

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAPÁ  
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

JOÃO PAULO SANTOS AMARAL

**QUALIDADE DA ÁGUA EM DIFERENTES FASES OPERACIONAIS UNITÁRIAS  
DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA DE MACAPÁ (ETAM)**

MACAPÁ  
2022

JOÃO PAULO SANTOS AMARAL

**QUALIDADE DA ÁGUA EM DIFERENTES FASES OPERACIONAIS UNITÁRIAS  
DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA DE MACAPÁ (ETAM)**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Amapá (UNIFAP), como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Alan Cavalcanti da Cunha.

MACAPÁ

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Biblioteca Central da Universidade Federal do Amapá  
Jamile da Conceição da Silva – CRB-2/1010

---

A485q Amaral, João Paulo Santos.  
Qualidade da água em diferentes fases operacionais unitárias da estação de tratamento de água de Macapá (ETAM) / João Paulo Santos Amaral. - 2022.  
1 recurso eletrônico. 80 folhas.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) –  
Campus Marco Zero, Universidade Federal do Amapá, Coordenação do Curso  
de Bacharelado em Engenharia Civil, Macapá, 2022.  
Orientador: Professor Doutor Alan Cavalcanti da Cunha

Modo de acesso: World Wide Web.

Formato de arquivo: Portable Document Format

(PDF).Inclui referências.

1. Qualidade da Água. 2. Água – Análise. 3. Abastecimento de água. I.  
Cunha, Alan Cavalcanti da, orientador. II. Título.

Classificação Decimal de Dewey, 22 edição, 628.161

---

AMARAL, João Paulo Santos. **Qualidade da água em diferentes fases operacionais unitárias da estação de tratamento de água de Macapá (ETAM)**. Orientador: Alan Cavalcanti da Cunha. 2022. 80 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Civil) – Campus Marco Zero, Universidade Federal do Amapá, Coordenação do Curso de Bacharelado em Civil, Macapá, 2022.



## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço em primeiro lugar a Deus em cada detalhe concedido em minha vida, especialmente por ter me dado forças para a conclusão deste trabalho e da graduação.

Agradeço profundamente aos meus pais e toda minha família por todas as oportunidades concedidas ao longo do meu crescimento pessoal, acadêmico e profissional. Serei eternamente grato pela educação e pela direção que me fizeram seguir ao longo da minha vida.

Não posso deixar de agradecer de forma muito especial à minha melhor amiga, minha namorada Ingrid Bacelar por tantos momentos compartilhados ao longo desse período acadêmico. Desde a preparação para o vestibular, até a conclusão da nossa graduação, nunca deixamos de fortalecer um ao outro ao longo dessa jornada desafiadora.

Muito obrigado aos meus amigos da turma 2015 e a todos os professores do colegiado de engenharia civil pelos ensinamentos concedidos de forma direta ou indireta.

Agradecimento também muito especial ao meu professor e orientador Alan Cunha, que me acompanhou durante o estágio supervisionado, na monitoria da matéria Sistemas de Abastecimento de Água e principalmente na realização deste trabalho de conclusão de curso, sem seu apoio e orientação tão qualificada essa jornada seria muito mais árdua.

Agradeço à Companhia de Água e Esgoto do Amapá (CAESA) na pessoa do Sr. Claudinaldo Ferreira (Naldo) e Sr. César Augusto (Cezinha), por todo apoio, ensino e paciência ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Por fim, muito obrigado a todos que de alguma forma contribuíram para esse momento que esperei tão ansiosamente e por todos que torcem por mim.

## RESUMO

Autor: João Paulo Santos Amaral

Orientador: Prof. Dr. Alan Cavalcanti da Cunha

### QUALIDADE DA ÁGUA EM DIFERENTES FASES OPERACIONAIS UNITÁRIAS DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA DE MACAPÁ (ETAM)

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 nos seguintes procedimentos: a) análise de séries temporais disponíveis de parâmetros da qualidade da água, (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, incluídos Coliformes Totais e *E. coli* (2021) para testar sua conformidade com a legislação e, quando possível, com as séries históricas de anos anteriores, analisando as variações dos parâmetros após a expansão de novas unidades operacionais da ETAM; c) testar estatisticamente a influência de fatores e variáveis independentes da qualidade da água (pH, Turbidez, Cor Aparente, Coliformes Totais e *E. coli*) e fatores operacionais (ETA 1, 2 e 23; Hora do dia; Dia do mês; Mês; Ano; Etapa Operacional de Captação, Floculação, Decantação, Filtração, Desinfecção) sobre a concentração de Cl (Kruskal-Wallis e 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 ( $R_{aj}^2_{(GL=2107, F=340,1)} = 0,33$ ,  $p < 0,001$ ), com exceção da variável “Mês”. Na análise da série de 2021 também não foi observada variação significativa de Cl com Coliformes Totais e *E. coli*, sendo este resultado paradoxalmente oposto aos das séries históricas (2016, 2017 e 2019). E em relação a aplicação de coagulantes e polímeros em testes de jarro, observou-se ineficiência operacional (dosagens), gerando também provável falta controle desses insumos, reduzindo a eficiência operacional da ETAM. Conclui-se que a variação dos parâmetros da qualidade da água (Cl, pH, Cor Aparente, e Turbidez) da série histórica foi dependente de fatores operacionais (ETA, Etapa, Hora, Dia, Mês e Ano). Todavia, não foi confirmada a hipótese de melhoria da qualidade da água após a expansão das novas unidades 2 e 23 (teste Kruskal-Wallis,  $p < 0,01$ ), sugerindo que a modernização do sistema operacional não impactou significativamente na melhoria da eficiência da ETAM. Até porque a qualidade da água tratada não estava atendendo aos padrões estabelecidos pela legislação (Portaria GM/MS N° 888, de 4 de 05/2021) ou que a ETA 23 era mais eficiente do que as duas mais antigas referente à desinfecção por Cl. Pelo contrário, a eficiência depende da dosagem correta dos produtos químicos ao longo das operações unitárias. Esta hipótese foi confirmada com os ensaios de “Jar Test”, os quais indicaram pH ótimo de coagulação como um aspecto ambiental e econômico determinante operacionalmente.

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

## ABSTRACT

### WATER QUALITY IN UNIT OPERATIONS IN THE MACAPÁ WATER TREATMENT PLANT (WTP)

Author: João Paulo Santos Amaral  
Advisor: Prof. Dr. Alan Cavalcanti da Cunha

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 Plant (ETAM)/Amapá-Brasil. The methodology consisted of the following procedures: a) analysis of available time series of water quality parameters (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, including Total Coliforms and *E. coli* (2021) to test their compliance with legislation and, when possible, with historical series of years previous ones, analyzing the variations of the parameters after the expansion of new operational units of ETAM; c) statistically test the influence of factors and independent variables of water quality (pH, Turbidity, Apparent Color, Total Coliforms and *E. coli*) and operational factors (ETA 1, 2 and 23; Time of day; Day of month; Month ; Year; Operational Stage of Collection, Flocculation, Decantation, Filtration, Disinfection) on Cl concentration (Kruskal-Wallis/single and multiple regressions,  $\alpha < 0.05$ ). Results showed that Cl concentration varied significantly with all parameters and factors (except "Month" of Year) ( $p < 0.05$ ). Multiple regression analyzes indicated that the concentration of Cl was significantly correlated with the variables Day, Year and Apparent Color of the series ( $R_{aj}^2 (GL=2107, F = 340.1) = 0.33$ ,  $p < 0.001$ ), with the exception of "Month" variable. In the analysis of the 2021 series, there was also no significant variation of Cl with Total Coliforms and *E. coli*, this result being paradoxically opposite to the historical series (2016, 2017 and 2019). And in relation to the application of coagulants and polymers in jar tests, operational inefficiency (dosages) was observed, also generating a probable lack of control of these inputs, reducing the operational efficiency of ETAM. We concluded that the variation of water quality parameters (Cl, pH, Apparent Color, and Turbidity) of the historical series was dependent on operational factors (ETA, Stage, Hour, Day, Month and Year). Nevertheless, the hypothesis of improved water quality after the expansion of new units 2 and 23 was rejected (Kruskal-Wallis test,  $p < 0.01$ ), suggesting that the modernization of the operating system did not significantly impact the improvement of treatment water efficiency. Because the quality of the treated water is not meeting the standards established by the legislation (Ordinance GM/MS No. 888, of May/4/2021) or that ETA 23 was more efficient than the two oldest ones regarding disinfection by Cl. On the contrary, efficiency depends on the correct dosage of chemicals throughout the unit operations. This hypothesis was confirmed with the "Jar Test" analysis, which indicated optimal coagulation pH as an operationally determining environmental and economic aspect.

