectrofotômetro HACH DR/3900), coliformes totais e *Escherichia Coli* (método Colilert - IDEXX), sendo que a concentração do cloro foi considerada apenas na água tratada e as análises bacteriológicas foram feitas apenas na água bruta, na água pós filtro e na água tratada (pós desinfecção).

Testes de Hipóteses para variação físico-química da qualidade da água na ETAM/Operação Unitária

Os dados de parâmetros da qualidade da água e operacionais foram tabulados e organizados para realizar uma série de testes e análises estatísticas uni e multivariadas. Para esse objetivo nós utilizamos o software R-Project e significância de 95% ($\alpha < 0,05$). Testes de Shapiro-Wilk, Levene e VIF foram inicialmente aplicados para avaliar as premissas de normalidade e homoscedasticidade e inflação da variância em caso de variáveis independentes colineares. O teste da inflação da variância (VIF < 10%) evita excessiva colinearidade em análises de correlações multivariadas (CRAWLEY, 2007).

Análises de regressão simples e múltiplas das variáveis-chave de tratamento na ETAM foram realizadas para avaliar a explicabilidade de variáveis ou fatores independentes segundo as etapas operacionais nas diferentes ETAs da ETAM. O método de Kruskal-Wallis testou as múltiplas comparações da série temporal entre 2016, 2017 e 2019 e a série complementar atual de 2021.

RESULTADOS

Jar Test

A partir dos três ensaios de *Jar Test* avaliou-se a eficiência do teste de coagulação (dosagem com ótima concentração) segundo o nível de tratamento operacional e parâmetro da qualidade da água atual. O equipamento disponível no laboratório da CAESA conta com 6 jarros de 2 L para a realização dos testes.

No primeiro ensaio experimental foi utilizado apenas o coagulante sulfato de alumínio na

concentração de 10mg/L. No segundo ensaio foram utilizados dois reagentes, o sulfato de alumínio, nas mesmas concentrações do ensaio anterior, e o polímero com concentração de 0,25 mg/L. O terceiro ensaio foi realizado com três soluções simultâneas: sulfato de alumínio (10 mg/L), polímero (0,25 mg/L) e cal (10 mg/L).

A tabela 1 resume o resultado do melhor jarro de cada ensaio.

Tabela 1: Melhores resultados de cada Jar Test.

Experimento	Melhor Resultado	Reagentes	Concentração	pH	Turbidez	Cor
Jar Test 1	Jarro 4	Sulfato de Alumínio	5 mL => 25 mg/L	5,87	1,54	9
Jar Test 2	Jarro 4	Sulfato de Alumínio	5 mL => 25 mg/L	5,80	1,83	7
		Polímero	1 mL => 0,25 mg/L			
Jar Test 3	Jarro 5	Sulfato de Alumínio	6 mL => 30 mg/L	6,04	1,84	10
		Polímero	1 mL => 0,25 mg/L			
		Cal	4 mL => 10 mg/L			

Parâmetros da Qualidade da Água da ETAM/CAESA em cada etapa (2021)

Para entender quantitativamente o processo de tratamento da água na ETAM CAESA foram realizadas quatro campanhas de coleta durante o mês de julho e agosto de 2021 (dia 20/07/2021 - experimento 1; dia 28/07/2022 - experimento 2, dia 04/08;2021 - experimento 3; e dia 20/08/21 - experimento 4).

Água Bruta (2021)

A Tabela 2 mostra os parâmetros relevantes monitorados ao longo do período de julho e agosto de 2021. Como o manancial que alimenta a ETAM é o Rio Amazonas, percebe-se uma cor aparente elevada (223 < cor aparente < 430), elevado número de coliformes totais (CT > 2419,6) e E. coli (26 < E. coli < 325,5).

Tabela 2: pH, Turbidez, Cor Aparente, Coliformes Totais e Escherichia Coli da Água Bruta (Captação).

Experimento	pH	Turbidez (uT)	Cor Aparente (uH)	Coliformes Totais (NMP/100 mL)	E. coli (NMP/100 mL)
1	6,36	29,9	400	> 2419,6	126,7
2	6,37	24,5	363	77	26,6
3	6,40	15,7	223	> 2419,6	325,5
4	6,47	28,9	430	1732,9	1733

Água Floculada (2021)

A Tabela 3 apresenta os parâmetros relevantes monitorados ao longo do período de julho e agosto de 2021. Uma análise de variância não-paramétrica multicomparativa (Kruskal-Wallis) entre os parâmetros cor aparente, turbidez e pH resultou em não significativa entre as três ETAs ($p > 0,05$), sugerindo desempenho similar para estes parâmetros da qualidade da água neste período e nestas condições atuais.

Tabela 3: pH, Turbidez e Cor da Água Floculada (ETAs 1, 2 e 3).

Experimento	ETA 1			ETA 2			ETA 3		
	pH	Turb (uT)	Cor (uH)	pH	Turb (uT)	Cor (uH)	pH	Turb (uT)	Cor (uH)
1	5,82	35,1	412	6,06	25,6	274	5,82	35,1	412
2	5,80	29,6	359	6,04	26,6	332	5,80	29,6	359
3	5,88	17,7	189	5,76	16,7	191	5,88	17,7	189
4	5,73	33,3	396	5,86	32,6	472	5,73	33,3	396

Água Decantada (2021)

A Tabela 4 mostra os parâmetros relevantes da operação de decantação monitorados ao longo do período de julho e agosto de 2021. Uma análise de variância não-paramétrica multicomparativa (Kruskal-Wallis) mostrou que a cor aparente, turbidez e pH não resultaram em significativa diferença estes parâmetros da qualidade da água ($p > 0,05$), sugerindo também desempenho similar nas três ETAs.

Tabela 4: pH, Turbidez e Cor da Água Decantada (ETAs 1, 2 e 3).