**Keywords:** Water Supply, Jarr Test, Monitoring, Temporal Series, Amazonian.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Flocculador Mecânico.....	24
Figura 2: Flocculador Hidráulico de Fluxo Horizontal CAESA.....	24
Figura 3: Decantadores ETA 3 Caesa.....	25
Figura 4: Cilindros de Cloro Gás CAESA.....	27
Figura 5: Fluxograma com as principais etapas metodológicas da presente pesquisa.	30
Figura 6: Localização dos módulos de tratamento (ETA 1, 2 e 3) na ETAM.....	31
Figura 7: Captação e Estação de Tratamento.....	32
Figura 8: Fluxograma de operação da ETAM. ....	32
Figura 9: Planta baixa ETAM e detalhes das operações unitárias.....	33
Figura 10: Fluxograma processo modelo de potabilização da água. ....	35
Figura 11: Calha Parshal e dosagem do coagulante. ....	36
Figura 12: Equipamento para ensaio de Jar Test CAESA com seis réplicas utilizadas simultaneamente. ....	36
Figura 13: Preparação das soluções para realização do Jar Test .....	37
Figura 14: Solução nos tubos de ensaio e preparação das amostras nos jarros. ....	38
Figura 15: Amostras obtidas após ensaio de Jar Test (resultado qualitativo) em Julho e Agosto de 2021.....	39
Figura 16: Planta baixa ETA 1. ....	40
Figura 17: Flocculadores, Decantadores e Filtros ETA 1. ....	41
Figura 18: Sistema de Cloro Gás (ETA 1, 2 e 3) da ETAM.....	41
Figura 19: Flocculadores ETA 2 e 3 (esquerda), Decantadores ETA 2 e 3 (direita).....	42
Figura 20: Planta Baixa ETAs 2 e 3 que compõem a ETAM.....	43
Figura 21: Ponto de coleta de amostra da água bruta (ETA 1, 2 e 3).....	44
Figura 22: Ponto de coleta água flocculada ETA 1.....	44
Figura 23: Ponto de coleta água flocculada ETA 2.....	44
Figura 24: Ponto de coleta água flocculada ETA 3.....	44
Figura 25: Ponto de coleta água decantada ETA 2.....	44
Figura 26: Ponto de coleta água decantada ETA 3.....	44
Figura 27: Ponto de coleta água pós-filtro ETA 1.....	45
Figura 28: Ponto de coleta água pós-filtro ETA 2.....	45
Figura 29: Ponto de coleta pós filtro ETA 3.....	45
Figura 30: Ponto de coleta água tratada ETA 1 e ETAs 23.....	45

Figura 31: Equipamentos para resultados quantitativos CAESA.....	46
Figura 32: Etapas do método Colilert para análises bacteriológicas .....	47
Figura 33: Tabela para organização dos dados coletados em campo. ....	47
Figura 34: Teste multicomparativo não-paramétrico de Kruskal-Wallis: a) considerando os diferentes fatores ETA e b) estágio operacional intervenientes na qualidade da água potável – ETAM-AP/Amapá/Brasil. ....	58
Figura 35: Variação de Cl no Tempo. ....	64

### LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Parâmetros analisados e limites da norma de potabilidade. ....	34
Quadro 2: Dados utilizados nos ensaios de Jar Test na ETAM em Julho e Agosto de 2021 ( <i>in situ</i> ) 38	
Quadro 3: ANOVA One-Way para avaliar a variação da conformidade legal e seu impacto na ETAM em quatro períodos diferentes (2016, 2017, 2019 e 2021) .....	56

### LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Resultados Jar Test 1 (apenas sulfato de alumínio).....	48
Tabela 2: Resultados Jar Test 2 (combinando sulfato de alumínio e polímero).....	49
Tabela 3: Resultados Jar Test 3 (combinando sulfato de alumínio, polímero e cal). ...	50
Tabela 4: média de pH, Turbidez, Cor Aparente, Coliformes Totais e Escherichia Coli da Água Bruta (Captação). ....	51
Tabela 5: pH, Turbidez e Cor da Água Floclulada (ETAs 1, 2 e 3). ....	51
Tabela 6: pH, Turbidez e Cor da Água Decantada (ETAs 1, 2 e 3). ....	52
Tabela 7: pH, Turbidez, Cor, Coliformes Totais e Escherichia Coli da Água Pós-Filtro (ETAs 1, 2 e 3). ....	53
Tabela 8: pH, Cloro (Cl), Turbidez (Turb), Cor, Coliformes Totais (CT) e Escherichia Coli (E. Coli) da Água Tratada (ETA 1 e ETA 23).....	53
Tabela 9: Conformidade da Água Tratada das ETA 1 e ETA 2 (2016) com o Padrão de Potabilidade .....	54
Tabela 10: Conformidade da Água Tratada das ETA 1 e ETA 2 (2017) com o Padrão de Potabilidade .....	54

Tabela 11: Conformidade da Água Tratada das ETA1 e ETA 23 (2019) com o Padrão de Potabilidade .....	55
Tabela 12: Conformidade da Água Tratada das ETAs 1 e 23 (2021) com o Padrão de Potabilidade. ....	55
Tabela 13: Teste não-paramétrico de Kruskal-Wallis para a variável [Cl] segundo influências de parâmetros e fatores intervenientes da qualidade da água potável da ETA de Macapá-AP/Amapá/Brasil.....	57
Tabela 14: regressão da variação de concentração de cloro em função do nível de tratamento. ....	60
Tabela 15: cor aparente em função das Etapas operacionais. O sinal positivo indica aumento da concentração de cor aparente e o negativo indica redução. Explicabilidade de 84%. NS = Não Significativo. ....	61
Tabela 16: pH em função das Etapas operacionais. O sinal positivo indica aumento da concentração de cor aparente e o negativo indica redução. Explicabilidade de 52%. NS = Não Significativo. ....	61
Tabela 17: Turbidez em função das Etapas operacionais. O sinal positivo indica aumento da concentração de turbidez e o negativo indica redução. Explicabilidade de 79%. NS = Não Significativo. ....	62
Tabela 18: Coliformes Totais em função das Etapas operacionais. O sinal positivo indica aumento da concentração de cor aparente e o negativo indica redução. Explicabilidade de 14,74%. NS = Não Significativo. ....	62
Tabela 19: E. coli em função das Etapas operacionais. O sinal positivo indica aumento da concentração de cor aparente e o negativo indica redução. Explicabilidade de 32,51%. NS = Não Significativo. ....	63
Tabela 20: Matriz de correlação (Spearman) para os parâmetros-chave da qualidade da água.....	63

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	10
2.	OBJETIVOS.....	13
2.1.	OBJETIVO GERAL.....	13
2.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	13
3.	JUSTIFICATIVA.....	14
4.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	16
4.1.	Indicadores Físicos.....	16
4.2.	Indicadores Químicos.....	18
4.3.	Indicadores Biológicos.....	19
4.4.	Tratamento Convencional.....	20
4.5.	Portaria GM/MS Nº 888 – 04/05/21 (Padrões De Potabilidade).....	28
4.6.	Análise Estatística e Testes de Hipóteses Para a Variação Físico-Química da Qualidade da Água na ETAM Por Operação Unitária no Tempo.....	28
5.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	30
5.1.	Fluxograma das Atividades.....	30
5.2.	Área de Estudo.....	31
5.3.	O Padrão de Potabilidade.....	33
5.4.	Dinâmica operacional da ETAM.....	35
5.5.	Pontos de coleta e análise dos dados <i>in situ</i> (2021).....	43
6.	RESULTADOS.....	48
6.1.	Resultados Jar Test (2021).....	48
6.2.	Parâmetros da Qualidade da Água da ETAM CAESA (2021).....	50
6.3.	Conformidade dos Resultados com o Padrão de Potabilidade (MS 888/2021) 54	
6.4.	Análise comparativa da conformidade legal da qualidade da água nos períodos de julho e agosto (2016, 2017, 2019 e 2021).....	55
7.	DISCUSSÕES.....	65

7.1. Turbidez .....	65
7.2. Cor Aparente .....	66
7.3. Potencial Hidrogeniônico (pH) .....	67
7.4. Cloro Residual Livre (CRL) .....	68
7.5. Coliformes Totais e Escherichia Coli (E. Coli) nos Experimentos de 2021 ...	70
8. CONCLUSÕES .....	73
9. RECOMENDAÇÕES.....	75
10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	76

## 1. INTRODUÇÃO

A qualidade do sistema de abastecimento de água está diretamente relacionada com a qualidade de vida da população. Mas o crescimento populacional excessivo, frequentemente em consonância com a escalada da demanda, aumento da poluição dos mananciais (FLORES et al., 2022) e os efeitos das mudanças climáticas, têm impulsionado reflexões sobre a vulnerabilidade e a natureza finita dos recursos hídricos (PERTEL, 2019).