Experimento	ETA 1			ETA 2			ETA 3		
	pH	Turb (uT)	Cor (uH)	pH	Turb (uT)	Cor (uH)	pH	Turb (uT)	Cor (uH)
1	5,93	3,61	35	5,88	2,42	16	4,83	4,65	14
2	5,87	5,55	50	5,87	1,59	0	5,68	1,74	0
3	5,93	3,03	7	5,90	2,41	5	5,64	3,35	15
4	5,88	2,06	17	5,60	2,46	22	5,76	2,24	25

Água Filtrada (2021)

A Tabela 5 apresenta os parâmetros relevantes da água filtrada monitorados ao longo do período de julho e agosto de 2021, incluindo-se Coliformes Totais e E. coli. Uma análise de variância não-paramétrica multicomparativa (Kruskal-Wallis) entre os parâmetros cor aparente, turbidez, pH, Coliformes Totais e E. coli, resultou em não significativa ($p > 0,05$), sugerindo desempenho similar nas três ETAs para estes cinco parâmetros da qualidade da água.

Tabela 5: pH, Turbidez, Cor, Coliformes Totais e Escherichia Coli da Água Pós-Filtro (ETAs 1, 2 e 3).

Experimento	ETA 1					ETA 2					ETA 3				
	pH	Turb (uT)	Cor (uH)	C. Totais (NMP)	E. Coli (NMP)	pH	Turb (uT)	Cor (uH)	C. Totais (NMP/100mL)	E. Coli (NMP/100 mL)	pH	Turb (uT)	Cor (uH)	C. Totais (NMP/100mL)	E. Coli (NMP)
1	5,84	3,53	41	107,6	9,8	5,95	3,42	31	>2419,6	21,8	5,58	1,95	0	218,7	< 1
2	5,87	6,65	62	139,6	< 1	5,96	4,4	31	3,1	< 1	5,73	1,81	0	46,5	3,1
3	5,98	7,68	78	816,4	26,6	6,02	3,21	29	107,6	26,6	5,16	1,33	0	9,8	3,1
4	5,98	3,69	37	26,2	10,8	5,78	5,47	58	96	25,9	5,93	1,37	2	36,9	6,3

Água Tratada (2021)

A inauguração da ETA 3 resultou em uma ampliação da ETA 2, por esse motivo não foi possível determinar o resultado exato ou independente da água tratada da ETA 3, separadamente da ETA 2. Desta forma o resultado da água tratada da ETA 2 e ETA 3 é representado neste caso pela ETA 23 (tabela 6).

Os dados em negrito na tabela 6 correspondem aos parâmetros que estão dentro do limite de potabilidade estabelecido pela legislação (Portaria 888 do MS/2021) (BRASIL, 2021).

Tabela 6: pH, Cloro (Cl), Turbidez (Turb), Cor, Coliformes Totais (CT) e Escherichia Coli (E. Coli) da Água Tratada (ETA 1 e ETA 2/3).

Experimento	ETA 1							ETA 23						
	pH	Cl (mg/l)	Turb (uT)	Cor (uH)	C. Tot. (NMP/100mL)	E. Coli (NMP/100mL)		pH	Cloro (mg/l)	Turb (uT)	Cor (uH)	C. Tot. (NMP/100mL)	E. Coli (NMP/100mL)	

1	5,64	1,4	4,43	44	< 1	< 1	5,54	1,5	3,2	11	< 1	< 1
2	5,84	0,63	6,55	61	< 1	< 1	5,76	0,7	4,9	26	< 1	< 1
3	5,93	0,8	6,62	58	< 1	< 1	5,42	1,26	4,21	53	34,1	< 1
4	5,95	1,0	3,78	35	< 1	< 1	5,80	1,42	2,97	16	< 1	< 1

Conformidade dos Resultados com o Padrão de Potabilidade (MS 888/2021) - Todas as séries

Durante os anos de 2016 e 2017, a ETAM operava apenas com a ETA 1 e ETA 2. Nas tabelas 7 e 8, os dados em negrito correspondem à porcentagem de amostras que se adequaram ao padrão de potabilidade.

Tabela 8: Conformidade da Água Tratada das ETA 1 e ETA 2 (2017) com o Padrão de Potabilidade.

2016									
	ETA 1				ETA 2				
	pH	Turb (uT)	Cor (uH)	Cl (mg/l)	pH	Turb (uT)	Cor (uH)	Cl (mg/l)	
Quantidade de amostras	365	364	360	366	372	371	366	373	
Média do Parâmetro	5,23	1,45	22	1,61	5,25	6,12	72	1,6	
Limite exigido	6 - 9	< 0,5	<15	0,2 - 2	6 - 9	< 0,5	<15	0,2 - 2	
Em conformidade (% amostras)	0,5	33,8	44,4	100	0,2	3,5	4	99,1	

Tabela 7: Conformidade da Água Tratada das ETA 1 e ETA 2 (2016) com o Padrão de Potabilidade.

2017									
	ETA 1				ETA 2				
	pH	Turb (uT)	Cor (uH)	Cl (mg/l)	pH	Turb (uT)	Cor (uH)	Cl (mg/l)	
Quantidade de amostras	378	378	378	378	376	3,76	376	376	
Média	5,86	1,90	20	1,37	6,04	6,34	66	1,24	
Limite exigido	6 - 9	< 0,5	<15	0,2 - 2	6 - 9	< 0,5	<15	0,2 - 2	
Em conformidade (% amostras)	36,2	13	59,2	93	47,3	0,5	7,4	99,5	

A partir dos dados de 2019 houve a expansão da ETAM com a inauguração da ETA 3. A ETA 3 representou a duplicação da capacidade de tratamento da ETA 2. Desta forma, a quantidade e a qualidade da água tratada passaram por uma mudança infra estrutural significativa (ETA 23).

As tabelas 9 e 10 apresentam dados da ETAM após a ampliação do sistema. Destaca-se que com o início da operação da ETA 3 houve uma melhora significativa na média dos parâmetros de cor aparente e turbidez da ETA 23, porém também ainda não o suficiente para que mantivesse dentro do padrão exigido.