Para que a água possa ser considerada adequada para o consumo humano, seja para higiene pessoal ou ingestão e cozimento de alimentos, precisa atender aos parâmetros de potabilidade adequados, que têm como base a recém-publicada Portaria nº 888, do Ministério da Saúde, de 4 de maio de 2021. A referida Portaria dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade (BRASIL, 2021).

Os padrões de potabilidade somente são alcançados após a realização de alguns processos operacionais (físico-químicos) realizados durante a etapa de tratamento da água. E sua conformidade depende de vários indicadores, como a qualidade físico-química e microbiológicos da água e até os operacionais durante o seu tratamento convencional (ARAÚJO et al., 2021). Isto é, a eficiência do processo de tratamento da água depende de cada uma das fases operacionais das Estações de Tratamento de Água (ETA). Normalmente, para as ETAs convencionais, destacam-se as operações unitárias de captação, floculação, decantação, filtração e cloração (KERRY et al., 2012).

Neste aspecto, é desejável e necessário manter o controle de cada uma dessas etapas operacionais realizado pelo monitoramento periódico da qualidade da água tratada, tendo em vista os diversos impactos potenciais de sua variação natural ao longo dos processos de tratamento (KERRY et al., 2012). No presente 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 (escala local) (ABREU et al., 2020; OLIVEIRA et al., 2019; CUNHA et al., 2021), frequentemente influenciadas pela precipitação sazonal e biogeoquímica regional.

No estado do Amapá, o sistema de abastecimento de água da ETAM tem sido operado pela Companhia de Água e Esgoto do Amapá (CAESA), atualmente sofrendo um processo de desestatização. Isto é, a prestação de serviço está sendo substituída em todas as sedes municipais pela nova Concessionária Equatorial que assumiu a operação de todas as ETAs do Estado do Amapá (UNIFAP, 2021). Esse processo de concessão já é reflexo do novo marco do

saneamento amparado na lei nº 14.026/2020 (BRASIL, 2020) que tem como objetivo 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. Uma das hipóteses da necessidade dessa desestatização seria a ineficiência geral dos sistemas de abastecimento de água e esgoto em todo o Estado.

Em Macapá a captação de água bruta é realizada por uma elevatória situada aproximadamente 500 m dentro do Rio Amazonas (aérea). A Água bruta é conduzida por uma adutora de aproximadamente 700 m (subterrânea) para a ETAM, onde há o principal módulo de tratamento a Estação de Tratamento de Água de Macapá (BNDS, 2018; CUNHA et al., 2019).

Dentro da área da ETAM estão situados três módulos independentes de tratamento: a Estação de Tratamento de Água 1 (ETA 1), a mais antiga e com operação desde 1973, a Estação de Tratamento de Água 2 (ETA 2), operando desde o ano 2000 (BNDS, 2018) e a Estação de Tratamento de Água 3 (ETA 3), a mais recente, operando desde 2018.

A Concessionária Equatorial (que substituiu a CAESA) é doravante responsável pelo abastecimento de água e coleta de esgoto em todas as sedes dos 16 municípios do Amapá, ficando a CAESA responsável pelas localidades, vilas, distritos das zonas rurais desses municípios sob a regulamentação da Agência Reguladora do Estado do Amapá (ARSAP) (UNIFAP, 2021).

O processo de nova concessão pelos próximos 35 anos da Equatorial terá o desafio de superar as limitações de infraestrutura e operacionais com foco na universalização e do histórico déficit da demanda de serviços básicos de saneamento, principalmente água e esgoto, devido a falta de investimentos e de políticas públicas eficientes do setor (ARAÚJO et al., 2021).

Dados do Instituto Trata Brasil (2021) revelam que apenas 38,36% (atualizada para aproximadamente 60% em 2020) da população de Macapá é atendida com abastecimento de água, enquanto a média nacional é de 83,70%, posicionando a capital amapaense na 98ª posição dos 100 maiores municípios do Brasil (ou com população igual ou maior do que 100 mil habitantes).

Tal restrição de acesso aos serviços de saneamento (pelo menos água e esgoto) gera para a população uma situação eminentemente crítica de saúde pública, na medida em que há dificuldades em se recorrer às soluções individuais de saneamento tais como poços subterrâneos (GROTT et al., 2018), cujas fontes não são adequadamente monitoradas ou são utilizados como solução paliativas a partir de água mineral engarrafada (CUNHA et al., 2012). Isto é, quando

as soluções paliativas são impostas, ainda requerem custos adicionais de implantação, monitoramento e manutenção, especialmente poços amazonas, artesianos e fossas sépticas (IBGE, 2019). Nestes casos, o setor não têm obtido êxito em atender diversas demandas de qualidade da água em bairros centrais ou periféricos da capital amapaense (FURTADO et al., 2017).

Em geral, devido aos baixos índices de universalização de água de abastecimento no Amapá, é cada vez mais urgente investimento em sistemas de abastecimento de água, de modo a atender à demanda crescente da população em quantidade e qualidade adequadas para o consumo. E, apesar desses indicadores representarem historicamente uma defasagem da universalização da água de abastecimento, há inexplicavelmente ainda poucos estudos que tratam exclusivamente deste tipo problema no Estado do Amapá (ARAÚJO et al., 2021). Por exemplo, há lacunas consideráveis de conhecimento sobre a evolução física da infraestrutura e o seu impacto na qualidade da água de abastecimento, principalmente considerando as condições das operações unitárias na ETAM. Além disso, há evidentemente ausência de registros oficiais de séries históricas de monitoramento da qualidade da água (tratada e bruta) para avaliar sua eficiência durante as etapas operacionais ao longo dos processos de tratamento no sistema, a fim de garantir qualidade da água potável e segura (FURTADO et al., 2017).

No presente estudo, o foco principal foi tratar da qualidade da água de abastecimento da ETAM influenciada pela dinâmica operacional. A importância do estudo é a análise inédita e simultânea de parâmetros-chave da qualidade da água (Cl, pH, Turbidez e Cor Aparente, e eventualmente coliformes totais e *E. coli*) durante o tratamento, observando-se a influência de fatores como as diferentes etapas operacionais subdivididas em três subseções (ETA 1, ETA 2 e ETA 3) sobre a qualidade da água final (coagulação, floculação, decantação, filtração e desinfecção).

Com efeito, testamos estatisticamente a variação desses parâmetros-chave sob a influência do estágio operacional e verificamos sua conformidade legal, tanto em relação às séries históricas disponíveis (2016, 2017 e 2019, para os meses de julho e agosto) quanto para campanhas experimentais de 2021 *in situ* (também julho e agosto para efeito de comparação). Neste sentido, frisamos que estes períodos foram considerados os únicos em que seria possível realizar estudos estatísticos comparativos objetivando testar estatisticamente se houve evolução significativa entre os parâmetros a partir da expansão física das ETAs 2 e 3 ao longo do tempo.

Nossa principal hipótese da análise das séries históricas é que os fatores mais relevantes que causam diferenças significativas da qualidade da água (ou sua conformidade legal) é a

influência da expansão da infraestrutura ETA (1, 2 e 3) e a etapa operacional (Floculação, Decantação, Filtração e Desinfecção), em detrimento da influência de outros parâmetros como o período de coleta e data da análise (Hora, Dia, Mês, Ano). Além disso, durante a fase experimental atual *in situ* testamos a hipótese de que a influência das diferentes ETAs, bem como em suas respectivas etapas operacionais, são similares aos das séries históricas anteriores (2016, 2017 e 2019).

Além disso, com base em dados experimentais de 2021, foi possível identificar qual é o pH ótimo (Jar test) para o qual haveria uma concentração ótima de coagulante necessária para a operação de tratamento ideal e compará-la com aquelas utilizadas nas séries históricas de 2016, 2018 e 2019. Em especial, a eficiência do tratamento na fase final de desinfecção com cloro (Cl).

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. OBJETIVO GERAL**

Testar experimental e estatisticamente a eficiência de tratamento da água em diferentes estágios e unidades operacionais da Estação de Tratamento de Água de Macapá (ETAM) (captação, coagulação, floculação, decantação, filtração e desinfecção) avaliando-se a variação da qualidade da água de abastecimento da ETAM influenciada pela dinâmica operacional.

### **2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- i) Testar estatisticamente a variação temporal das séries históricas disponíveis no período entre 2016, 2017 e 2019 quanto aos parâmetros da qualidade da água (pH, cloro, cor aparente, turbidez) nas diferentes unidades de operação unitárias de tratamento da ETAM (água bruta, floculação, decantação, pós-filtro, água tratada - desinfecção).
- ii) Estudar experimentalmente a eficiência da ETAM quanto ao uso dos produtos químicos utilizando-se ensaios de “Jar Test” para estimar o pH ótimo de coagulação e a concentração ideal do coagulante ( $Al_2(SO_4)_3$ ) e polímero como parâmetro econômico e ambiental relevante das fases operacionais.
- iii) Testar estatisticamente a conformidade físico-química (pH, cloro, cor aparente, turbidez) e microbiológica (coliformes totais e Escherichia Coli) da qualidade da água tratada monitorada *in situ*, considerando-se os fatores que influenciam os resultados comparados com os padrões estabelecidos na legislação (Portaria

GM/MS N° 888, de Maio de 2021), tanto para as séries históricas quanto para os experimentos de 2021 *in situ*.

### 3. JUSTIFICATIVA

Água de abastecimento é uma das principais necessidades básicas da civilização moderna. E, pela sua importância, necessita ser provida em quantidade e qualidade adequadas, especialmente como quesito básico de saúde pública, higiene e desenvolvimento da sociedade. Entretanto, apesar de sua importância estratégica para o setor de saneamento básico, e como fundamento de saúde pública, as Estações de Tratamento de Água (ETAs) na Amazônia, em especial no Estado do Amapá, têm sido injustificadamente negligenciadas (ARAÚJO et al., 2021), apresentando pouco interesse científico, apesar de indubitavelmente ser parte integrante e muito relevante do Sistema de Abastecimento de Água (SAA).

O saneamento básico tem sido cada dia mais discutido e apresentado relevância e interesse social, especialmente nas áreas mais precárias do país. Essa hipótese é reforçada após a aprovação do novo marco legal do saneamento básico (lei nº 14.026/2020/BRASIL, 2020) que busca alternativas em direção à “universalização” do serviço de saneamento básico estipulando um projeto de longo prazo para que contratos de prestação dos serviços públicos de saneamento básico garantam o atendimento de 99% da população com água potável e de 90% da população com coleta e tratamento de esgotos até 31 de dezembro de 2033.

Como é de conhecimento geral, as ETAs englobam uma das operações básicas de tratamento: captação, adução, tratamento e distribuição de água, e estas apresentam importância singular para todo esse complexo sistema cuja importância tornou-se ainda mais evidente como elemento preventivo de epidemias como a COVID-19, entre outras doenças de veiculação hídrica, tais como as diarreias agudas, hepatite, leptospirose entre outras (ARAÚJO et al. 2021).

A ETA é a instalação que tem como objetivo tornar a água captada (bruta) própria para o consumo humano através de modificações físico-químicas da água a partir do seu manancial, sendo necessárias para posteriormente torná-la em conformidade com padrões de potabilidade exigido pela legislação (BRASIL, 2021).

Dessa forma, é de fundamental gerar conhecimento básico sobre o funcionamento operacional nas unidades da ETAM. As operações em geral encerram processos físicos e químicos envolvidos no tratamento convencional da água. Isto é, adequar-se aos impactos das variações da qualidade da água bruta, frequentemente poluída por esgotos e outros efluentes urbanos, em função das conhecidas variações hidrometeorológicas locais e hidrológicas

(períodos de seca ou estiagem ou períodos chuvosos) e das marés semidiurnas (OLIVEIRA et al, 2019. ABREU et al., 2020; CUNHA et al., 2021).

O presente estudo busca sintetizar informações sobre a qualidade da água em cada etapa do tratamento (floculação, decantação, filtração e desinfecção) e observar de forma mais aprofundada a dinâmica operacional da ETAM, avaliando a qualidade da informação obtida a partir do monitoramento, e analisar a eficiência do tratamento de cada ETA com o objetivo de se registrar e propor melhorias e soluções operacionais focadas na conformidade legal dos parâmetros. Com efeito, induzir novos ensaios e estudos que busquem auxiliar na melhoria contínua da eficiência dos processos de tratamento da água de abastecimento e posterior distribuição à população.

Um aspecto importante da presente pesquisa é a realização de experimentos “Jar Test”, absolutamente necessário para identificar e, eventualmente, explicar possíveis falhas operacionais de tratamento das unidades ETA 1, ETA 2 e ETA 3. Os testes de jarro direcionam a melhor forma de tratamento, potencializando a economicidade ao sistema de abastecimento de água.

Portanto, diante do exposto, esse trabalho justifica-se também na medida que o funcionamento adequado da ETA (e seus subcomponentes), ou produto final (água potável), apresenta relevante interesse social e como necessária para a manutenção da civilização moderna. Os resultados aqui alcançados são críticos para o setor de saneamento. E, portanto, necessitam chegar ao conhecimento dos gestores e operadores, mas também dos principais interessados: os consumidores. Portanto, trata-se de estudo inédito e que forma um razoável embasamento experimental e científico de interesse para o setor, além de ser interesse público e crítico para o desenvolvimento socioeconômico de Macapá. E em Macapá a ETAM é a principal estação de tratamento de água do Estado do Amapá. Portanto, deveria servir de parâmetro ou referências para as demais ETAs do Estado, onde as condições operacionais são ainda mais deficientes e problemáticas.

## 4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O processo de tratamento da água envolve diversas fases operacionais unitárias de tratamento e requer o prévio conhecimento de conceitos quanto aos parâmetros analisados e das etapas percorridas. Com o intuito de facilitar a compressão do tema abordado serão explicadas as principais características da água bruta (natural) e como sua qualidade se relaciona com a potabilidade após cada etapa do tratamento.

As características das águas naturais são provenientes dos processos naturais e antrópicos que ocorrem no manancial. E devido a interação com os mananciais subterrâneos e águas superficiais, solo e atmosfera, a água apresenta constituintes de diferentes tipos e origens que interferem na qualidade da água dos mananciais (LENZI et al. 2014). Para caracterizar a água são determinados diversos parâmetros, representados por indicadores, os quais se constituem não conformes quando alcançam valores superiores (ou inferiores) aos estabelecidos para determinado uso (BRASIL, 2021; GROTT et al., 2018, BRASIL, 2021).

É relevante informar que na presente pesquisa trataremos apenas dos parâmetros-chave possíveis de monitorar ao longo de séries históricas disponíveis da ETAM/CAESA e obtidos *in situ* para fins de comparações com as séries históricas e, assim, verificarmos melhoria da eficiência das diferentes fases operacionais e em diferentes anos de monitoramento. Os referidos parâmetros chaves são: pH, Cor Aparente, Turbidez (séries históricas 2016, 2017 e 2019) e pH, Cor Aparente, Turbidez, Coliformes Termotolerantes (Coliformes Totais e *Escherichia coli* – *E. coli*) durante o monitoramento *in situ* para 2021.

### 4.1. Indicadores Físicos

#### 4.1.1. Turbidez

A turbidez pode ser definida como uma medida do grau de interferência à passagem da luz através do líquido. A alteração à penetração da luz na água decorre na suspensão, sendo expressa por meio de unidades de turbidez (uT). A turbidez dos corpos d'água é particularmente alta em regiões com solos erosivos, onde a precipitação pluviométrica pode carrear partículas de argila, silte, areia, fragmentos de rocha e óxidos metálicos do solo (ALEGRE et al., 2016). Grande parte das águas de rios brasileiros é naturalmente turva em decorrência das características geológicas das bacias de drenagem, ocorrência de altos índices pluviométricos e uso de práticas agrícolas, muitas vezes inadequadas. Ao contrário da cor, que é causada por substâncias dissolvidas, a turbidez é provocada por partículas em suspensão, sendo, portanto, reduzida por sedimentação (BRASIL, 2014). Segundo Oliveira et al., (2019) a zona fótica

próxima da captação de água da ETAM em Macapá é da ordem de 10 cm (distância da extensão da luz). Isto é, muito estreita, devido a elevada turbidez natural da água do Rio Amazonas).