Tabela 9: Conformidade da Água Tratada das ETA1 e ETA 23 (2019).

2019									
	ETA 1				ETA 23				
	pH	Turb (uT)	Cor (uH)	Cl (mg/l)	pH	Turb (uT)	Cor (uH)	Cl (mg/l)	
Quantidade de amostras	318	318	318	318	320	320	313	320	
Média	5,79	3,55	35	0,82	5,84	4,76	48	0,87	
Limite exigido	6 - 9	< 0,5	<15	0,2 - 2	6 - 9	< 0,5	<15	0,2 - 2	
Em conformidade (% amostras)	30,5	0,3	26,1	85,5	32,5	0,3	10	90	

Tabela 10: Conformidade da Água Tratada das ETAs 1 e 23 (2021) com o Padrão de Potabilidade.

2021													
	de	ETA 1						ETA 23					
		pH	Turb (uT)	Cor (uH)	Cl (mg/l)	pH	Turb (uT)	Cor (uH)	Cl (mg/l)	pH	Turb (uT)	Cor (uH)	Cl (mg/l)
Quantidade amostras	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Média		5,76	5,3	49,5	0,95	< 0	< 0	5,63	3,82	26,5	1,22	8,5	< 0

Limite exigido	6 - 9	< 0,5	<15	0,2 - 2	Ausência em 100 mL	em	6 - 9	< 0,5	<15	0,2 - 2	Ausência em 100 mL	em
Em conformidade (% amostras)	0	0	0	100	100	100	0	0	25	100	75	100

Análise estatística (Série Histórica 2016 a 2019)

A tabela 11 abaixo representa a análise quantitativa dos testes de hipóteses referentes às influências de variáveis independentes ou fatores independentes sobre as variáveis-chave (Cl, Cor Aparente, Turbidez e pH) na ETAM (ETAs 1, 2 e 3) (series históricas publicamente disponíveis da CAESA em 2016, 2017 e 2019).

De acordo com os resultados da Tabela 10 a análise de Kruskal-Wallis confirmou as seguintes hipóteses: a) todas as variáveis e fatores independentes, com exceção da variável “Mês” influenciaram significativamente a principal variável dependente (Cloro - Cl) ($p < 0,05$). De fato, as diferentes etapas das operações unitárias, os períodos horários, diários e anuais influenciaram significativamente a variação da eficiência do processo de cloração (onde este ocorreu).

Tabela 11: Teste não-paramétrico de Kruskal-Wallis para a variável cloro residual livre [Cl] segundo influências de parâmetros e fatores intervenientes da qualidade da água potável da ETA de Macapá-AP/Amapá/Brasil.

Parâmetro Dependente	Resumo Descritivo	Kruskal-Wallis test	Comentários
Cl (mg/L) (Média 1,24 ± 0,57)			
Parâmetros Independentes (i)	Média ± DP $\chi^2_{(GL)}$	p -value	
Hora (do dia)	Média = 12,69 ± 3,44 $\chi^2_{(GL=8)} = 27.30$	0.00063 ***	Houve influência da hora do dia na concentração de Cl ($p < 0,05$)
Dia (do mês)	Média = 15,77 ± 8,97 $\chi^2_{(GL=30)} = 151.88$	< 0,0011 ***	Houve influência do dia do mês na concentração de Cl ($p < 0,05$)
Mês	Média = 15,75,00 ± 1 $\chi^2_{(GL=172)} = 1.35$	0.2458 NS	Não houve influência do mês do ano (Jul/Ago) na concentração de Cl ($p > 0,05$). Restrita somente a este período do ano.
Ano	Média = 2017,15 ± 1,22 $\chi^2_{(GL=2)} = 718,75$	< 0,0001 ***	Houve diferenças significativas na concentração de Cl entre os diferentes períodos (2016, 2017 e 2019) ($p < 0,05$)
Etapas Operacional	Média = 226,41 ± 1 $\chi^2_{(GL=2)} = 226.41$	< 0,0001 ***	As diferentes etapas operacionais influenciam significativamente na concentração de Cl ($p < 0,05$)
ETA (1, 2 ou 23)	Média = 226,41 ± 1 $\chi^2_{(GL=2)} = 221.36$	< 0,0001 ***	Houve variações significativa da concentração de Cloro com a expansão das novas ETAs ($p < 0,05$). Porém, em caso da ETA 23, foi para pior.
Turbidez (NTU)	Média = 12,00 ± 1 $\chi^2 = 971.15$, df = 854	0.00316 **	Houve variações significativa da concentração de Cl com a variação da turbidez nas diferentes unidades operacionais e ETAs ($p < 0,05$)
Cor Aparente (mg Co)	Média = 109,00 ± 141 $\chi^2_{(GL=172)} = 221.36$	0.00661**	Houve variações significativa da concentração de Cl com a variação da cor aparente nas diferentes unidades operacionais e ETAs ($p < 0,05$)
pH	Média = 44,00 ± 1 $\chi^2_{(GL=268)} = 601.64$	< 0,001 ***	Houve variações significativa da concentração de Cl com o pH nas diferentes unidades operacionais e ETAs ($p < 0,05$)
Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1			

As diferenças entre as etapas operacionais, ou a ETA específica (1, 2 ou 3), podem ser observadas no gráfico multicomparativo da Figura 6a-b (Eta-Eta e trat-trat) sugerindo, respectivamente, que estas diferem significativamente entre si ($p < 0,05$). A distância dos intervalos em relação a linha vertical segmentada indica a significância comparativa. Isto é, quanto mais distantes os intervalos são da linha de confiança vertical mais significativa é a diferenças entre os tratamentos (ETA_i-ETA_j ou Trat_i-Trat_j) (Figura 6^a-b).