A portaria nº 888/21 do Ministério da Saúde determina que nos casos de pós-filtração rápida o valor máximo permitido (VMP) é de 0,5 uT (unidade de Turbidez) em 95% das amostras e 1,0 uT no restante das amostras mensais coletadas. E em toda a extensão do sistema de distribuição (reservatório e rede) ou pontos de consumo este valor deverá atender ao VMP de 5,0 uT para turbidez. Contudo, vale frisar que este parâmetro geralmente apresenta uma relação mais incômoda com o aspecto sensitivo visual do que algum valor absoluto sanitário, pois nem sempre uma água totalmente transparente significa ser mais potável (KERRY et al., 2012).

#### 4.1.2. Cor

O parâmetro cor, em sistemas públicos de abastecimento de água, é esteticamente indesejável. A sua medida é de fundamental importância, visto que a água de cor elevada provoca intuitivamente a sua rejeição por parte do consumidor e o leva a procurar outras fontes de suprimento muitas vezes inseguras (BRASIL, 2013), mesmo que extremamente transparentes como as águas minerais usadas alternativamente (CUNHA et al., 2012; GROTT et al., 2018).

A cor da água é produzida pela reflexão da luz em partículas minúsculas de dimensões inferior a 1  $\mu\text{m}$  – denominadas coloides – finamente dispersas, de origem orgânica (ácidos húmicos e fúlvicos) ou mineral (resíduos industriais, compostos de ferro e manganês). Corpos d'água de cores naturalmente escuras são encontrados em regiões ricas em vegetação, em decorrência da maior produção de ácidos húmicos (VALERIO et al., 2018). Um exemplo internacionalmente conhecido é o do Rio Negro, afluente do Rio Amazonas. A cor é causada por substâncias dissolvidas e seu resultado é fornecido em unidades de cor, também chamadas uH (unidade Hazen) ou (mgPt-Co/L = miligrama de platina e cobalto por litro) (BRASIL, 2014). No estado do Amapá o alto Rio Araguari e seus afluentes apresentam águas com cores e tons esverdeadas ou escuras (CUNHA et al., 2019).

As águas naturais apresentam, em geral, intensidades de cor variando de 0 a 200 unidades. Valores inferiores a dez unidades são dificilmente perceptíveis. No entanto, a cloração de águas coloridas com a finalidade de abastecimento doméstico pode gerar coprodutos potencialmente cancerígenos (trihalometanos), derivados da complexação do cloro com a matéria orgânica em solução (PEREIRA; AURÉLIO; CASTRO, 2013; TSUTYIA, 2006; KERRY et al., 2012). Para

efeito de caracterização de águas para abastecimento, distingue-se a cor aparente, na qual se consideram as partículas suspensas, da cor verdadeira. A determinação da segunda realiza-se após centrifugação da amostra. Para atender ao padrão de potabilidade, a água deve apresentar intensidade de cor aparente inferior a cinco unidades (BRASIL, 2014; BRASIL 2021).

#### 4.1.3. Sabor e Odor

A conceituação de sabor envolve uma interação de gosto - salgado, doce, azedo e amargo - com o odor, sendo, portanto, imensuráveis (subjetivas). Apesar de sensações distintas, usualmente são referenciadas conjuntamente. Embora possam existir odores agradáveis, de ervas ou de terra, frequentemente associa-se o odor nas águas de consumo sob o ponto de vista negativo. A importância do sabor e odor testifica-se na significativa possibilidade da mencionada rejeição pela população abastecida conduzir ou induzir ao consumo e uso de outra fonte de qualidade duvidosa, mas insípida e inodora (LIBÂNIO, 2016; CUNHA et al., 2012; GROTT et al., 2018; ARAÚJO et al., 2021).

## 4.2. Indicadores Químicos

### 4.2.1. pH (Potencial Hidrogeniônico)

O termo pH representa a concentração de íons hidrogênio em uma solução. Na água, esse fator é de excepcional importância, principalmente nos processos de tratamento. Na rotina dos laboratórios das estações de tratamento, o pH é medido e ajustado sempre que necessário para melhorar o processo de coagulação/floculação da água e o controle da desinfecção. O valor do pH varia de 0 a 14. Abaixo de 7 a água é considerada ácida e acima de 7, alcalina. Água com pH 7 é neutra. Além disso, o condicionamento final do tratamento de água exige a correção do pH (devido a adição de sulfato de alumínio comumente utilizado em ETAs), a fim de evitar problemas como corrosão ou de incrustação nas canalizações de distribuição (LENZI, 2014). O intervalo de pH para águas de abastecimento estabelecido pela Portaria MS n.º 888/21 deve estar entre 6,0 e 9,0.

### 4.2.2. Alcalinidade

A alcalinidade indica a quantidade de íons na água que reagem para neutralizar os íons hidrogênio. Constitui-se, portanto, em uma medição da capacidade da água de neutralizar os ácidos, servindo assim para expressar a capacidade de tamponamento da água, isto é, sua

condição de resistir às mudanças do pH, tornando-se um fator importante na etapa de coagulação (SENEDA; GARCIA; REIS, 2021).

Ambientes aquáticos com altos valores de alcalinidade podem, assim, manter-se aproximadamente com os mesmos teores de pH, mesmo com o recebimento de contribuições fortemente ácidas ou alcalinas. Os principais constituintes da alcalinidade são os bicarbonatos ( $\text{HCO}_3^-$ ), carbonatos ( $\text{CO}_3^{2+}$ ) e hidróxidos ( $\text{OH}^-$ ). Outros ânions, como cloretos, nitratos e sulfatos, não contribuem para a alcalinidade (BRASIL, 2014). No Baixo Rio Amazonas, onde encontra-se a captação de água da ETAM, a presença dos carbonatos está intimamente vinculada com os processos biogeoquímicos do carbono, oxigênio, nitrogênio principalmente (degradação da matéria orgânica, tais como a respiração bacteriológica) (WARD et al., 2018), alterando dinamicamente a presença da matéria orgânica na água segundo as forçantes hidrológicas sazonais e efeitos de marés (LESS et al., 2021; ABREU et al., 2021).

#### 4.2.3. Trihalometanos

Os trihalometanos (THM) são compostos originados como subproduto das reações de oxidação da matéria orgânica pelo agente oxidante como o cloro no processo de desinfecção da água (SALGADO, 2008).

A sua formação em águas de abastecimento é influenciada por diversos fatores, sendo alguns deles: o tempo de exposição do cloro livre com a matéria orgânica presente na água; a temperatura do meio; o pH da água; a presença de bromatos; a concentração e o tipo de cloro dosado na água; concentração de matéria orgânica precursora de THM (DUARTE e PINTO, 2008).

A preocupação quanto a formação de THM's na água potável se deve ao fato de que são potencialmente prejudiciais à saúde humana quando ocorre sua longa exposição, sendo alguns dos efeitos de sua ingestão continuada a causa de câncer ou tumores (DUARTE e PINTO, 2008). A portaria MS nº 888/2021 estabelece um limite máximo da concentração de THM em 0,1 mg/L.

### 4.3. Indicadores Biológicos

As características biológicas das águas naturais referem-se aos diversos microrganismos que habitam o ambiente aquático. Sua relevância manifesta-se na possibilidade de transmitir doenças e na transformação da matéria orgânica dentro dos ciclos biogeoquímicos de diversos elementos.

#### 4.3.1. Coliformes Totais e Escherichia Coli

As bactérias do grupo coliforme habitam normalmente o intestino de homens e animais de sangue quente, servindo, portanto, como indicadoras da contaminação de uma amostra de água por fezes recentes (CUNHA et al., 2004; CUNHA et al., 2005; FURTADO et al., 2017; GROTT et al., 2018; OLIVEIRA et al., 2019). Como a maior parte das doenças associadas com a água é transmitida por via fecal, isto é, os organismos patogênicos, ao serem eliminados pelas fezes, atingem o ambiente aquático, podendo vir a contaminar as pessoas que se abastecem de forma inadequada desta água. Assim, conclui-se que as bactérias coliformes podem ser usadas como indicadoras desta contaminação (ARAÚJO et al., 2021). Quanto maior a população de coliformes em uma amostra de água, maior é a chance de que haja contaminação por organismos patogênicos, como por exemplo, *Escherichia coli* (*E. Coli*).

O emprego do exame de *E. coli* no monitoramento da água é feito com o intuito de verificar a possível presença de agentes patogênicos, enquanto o emprego do exame de coliformes totais afluente ao tratamento é um indicativo da qualidade da água tratada e eficiência da potabilidade (BRASIL, 2013; CUNHA et al., 2012; TSUTYIA, 2006; KERRY et al., 2012).

O anexo 1 da portaria nº888/2021 MS estabelece que em sistemas que abastecem mais de 20.000 habitantes, deve constar ausência de coliformes totais em 100 mL em 95% das amostras examinadas no mês pelo responsável pelo sistema ou por solução alternativa coletiva de abastecimento de água (SACAA) (BRASIL, 2021).

#### 4.4. Tratamento Convencional

A potabilização das águas naturais para fins de consumo humano tem como função essencial adequar a água bruta aos limites físicos, químicos, biológicos estabelecidos pela Portaria MS nº 888/2021 (BRASIL, 2021), tornando o efluente da estação incapaz de transmitir qualquer maléfico à população abastecida.

O tratamento de água consiste na remoção de partículas suspensas e coloidais, matéria orgânica, microrganismos e outras substâncias possivelmente prejudiciais à saúde humana, por acaso presentes nas águas naturais, aos menores custos de implantação, operação e manutenção, e gerando o menor impacto ambiental às áreas circunvizinhas. As tecnologias de tratamento disponíveis visam a conciliar tais objetivos (LIBÂNIO, 2016; TSUTYIA, 2006; VON SPERLING, 2020).

O principal método utilizado no Brasil é o tratamento convencional (ou ciclo rápido), e em menor frequência a de filtração lenta, flotação e filtração com membranas (HELLER e PÁDUA, 2010). O método convencional é caracterizado pela adição de coagulante, geralmente o sulfato de alumínio (amplamente utilizado), na unidade de mistura rápida e floculação, seguida de decantação, filtração, desinfecção e ajustes finais, como correção do pH e fluoretação. Aliás, a fluoretação não tem não ocorrido somente na ETAM, mas também aparentemente nas demais ETAs de todos os municípios do Estado do Amapá e até do Brasil, uma vez que seu uso tem sido evitado, por ser controverso e, eventualmente, até proibido devido a indefinição de seus efeitos potencialmente neurotóxicos em detrimento dos seus efeitos benéficos (CORRÊA et al, 2021). Portanto, a operação de fluoretação na ETAM é provavelmente inexistente ou indefinida pois não tem sido detectado flúor suficiente na água de consumo (CORRÊA et al, 2021).

#### 4.4.1. Coagulação

O processo de coagulação é a primeira operação unitária que compõe uma estação de tratamento de água (ETA) convencional. As estações de tratamento de água do tipo convencionais são um conjunto de operações unitárias em série e, para que os processos a jusante da etapa de coagulação possam ser operados de maneira adequada, é necessário que a sua operação ocorra em condições ideais (FERREIRA FILHO, 2017).

A coagulação tem por objetivo transformar as impurezas que se encontram em suspensão fina, estado coloidal e dissolvidas, em partículas que possam ser removidas pela decantação e filtração. Essa etapa consiste essencialmente na desestabilização das partículas coloidais e suspensas realizada pela conjunção de ações físicas e reações químicas, com duração de poucos segundos, entre o coagulante - usualmente um sal de alumínio ou de ferro -, a água e as impurezas presentes (SENEDA; GARCIA; REIS, 2021). Para melhor compreender os mecanismos intervenientes no processo de coagulação, vale ressaltar que as partículas suspensas e coloidais dispersas na água apresentam carga predominantemente negativa.

O processo de coagulação está sujeito a diversos fatores que podem comprometer na eficiência de formação dos flocos, destaca-se: o tipo de coagulante, o pH da água bruta, a natureza das partículas causadoras da turbidez e da cor e, também, a forma pela qual se dá a mistura do coagulante com a água.

O mecanismo dominante da coagulação é o de varredura e o coagulante mais utilizado, devido ao baixo custo e à eficiência na formação de flocos, é o sulfato de alumínio ( $Al_2(SO_4)_3$ )

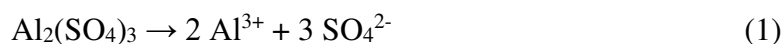
(SENEDA; GARCIA; REIS, 2021). No processo de coagulação aos produtos químicos adicionam-se os polímeros orgânicos sintéticos ou naturais (polieletrólitos) utilizados mais comumente como auxiliares de coagulação. Segundo Castro (2012) sua utilização visa a elevar a velocidade de sedimentação dos flocos ou, em estações de filtração direta, a aumentar a resistência destes aos efeitos de cisalhamento provocado pelas forças hidrodinâmicas do escoamento pelos interstícios do meio filtrante, retardando a ocorrência do traspasse e, conseqüentemente, prolongando a duração das carreiras dos filtros.

Outro fator de relevante influência na coagulação é o pH e a alcalinidade. O pH deve ser ajustado com produtos alcalinizantes para que ocorra a floculação. Mede-se o pH da água a tratar, ajustando-o para a formação dos flocos. Cada tipo de água requer um pH ótimo. Após determinar a melhor concentração de floculante, varia-se o pH para determinar o pH ótimo de floculação (universalmente conhecido como ensaio “jar test” é ideal para encontrar o pH ótimo de floculação e a melhor concentração do coagulante) (TSUTYIA, 2006; VON SPERLING et al., 2020). A alcalinidade em hidróxido existente na água a ser tratada deve ser avaliada, pois é o íon hidroxila que irá reagir com o cátion alumínio, proveniente do Sulfato de Alumínio, para formar o floco de Hidróxido de Alumínio (BRASIL, 2014).

#### 4.4.1.1. Reação química do Sulfato de Alumínio $Al_2(SO_4)_3$ com a água ( $H_2O$ )

O sulfato de alumínio ( $Al_2(SO_4)_3$ ) obtido por meio da reação química entre o óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ) e o ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ). Quando essas duas substâncias misturam-se na água, ocorre uma transformação química que forma uma substância gelatinosa, o hidróxido de alumínio ( $Al(OH)_3$ ) (MUNDO EDUCAÇÃO, 2021).

Essa transformação química ocorre porque, em meio aquoso, o sulfato de alumínio gera os seguintes íons:



Os íons  $Al^{3+}$  passam a atuar de duas formas: a minoria desses cátions neutraliza as cargas negativas das impurezas presentes na água; a maioria desses cátions interage com os íons hidroxila ( $OH^-$ ) da água, formando o hidróxido de alumínio:



O hidróxido de alumínio ( $Al(OH)_3$ ) está carregado positivamente e, por essa razão, consegue neutralizar as impurezas coloidais carregadas negativamente que estão na água. O

resultado é que as partículas de sujeira sofrem uma aglutinação e “grudam” no hidróxido de alumínio, formando flocos, sólidos e de tamanho maior. Além da formação do hidróxido de alumínio ocorre também uma considerável liberação de íons  $H^+$  na água o que ocasiona uma queda no pH aumentando a acidez do líquido.

#### 4.4.1.2. “Jar Test” (Teste de Jarros)

O ensaio de Teste de Jarros (ou ensaio de coagulação) é um procedimento de rotina em estações de tratamento de água para determinar a dosagem dos produtos químicos utilizados no tratamento. Pode-se dizer que é uma simulação experimental do que ocorre na ETA em nível de bancada, tendo em vista que cada jarro representa uma condição operacional específica da estação de tratamento (BRASIL, 2013).

Por se tratar de uma espécie de reprodução do que ocorre nas ETAs, e que cada ETA possuiu sua particularidade, assim como a água bruta captada é única (OLIVEIRA et al., 2019), é necessário que se conheça previamente suas características, tais como: cor, turbidez, pH, alcalinidade e temperatura e os parâmetros hidráulicos da estação de tratamento (vazão, tempo de detenção no floculador e tempo de decantação).