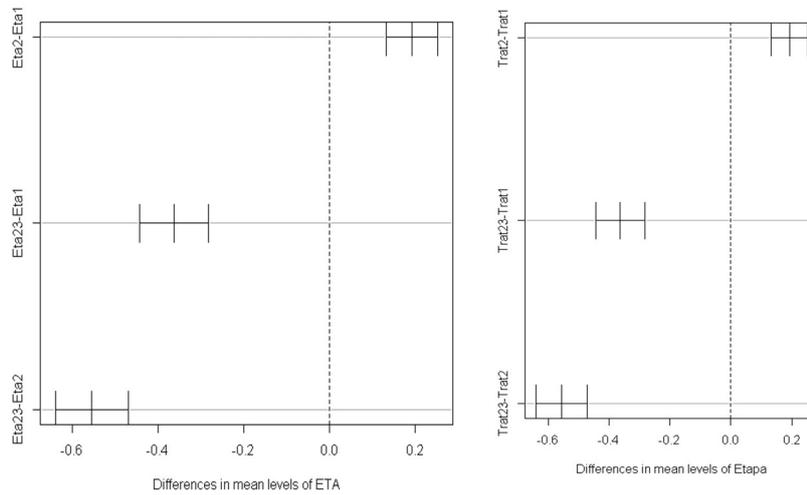


Figura 6a-b: Teste multicomparativo não-paramétrico de Kruskal-Wallis: a) considerando os diferentes fatores “ETA” e b) estágio operacional intervenientes “trat” na qualidade da água potável - ETAM-AP/Amapá/Brasil.

Esta observação pode também ser confirmada pelos gráficos (box-plot) (Figura 6c-d) de modo similar. Os gráficos box-plot indicam mais realisticamente os intervalos comparativos (ETA_i-ETA_j ou $Trat_i-Trat_j$) em relação ao centro do retângulo do box-plot, sendo mais significativa quanto maiores forem as diferenças entre as medianas ou intervalos interquartílicos.

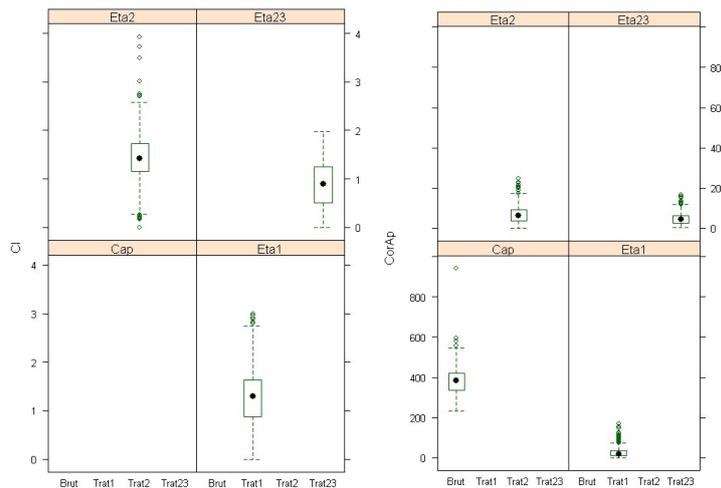


Figura 6c-d: Variações dos parâmetros-chave da qualidade da água da ETAM c) CI x Etapa; d) Cor Aparente x Etapa.

DISCUSSÃO

A água bruta da captação que abastece as ETAs 1, 2 e 3 apresentou valores significativamente diferentes para turbidez nos meses de julho e agosto nos quatro anos analisados, sendo os resultados significativos (Kruskal-Wallis, p -valor $< 0,001$). Mas esta característica é típica do comportamento e variação da qualidade da água no Baixo Rio Amazonas (OLIVEIRA et al., 2019; VIEGAS et al., 2021; SOUSA et al., 2021).

Durante o monitoramento experimental realizado em cada etapa do tratamento em 2021, após filtros nas ETAs 1 e 2, a turbidez foi maior que no da saída dos decantadores destas ETAs. E apenas os filtros da ETA 3 progrediram no resultado com relação a este parâmetro (tabela 5). A turbidez, no entanto, ficou fora dos limites legais pré-estabelecidos (Portaria 888/21), provavelmente associada com fatores como falhas operacionais e falta de manutenção preventiva e corretiva na ETAM, principalmente nas etapas de

decantação e filtração, quando ainda há elevada concentração de partículas em suspensão (LOPES et al., 2020). Esse problema põe em risco a qualidade da água favorecendo potencial aumento da concentração bacteriológica e aumento da probabilidade da presença residual de parasitas e vírus na água, os quais causam doenças de veiculação hídrica à população que as consomem (ARAÚJO, 2021; VIEGAS et al., 2021).

A média dos valores de turbidez na saída do filtro da ETA 1 durante as análises experimentais de 2021 ficou em 5,38 uT e o da ETA 2 em 4,11 uT (tabela 5). Estes valores ficaram acima do estabelecido na legislação (BRASIL, 2021) vigente de potabilidade (0,5 uT) na saída dos filtros (Portaria 888/21). Além disso, nem a água filtrada da ETA 3 apresentou resultado legal esperado, com média de 1,61 uT.

A turbidez da água tratada da ETA 1 (2021) não apresentou diferença significativa na etapa pós-filtro (Kruskal-Wallis p-valor = 1,000). Também na água tratada da ETA 2 (2021) ocorreu sensível melhora, mas também não significativa (p-valor = 0,386). Exceto na ETA 3 (2021) houve uma inesperada piora estatisticamente significativa (p-valor = 0,021) para a turbidez. Esta variação pode ser explicada pelo fato das duas ETAs dividirem o mesmo reservatório sendo o resultado da água tratada uma média do tratamento da ETA 2 e ETA 3 simultaneamente. O resultado esperado seria a redução da turbidez, e não o contrário.