#### 4.4.2. Floculação

A essência do propósito do processo de floculação é possibilitar a agregação das partículas coloidais, de modo que estas possam ser removidas da fase líquida por processos de separação sólido-líquido, tais como a decantação ou a filtração, no caso de instalações concebidas como filtração direta (FERREIRA FILHO, 2017).

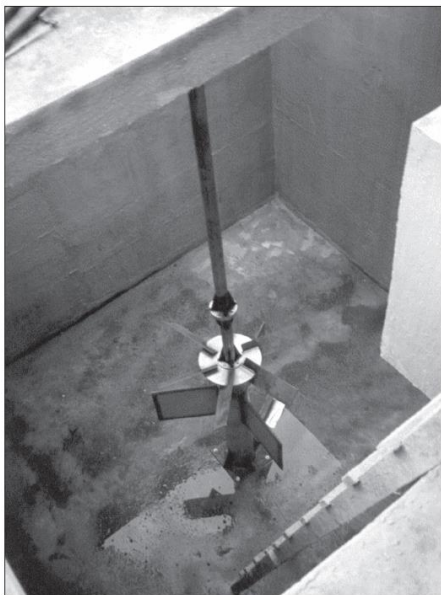
Nos tanques de floculação, os pequenos microflocos aglutinam-se formando flocos que, ao saírem dos tanques, devem ter tamanho e densidade adequados ao processo de remoção que segue: clarificação por sedimentação ou por flotação e/ou filtração. O processo de agregação é dependente da duração e da quantidade de energia aplicada (gradiente de velocidade). A energia aplicada para a floculação pode ser por meios hidráulicos ou mecânicos (RICHTER, 2009).

Na etapa da floculação, a agitação da água vai diminuindo gradualmente, de forma a possibilitar a formação dos flocos e esses não serem destruídos pela agitação intensa da água nem se depositarem no fundo por uma agitação muito lenta.

Segundo Heller e Pádua (2010) a floculação pode ser realizada de forma mecânica (Figura 1) ou hidráulica (Figura 2). A floculação hidráulica apresenta menor custo de construção e manutenção e maior simplicidade operacional. Porém, não possui flexibilidade quanto às

alterações dos valores de gradientes de velocidade médios, o que pode tornar inadequado seu emprego nas ETAs em que a água bruta apresenta sazonalmente significativa variação de qualidade (OLIVEIRA et al., 2019).

Figura 1: Floculador Mecânico



Fonte: RICHTER (2009)

Figura 2: Floculador Hidráulico de Fluxo Horizontal CAESA



Fonte: Acervo do Autor (2021)

#### 4.4.3. Decantação

Após a floculação, a água é transferida para os decantadores e a matéria em suspensão vai se depositando pela ação da gravidade. Os tanques de decantação possuem o fundo inclinado para facilitar a descarga, isto é, facilitar a remoção da matéria decantada. O tempo de detenção é calculado de maneira que haja uma quase total deposição de materiais sedimentados. Na decantação verifica-se a deposição de matéria em suspensão, pela ação da gravidade, ou seja, trata-se de um processo essencialmente físico (TSUTYIA, 2006). Este processo consiste em tornar as águas que carregam materiais em suspensão mais lentos, provocando a decantação. De acordo com FERREIRA FILHO (2017) mediante a agregação das partículas coloidais, estas conseguem adquirir um diâmetro físico tal que confirmam uma velocidade de sedimentação elevada o suficiente para serem removidas por sedimentação gravitacional.

Deve ser feita a lavagem quando a camada de lodo tornar-se muito espessa. A decantação é o preparo para a filtração. Assim, quanto melhor for a decantação melhor será a filtração, aumentando a vida útil dos filtros. Para tanto, a cor da água deve ser baixa, 5 a 10 unidades, no máximo. E o decantador deve remover no mínimo 90% da turbidez encontrada na água bruta (BRASIL, 2014; KAMIWADA; ANDRADE, 2020). A figura 3 apresenta um

exemplo de decantador, a água é coletada a partir da superfície e mais ao fundo ficam os sedimentos.

Figura 3: Decantadores ETA 3 Caesa



Fonte: Acervo do Autor (2021)

#### 4.4.4. Filtração

No que tange ao tratamento de água, a filtração constitui-se no processo que tem como função primordial a remoção das partículas responsáveis pela cor e turbidez, cuja presença reduziria a eficácia da desinfecção na inativação dos microrganismos patogênicos (LEVY et al., 2008). Apesar desta evidência, filtração e outras etapas do tratamento tomam-se prescindíveis quando a qualidade da água bruta, oriunda sobretudo de mananciais subterrâneos, permite efetuar apenas a desinfecção (LIBÂNIO, 2016; GROTT et al., 2018; UNIFAP, 2021). Nas estações de tratamento convencionais cabe à filtração provavelmente a função mais relevante, por se constituir na etapa na qual as falhas - porventura ocorridas na coagulação, floculação e decantação - podem ser corrigidas, assegurando a qualidade da água tratada.

Nas ETAs tradicionais, que tratam um grande volume de água, são usados filtros por gravidade, que são capazes de filtrar a água de forma mais ágil. Em geral a lavagem desse tipo de filtro é realizada no sentido oposto da água filtrada, procedimento denominado “retrolavagem”. A ETAM CAESA funciona exatamente com este princípio.

#### 4.4.5. Desinfecção

O tratamento de águas de abastecimento tem como objetivo principal a produção de água adequada do ponto de vista estético e segura do ponto de vista microbiológico (sanitário). Dessa maneira, é necessário que sejam previstas alternativas tecnológicas que possibilitem garantir a remoção física e inativação dos microrganismos patogênicos que eventualmente estejam presentes na fase líquida (FERREIRA FILHO, 2017; CUNHA et al., 2012). Vale ressaltar que a desinfecção se diferencia da esterilização uma vez que aquela visa a remoção dos organismos patogênicos ao passo que esta última tem a finalidade de eliminar todas as formas de vida presentes no meio.

Os processos de coagulação, floculação, decantação (ou sedimentação) e filtração são essencialmente responsáveis pela remoção de partículas coloidais presentes na fase líquida e, entre estas, incorporam-se microrganismos patogênicos, que também são partículas de origem orgânica. No entanto, como não é possível garantir a segurança microbiológica da água tratada somente por sua remoção física, é necessário que haja um processo adicional que possibilite a inativação de microrganismos patogênicos presentes no líquido (FERREIRA FILHO, 2017).

A desinfecção de águas destinadas ao consumo humano pode ser realizada basicamente por dois grupos principais de desinfetantes: agentes químicos e físicos. Os primeiros constituem elementos ou compostos com potencial de oxidação, incluindo o cloro, dióxido de cloro, peróxido de hidrogênio, ácido acético, bromo, iodo, permanganato de potássio, cloreto de bromo e ozônio. Os agentes físicos, por sua vez, apresentam ação referenciada à energia de radiação, destacando-se a radiação UV, a radiação gama, radiação solar e, em nível domiciliar, a fervura (LIBÂNIO, 2016).

O cloro constitui o mais importante dentre todos os elementos utilizados na desinfecção da água. Além desta aplicação, ele também é usado no tratamento de águas para eliminar odores e sabores, diminuir a intensidade da cor, auxiliar no combate à proliferação de algas, colaborar na eliminação de matérias orgânicas e auxiliar a coagulação de matérias orgânicas. É desinfetante comumente empregado e considerado eficaz, pois age sobre os micro-organismos patogênicos presentes na água, não é nocivo ao homem na dosagem requerida para desinfecção, é econômico, não altera outras qualidades da água depois de aplicado, não requer operação complexa para sua aplicação e mantém um residual ativo na água, isto é, sua ação contínua depois de ser aplicado (NASCIMENTO et al, 2016).

O cloro é aplicado na água por meio de dosadores, que são aparelhos que regulam a quantidade do produto a ser ministrado, dando-lhe vazão constante. Pode ser aplicado sob a

forma gasosa. Nesse caso, usam-se dosadores de diversos tipos. O acondicionamento do cloro gasoso é feito em cilindros de aço, com várias capacidades de armazenamento (Figura 4).

Figura 4: Cilindros de Cloro Gás CAESA



Fonte: Acervo do Autor (2021).