Quando se considera o monitoramento após os filtros é possível afirmar, conforme a tabela 6, que 100% das amostras analisadas na saída das ETAs 1, 2 e 3 estavam fora dos padrões de potabilidade (amostras coletadas *in situ* 2021) (Portaria 888/21). O valor legal estabelecido na legislação vigente é $\leq 0,5$ uT na saída dos filtros (BRASIL, 2021). Assim, o valor elevado de turbidez, mesmo não provocando “inconvenientes sanitários diretos”, esteticamente é desagradável. Mas os sólidos em suspensão podem servir de “abrigo” para microrganismos patogênicos porque dificultam a ação do cloro residual (PERPÉTUO, 2014; VON SPERLING, 2005). Ou pior, podem induzir sua aplicação excessiva, gerando dois problemas sérios em estações de tratamento de água: a) aumento potencial de trihalometanos (THM) (KERRY et al., 2012) e b) potencializam o “rompimento” das paredes celulares de cianobactérias presentes e já evidenciadas na água do Rio Amazonas, na qual eventualmente poderiam ser “liberadas cianotoxinas” ao longo das fases de tratamento da água (OLIVEIRA et al., 2019).

Similarmente ao que ocorre com o parâmetro turbidez, a cor aparente da água também apresentou valores estatisticamente significativos (2016, 2017, 2019 e 2021). A significância do teste de Kruskal-Wallis foi elevada (p-valor $< 0,001$). Isto é, em cada etapa do tratamento *in situ* (2021) a cor aparente, após filtros nas ETAs 1 e 2, foi maior que na saída dos decantadores (Tabela 5). Novamente, esse resultado é o inverso do esperado. Por exemplo, a média dos valores de cor aparente na saída do filtro foi de 54,5 uH na ETA 1 e de 37,25 uH na ETA 2. No processo anterior (decantação) a média ficou em 27,25 uH na ETA 1 e apenas 10,75 uH na ETA 2. Apenas a ETA 3 apresentou resultados positivos de melhoria de cor aparente após os filtros com média de 0,5 uH durante as análises experimentais. Mas as amostras com cor aparente superiores a 15 uH na saída das ETAs, e na rede de distribuição em qualquer ponto de amostragem, segundo a portaria de potabilidade (Portaria 888/21) (BRASIL, 2021) são consideradas não satisfatórias para o consumo humano (apresentando não conformidade legal).

Um efluente tratado com turbidez inferior a 0,5 uT e cor aparente inferior a 15 uH, conforme

recomenda a Portaria nº 888/2021 (BRASIL, 2021), eleva substancialmente a perspectiva da ausência de cistos e oocistos de protozoários - sabidamente mais resistentes à desinfecção com cloro - na água disponibilizada à população abastecida (PEREIRA et al., 2018).

Quanto ao parâmetro pH, a água bruta não apresentou diferenças significativas quando comparadas nos anos 2016, 2017, 2019 e 2021. A leve acidez da água é uma característica da água do Rio Amazonas (OLIVEIRA et al., 2019). Mas foi observado que durante o monitoramento experimental (2021), o pH da água na saída dos decantadores, e após filtros da ETA 1, 2 e 3, apresentaram valores menores que o da água bruta e que a correção do pH não tem sido realizada na ETAM.

O pH ácido da água além de ser pró-corrosivo para as tubulações, pode afetar o equilíbrio funcional do organismo humano, dando oportunidade a multiplicação da maioria dos microrganismos patogênicos que comprometem a saúde (CRUZ, 2016). Para corrigir o pH seria necessário adicionar à água tratada reagentes capazes de diminuir a acidez. Porém, durante o período de estudo, o sistema de dosagem da cal estava inoperante e a correção do pH não estava sendo realizada. Esses óbices se somam às várias etapas da ETAM, resultando em problemas sistêmicos de não conformidade legal (Portaria 888/21). Mas esta deficiência tende a comprometer a eficiência global da desinfecção com cloro residual livre (CRL) (KERRY et al., 2012).

A portaria MS nº888/2021 estabelece que toda água fornecida coletivamente ao consumo humano deverá passar por processo de desinfecção ou cloração (BRASIL, 2021). Também é recomendado a presença de cloro residual livre entre 0,2 e 2 mg/L Cl_2 em qualquer ponto ao longo da rede de distribuição e até a chegada em residências. A concentração legal máxima é 5,0 mg/L na saída da Estação de Tratamento (BRASIL, 2021).

O cloro, por ser um reagente não conservativo, e por sofrer interferência da turbidez, sua concentração decai ao longo da rede de distribuição, sendo necessário o monitoramento e a “recloração” em pontos estratégicos quando a concentração for menor que a recomendada (SANABRIA, 2013; KERRY et al., 2012). O cloro residual em baixas concentrações na rede de distribuição, associado à turbidez elevada (ou não conforme) (Portaria 888/21), pode ser um potencial facilitador de “contaminação” na água por microrganismos patogênicos (LEVY et al., 2008), devido à perda de capacidade de blindar a água contra estes microrganismos oportunistas. Portanto, quando o parâmetro turbidez está em não conformidade na saída da ETA, sugere uma mais alta probabilidade de inefetividade ou ineficiência da cloração na rede.

Freitas et al. (2001) obtiveram dados insatisfatórios em cloro livre em pesquisa realizada na rede de abastecimento da região metropolitana da cidade do Rio de Janeiro. Na época da pesquisa, a legislação vigente era a Portaria MS nº36/1990, que estipulava teor mínimo de cloro livre em 0,2 mg/L, mesma concentração da atual Portaria MS nº 888/2021. Mas cabe ressaltar que não era estipulado ainda teor máximo de cloro livre na legislação da época. Entretanto, na legislação atual, o valor legal é de 2,0 mg/L (na rede, não na saída da ETA), justamente para evitar seu excesso e potencial formação de THM.

Por outro lado, é importante frisar que a inclusão de um limite para o teor de CRL máximo no padrão de potabilidade vem de fato ao encontro com estudos sobre a formação de compostos trihalometanos (THMs). Os THMs podem ser prejudiciais à saúde humana pelo consumo contínuo (DUARTE et al., 2008). Contudo, esse risco parece ser maior quanto maior for o nível de falhas nas fases anteriores de tratamento,

onde possa ocorrer concentrações ainda elevadas de resíduos de matéria orgânica na água (dissolvida principalmente) (KERRY et al., 2012). Então, estas falhas operacionais podem provavelmente resultar em maiores chances de formação de THM, devido ao alto nível de concentração de matéria orgânica residual, associadas com um maior nível de turbidez ou cor aparente elevada da água.

Para a série história de 2016, 2017 e 2019 não houve dados disponíveis bacteriológicas realizadas pela CAESA. Como essas análises não são realizadas periodicamente, ocorre geralmente irregularidade legal (BRASIL, 2021). Os dados de 2021 expostos nas tabelas 2, 5 e 6 são relativos às campanhas experimentais exclusivas da presente pesquisa. E foram oportunamente gerados para avaliar-se os níveis de conformidade legal atual. E esta análise, em tese, seria o único estudo disponível da literatura da área no período anterior à concessão estatal da CAESA para a Companhia Equatorial.

No entanto, nos 8 experimentos bacteriológicas realizados na água tratada em 2021, uma amostra de água tratada da ETA 23 apresentou resultado positivo para coliformes totais, apesar da mesma amostra ter apresentado concentração de 1,26 mg/L de CRL dentro do limite de conformidade legal (Portaria 888/21). Uma explicação é que fatores avaliados anteriormente ou parâmetros-chave (pH e Turbidez) poderiam direta ou indiretamente impactar o CRL (BRASIL, 2021; LEVY et al., 2008).

Todavia, esses resultados são aparentemente inconsistentes. Mas põe em “xeque” a segurança da saúde da população macapaense. Richter et al. (1991) comentam que as ETAs atendem menos do que 60% da população da América Latina e estão concentradas em grandes cidades. E estas são servidas por estes tipos de sistemas modulares a partir de padronização de projetos. Comentam que, não bastasse o déficit brasileiro do saneamento, os problemas estão concentrados em seu maior volume na região norte do Brasil, onde o Estado do Amapá consta como líder entre os estados com piores índices de saneamento (100 piores com população acima de 100 mil habitantes) (ARAÚJO et al., 2021), apesar da ETAM ter sido notavelmente modernizada com investimentos e com expansão de infraestrutura (ETAs 2 e 3).

Uma segunda problemática é o antigo paradoxo da eficiência da cloração a ser mantida na rede de distribuição: a) manter a concentração de cloro residual (CRL) na ponta das redes de grandes cidades (0,2 a 1,2 mg/L) se contrapõe a praticamente inevitável formação de trihalometanos (THMs). Quanto mais ampla é a rede de distribuição, mais difícil é manter a concentração de CRL; b) mas quanto mais CRL é adicionado à rede (mesmo só em pontos críticos ou com menor concentração), os riscos de formação de THMs se elevam.

CONCLUSÕES

Esta pesquisa identificou de modo inédito as características das etapas operacionais com necessidade de melhorias da eficiência da ETAM. Por meio das séries históricas dos parâmetros-chave de qualidade da água na ETAM, durante os anos 2016, 2017 e 2019, verificamos que as três ETAs que compõem a ETAM apresentaram diferenças significativas na comparação global e intrínseca para a eficiência das etapas operacionais ($p < 0,05$). Assim, frequentemente os parâmetros-chave monitorados apresentaram-se em não conformidade com a Portaria de Potabilidade (MS 888/2021 - BRASIL/2021). Esta evidência foi mais marcante no período de junho e julho de 2021, onde cada etapa do tratamento apresentou demandas de correção

preventiva ou corretiva em nível operacional quando comparadas com anos anteriores.

Ensaio experimentais de “Jar Test” identificaram a concentração ideal do coagulante e o pH ótimo de floculação, variando-se os traços e concentrações de uso de sulfato de alumínio em combinação com polímero e, em alguns casos, cal hidratada. Todavia, foi observado que o *Jar Test* não é realizado com a devida frequência, nem decisões de aplicações de insumos químicos são tomadas com base nesses testes. Portanto, as dosagens são provavelmente realizadas sem critério operacional objetivo ou com base em monitoramento efetivo da qualidade da água. Isto é, têm atuado fora das normas legais (Portaria 888/21).

Os resultados dos parâmetros turbidez e cor aparente, após os filtros das ETAs 1 e 2, sugerem urgente manutenção corretiva desta etapa operacional, destacando-se os filtros e limpeza dos reservatórios, com o objetivo de melhorar os parâmetros de qualidade nesta fase operacional. Isto é, evitando-se concentrações elevadas ou reduzidas de coagulantes do que aquelas de antes da filtração. Essa foi uma inconsistência operacional indesejada, agravada não realizada pela companhia após a filtração e pré-desinfecção, configurando-se novamente em mais uma não conformidade com a Portaria MS nº 888/2021.

Os parâmetros bacteriológicos da água bruta indicaram concentrações relativamente elevadas e frequentes de CT e *E. coli* na água bruta. Este é um sintoma da ausência de sistemas de esgotamento sanitário nas proximidades da captação de água em Macapá (orla da cidade), representando um risco adicional à segurança hídrica e à saúde pública. Além disso, provavelmente elevam os custos de tratamento.

Apesar da concentração de cloro residual livre (CRL) se manter geralmente dentro dos limites adequados, foram detectados testes positivos para coliformes fecais na água tratada da ETA 23. Este fato pode ser atribuído aos demais parâmetros monitorados não conformes (Portaria 888/21), reduzindo a eficiência da desinfecção e comprometendo a eficiência global do tratamento.

Estatisticamente a influência de fatores operacionais nas variações dos parâmetros-chave envolvidos da qualidade da água da ETAM na eficiência da cloração (CRL) foram efetivamente controversos. Esperava-se melhor eficiência da ETA 23 por ser uma unidade operacional recente. Contudo, esta última não foi suficiente para superar a eficiência das ETAs 1 e 2, mais antigas. Assim, observou-se que a eficiência da ETA23 foi inferior às antigas infraestruturas, provavelmente devido às falhas operacionais nas unidades anteriores. Então, a creditasse a este paradoxo a falta de capacitação e qualificação de equipes de planejamento, operação e gerenciamento técnico da ETAM.

Finalmente, a ETAM cumpriria sua missão principal com os serviços de oferta de água com boa qualidade se os serviços fossem mais bem adequados às normas legais (Portaria 888/21). Contudo, alguns quesitos básicos não têm sido atendidos e parecem até certo ponto reduzir sua eficiência. De fato, o não atendimento aos padrões legais em diferentes etapas operacionais é um risco evitável. Mas, se não for resolvido, pode comprometer a qualidade de dos serviços de saneamento e a saúde dos cidadãos.

AGRADECIMENTOS: Os autores agradecem o suporte técnico do Laboratório de Química, Saneamento e Modelagem de Sistemas Ambientais (LQMSA), Ao Laboratório de Hidráulica e Saneamento Ambiental (Eng. Civil), e da Companhia de Água de Esgoto do Amapá (CAESA) e o suporte econômico dos Projetos Tedplan

Funasa/Unifap/Municípios (TR 06/2018) e ao CNPq pela Bolsa Produtividade (Processo 314830/2021-9).

REFERÊNCIAS

- ABREU, C. H. M.; BARROS, M. L. C.; BRITO, D. C.; TEIXEIRA, M, R.; CUNHA, A. C.. Hydrodynamic modeling and simulation of water residence time in the estuary of the lower Amazon river. **Water**, Bern, v.12, n.3, 2020. DOI: <http://doi.org/10.3390/w12030660>
- ARAÚJO, E. P.; BRITO, A. U.; CUNHA, A. C.; CUNHA, H. F. A.. Indicadores de abastecimento de água e doenças de transmissão hídrica em municípios da Amazônia Oriental. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.26, n.6, p.1059-1068, 2021. DOI: <http://doi.org/10.1590/S1413-415220200179>
- BEZERRA, S. T. M.; PERTEL, M.; MACÊDO, J. E. S.. Avaliação de desempenho dos sistemas de abastecimento de água do Agreste brasileiro. **Ambiente Construído**, v.19, n.3, p.249-258, 2019. DOI: <http://doi.org/10.1590/s1678-86212019000300336>
- BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021**. Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS nº 5, de 28 de setembro de 2017, para dispor sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Brasília: DOU, 2021.
- BRASIL. **Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020**. Brasília: DOU, 2020.
- BRASIL. Sistema Nacional de Informação sobre Saneamento. **Diagnóstico dos serviços de Água e Esgoto**. Brasília: SNIS, 2021.
- CRAWLEY, M. J.. **The R Book**. New York: Wiley, 2007.
- CRUZ NETO, B. F.. Benefícios da água com pH alcalino: Saúde ou doença, você decide. **Revista E.T.C do Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia da Bahia**, n.14, 2016.
- CUNHA, A. C.; CUNHA, H. F. A.; BRASIL JUNIOR, A. C. P.; DANIEL, L. A.; SCHULZ, H. E.. Qualidade microbiológica da água em rios de áreas urbanas e periurbanas no baixo Amazonas: o caso do Amapá. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.9, p.322-328, 2004. DOI: <http://doi.org/10.1590/S1413-41522004000400009>
- CUNHA, A. C.; NAZARE, A. S.; PANTOJA, S.; CUNHA, H. F. A.; SOUZA, J.. Monitoramento de águas superficiais em rios estuarinos do estado do Amapá sob poluição microbiológica. Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. **Série Ciências Naturais**, Belém, v.1, n.1, p.191-199, 2005.
- CUNHA, H. F. A.; LIMA, D. C. I.; BRITO, P. N. F.; CUNHA, A. C.; SILVEIRA JUNIOR, A. M.; BRITO, D. C.. Qualidade físico-química e microbiológica de água mineral e padrões da legislação. **Revista Ambiente & Água**, v.7, p.155-165, 2012. DOI: <http://doi.org/10.4136/ambi-agua.908>
- DUARTE, A. A. L.; PINTO, J. A. D. S.. Aplicação de modelos matemáticos no controle da formação de trihalometanos em águas de abastecimento. In: SILUBESA - SIMPÓSIO LUSO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 8. **Anais**. 2008.
- FLORES, C. A. R.; CUNHA, A. C.; CUNHA, H. F. A.. Indicators of solid waste generation per capita in international Amazon countries. **Environmental Science and Pollution Research**, v.29, p.1-10, 2022. DOI: <http://doi.org/10.1007/s11356-022-18509-3>
- FREITAS, M.; BRILHANTE, O.; ALMEIDA, L.. Importância da análise de água para a saúde pública em duas regiões do estado do Rio de Janeiro: enfoque para coliformes fecais, nitrato e alumínio. **Cad. Saúde Pública**, Rio de Janeiro, v.17, n.3, 2001. DOI: <http://doi.org/10.1590/S0102-311X2001000300019>
- GROTT, S. L.; FURTADO, R. N.; FACANHA, E. B.; CUNHA, H. F. A.; CUNHA, A. C.. Variação espaço-sazonal de parâmetros da qualidade da água subterrânea usada em consumo humano em Macapá-AP, Brasil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.23, p.645-654, 2018. DOI: <http://doi.org/10.1590/S1413-41522018162018>
- KERRY, J. H.; DAVID, W. H.; JOHN, C. C.. **Principles of Water Treatment**. New Jersey: John Wiley & Sons, INC, 2012.
- LEVY, K.; NELSON, K. L.; HUBBARD, A.; EISENBERG, J. N.. Following the water: a controlled study of drinking water storage in northern coastal Ecuador. **Environmental Health Perspectives**, v.116, n.11, p.1533-1540, 2008. DOI: <http://doi.org/10.1289/ehp.11296>
- LOPES, R. M.; ALVES, A. C. F.; FERREIRA, J. F. H.; MARQUES, M. G.; PEREIRA, J. A. R.. Determinação da despesa com energia elétrica na lavagem de filtro rápido de estação de tratamento de água. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.25, n.1, p.145-155, 2020. DOI: <http://doi.org/10.1590/S1413-41522020176367>
- OLIVEIRA, E. D. C.; BRANCO, R. C.; SILVA, R.; SILVA, N.; AZEVEDO J.; VASCONCELOS, V.; FAUSTINO, S.; CUNHA, A.. First detection of microcystin-Lr in the amazon river at the drinking water treatment plant of the municipality of Macapá, Brazil. **Toxins**, v.11, n.11, p.1-21, 2019. DOI: <http://doi.org/10.3390/toxins11110669>
- OLIVEIRA, A. M.; CUNHA, A. C.. Análise de risco como medida preventiva de inundações na Amazônia: estudo de caso de enchente de 2000 em Laranjal do Jari-AP, Brasil. **Ciência e Natura**, v.37, p.110-118, 2015. DOI: <http://doi.org/10.5902/2179460X16224>
- OLIVEIRA, B. S.; CUNHA, A. C.. Correlação entre qualidade da água e variabilidade da precipitação no sul do Estado do Amapá. **Revista Ambiente & Água**, v.9, p.261-275, 2014. DOI: <http://doi.org/10.4136/ambi-agua.1287>
- PEREIRA, L. G.; SILVA, G. A.; LIBÂNIO, M.. Proposição de sistema de indicadores de desempenho operacional de estações de tratamento de água à luz do prestador de serviço: aplicação a cinco estações de ciclo completo. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.23, n.6, p.1163-1172, 2018. DOI: <http://doi.org/10.1590/S1413-41522018168875>

PERPÉTUO, E. A.. **Parâmetros de caracterização da qualidade das águas e efluentes industriais**. São Paulo: CEPEMA-USP, 2014.

RICHTER, C. A.; AZEVEDO NETTO, J. M.. **Tratamento de Água: tecnologia atualizada**. São Paulo: Blucher, 1991.

PINHEIRO, L. A. R.; CUNHA, A. C.; CUNHA, H. F. A.; SOUZA, L. R.; SARAIVA J. B.; BRITO, D. C.; BRASIL JUNIOR, A. C. P.. Aplicação de simulação computacional à dispersão de poluentes no baixo Rio Amazonas: potenciais riscos à captação de água na orla de Macapá-AP. **Amazônia: Ciência e Desenvolvimento**, v.4, p.27-44, 2008.

SANABRIA, J. M.. Decaimento do cloro residual em águas de abastecimento do município de Campo Grande/Ms. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v.5, n.4, p.92-104, 2013.

SOUZA, T. S.; CUNHA, H. F. A.; CUNHA, A. C.. Risco de alagamento influenciado por fatores ambientais em zonas urbanas de Macapá e Santana - AP. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v.12, n.4, p.245-259, 2021. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2021.004.0021>

TSUTUYIA, M. T.. **Abastecimento de Água**. 3 ed. São Paulo: Escola Politécnica da USP, 2006.

UNIFAP. Universidade Federal do Amapá. **Plano Municipal de Saneamento Básico (PMSB)**: Município de Amapá/AP. Prospectiva e planejamento Estratégico. Macapá: UNIFAP, 2021.

VIANA, R. L.; FREITAS, C. M.; GIATTI, L. L.. Saúde ambiental e desenvolvimento na Amazônia legal: indicadores socioeconômicos, ambientais e sanitários, desafios e perspectivas. **Revista Saúde e Sociedade**, v.25, n.1, p.233-246, 2016. DOI: <http://doi.org/10.1590/S0104-12902016140843>

VIEGAS, C. J. T.; SILVA, T. S.; CUNHA, H. F. A.; CUNHA, A. C.. Sistema de esgotamento sanitário e casos de diarreia em Macapá-AP. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v.12, n.2, p.304-316, 2021. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2021.002.0028>

VON SPERLING, M. V.. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 3 ed. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2005.

Os **autores** detêm os direitos autorais de sua obra publicada. A **CBPC – Companhia Brasileira de Produção Científica (CNPJ: 11.221.422/0001-03)** detêm os direitos materiais dos trabalhos publicados (obras, artigos etc.). Os direitos referem-se à publicação do trabalho em qualquer parte do mundo, incluindo os direitos às renovações, expansões e disseminações da contribuição, bem como outros direitos subsidiários. Todos os trabalhos publicados eletronicamente poderão posteriormente ser publicados em coletâneas impressas ou digitais sob coordenação da Companhia Brasileira de Produção Científica e seus parceiros autorizados. Os (as) autores (as) preservam os direitos autorais, mas não têm permissão para a publicação da contribuição em outro meio, impresso ou digital, em português ou em tradução.

Todas as obras (artigos) publicadas serão tokenizadas, ou seja, terão um NFT equivalente armazenado e comercializado livremente na rede OpenSea (https://opensea.io/HUB_CBPC), onde a CBPC irá operacionalizar a transferência dos direitos materiais das publicações para os próprios autores ou quaisquer interessados em adquiri-los e fazer o uso que lhe for de interesse.



Os direitos comerciais deste artigo podem ser adquiridos pelos autores ou quaisquer interessados através da aquisição, para posterior comercialização ou guarda, do NFT (Non-Fungible Token) equivalente através do seguinte link na OpenSea (Ethereum).

The commercial rights of this article can be acquired by the authors or any interested parties through the acquisition, for later commercialization or storage, of the equivalent NFT (Non-Fungible Token) through the following link on OpenSea (Ethereum).



<https://opensea.io/assets/ethereum/0x495f947276749ce646f68ac8c248420045cb7b5e/44951876800440915849902480545070078646674086961356520679561157887966197055489/>