É importante frisar, a despeito da importância fundamental do uso do cloro em ETAs, em estudos recentes de Oliveira et al., (2019) na ETAM, estudando cianobactérias potencialmente tóxicas (água bruta e tratada), um curioso resultado surgiu em relação às cianotoxinas. Assim, os referidos autores detectaram aumento das cianotoxinas na água tratada no período de julho de 2018, em comparação à sua concentração na água bruta. Isto é, pareceu ocorrer uma eventual inconsistência. Contudo, os referidos autores ponderam esta observação informando que o processo de cloração (desinfecção) tende a destruir a parede celular das cianobactérias (potencialmente tóxicas) liberando substâncias “armazenadas” no interior da célula do microrganismo na água bruta antes e durante o tratamento.

#### 4.4.6. Correção do pH e Adição de Flúor

A água final a ser distribuída para a população necessita de cuidado a mais para garantir a qualidade e a potabilidade da água a ser consumida, isto é: a correção do pH e potencialmente adição de flúor.

A correção do pH é um método preventivo da corrosão do encanamento. Consiste na alcalinização da água para remover o gás carbônico livre e para provocar a formação de uma película de carbonato na superfície interna das canalizações. Para a formação da camada ou película protetora, eleva-se o pH da água a ponto de saturação (geralmente utiliza-se o hidróxido

de cálcio). O controle da quantidade de produto a ser aplicado é feito por intermédio da determinação do pH utilizando-se equipamento específico (BRASIL, 2014).

Adição de flúor não deve ser considerada tratamento da água, e sim um aditivo necessário e recomendado pelo Ministério da Saúde (Portaria nº. 635/Bsb, de 26 de dezembro de 1975). Esta legislação é obviamente muito antiga apesar de vigente e, no momento, parece não poder ser recomendada devido a recentes estudos sobre sua potencial neurotoxicidade. E, ainda, há controvérsias sobre a razão custo/benefício da fluoretação da água para consumo humano como uma medida preventiva de comprovada eficácia. Isto é, que reduza a prevalência de cárie dental entre 50% e 65% em populações sob exposição contínua desde o nascimento, por um período de aproximadamente dez anos de ingestão da dose ótima (CORRÊA et al, 2021).

#### **4.5. Portaria GM/MS Nº 888 – 04/05/21 (Padrões De Potabilidade)**

A portaria GM/MS Nº 888 de 04 de maio de 2021 dispõe sobre os procedimentos de controle de vigilância da qualidade da água para consumo humano, seu periódico monitoramento e padrão de potabilidade. Esta portaria também define os entes e instituições competentes para dispor sobre os sistemas de abastecimento assim como suas respectivas responsabilidades e penalidades. Nos anexos da portaria as tabelas indicam os parâmetros a serem analisados assim como os valores máximos e mínimos permitidos para cada indicador.

Esta legislação alterou alguns padrões de potabilidade definidos no anexo XX da Portaria de Consolidação Nº 05 de 2017. Sendo assim, a partir da publicação da portaria GM/MS nº 888/2021, as análises de qualidade da água devem ter como base o atual texto legal. Os parâmetros exigidos estão divididos em tabelas de padrão de potabilidade, separados por substâncias orgânicas, inorgânicas, agrotóxicos e metabólitos, subprodutos desinfecção, compostos organolépticos e padrão bacteriológico.

A água pode ser considerada potável quando os resultados das análises se apresentarem dentro dos valores estabelecidos na referida legislação (conformidade legal) (CUNHA et al., 2012; GROTT et al., 2018; OLIVEIRA et al., 2019).

#### **4.6. Análise Estatística e Testes de Hipóteses Para a Variação Físico-Química da Qualidade da Água na ETAM Por Operação Unitária no Tempo**

Os dados de parâmetros da qualidade da água e os 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 e Levene foram inicialmente aplicados para avaliar as premissas de normalidade e homoscedasticidade (variância) e inflação da variância em caso de variáveis independentes muito colineares. Assim, os testes de análise da inflação da variância (VIF) serve para evitar efeitos excessivos de colinearidade em análises de correlações multivariadas (CRAWLEY, 2007).

Análises de regressão simples e múltiplas para as variáveis-chave de tratamento na ETAM foram elaboradas com a finalidade de testar a explicabilidade de variáveis ou fatores independentes potencialmente correlacionados com as etapas operacionais ou com diferentes ETAs que compõem fisicamente a ETAM.

O método de Kruskal-Wallis foi também aplicado para testar múltiplas comparações (diferentes situações operacionais e variação da concentração de Cloro ( $\alpha < 5\%$ ) entre as diferentes fases ou etapas operacionais (captação, floculação, decantação, filtração, desinfecção etc) para a série temporal de estudo entre 2016, 2017 e 2019, complementada por uma série atual de 2021 (contraprova). Este teste é não paramétrico e por isso não utiliza médias ou variância como parâmetros do modelo, mas sim os próprios dados numéricos diretamente. Por exemplo, os postos ocupados por eles após a ordenação por grupo de análise separadamente. Após a ordenação foi testada a hipótese de igualdade da soma dos postos de cada grupo (AYRES et al., 2007).

## 5. MATERIAIS E MÉTODOS

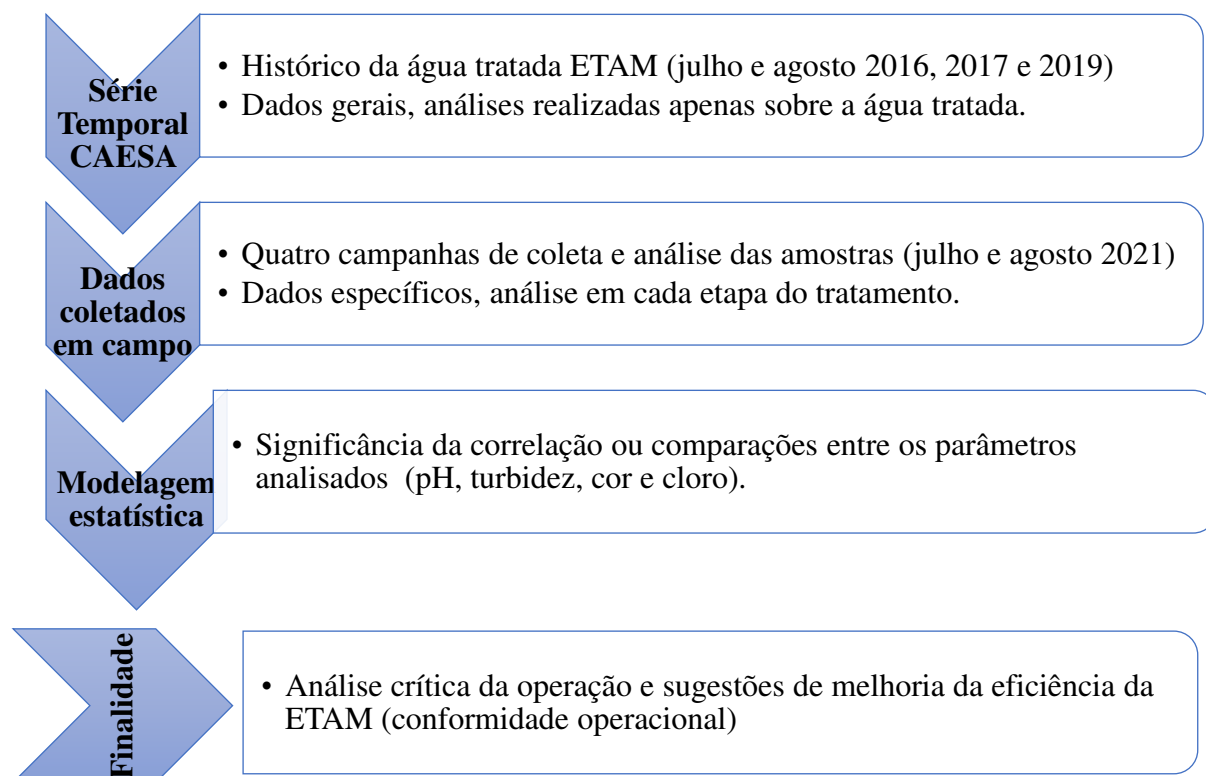
Neste capítulo são apresentados os documentos, premissas e considerações utilizadas nas metodologias aplicadas que possibilitaram o alcance dos resultados.

### 5.1. Fluxograma das Atividades

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 própria CAESA e referentes somente aos meses de julho e agosto dos anos de 2016, 2017 e 2019. Dados complementares obtidos *in situ* foram coletados em quatro campanhas pelo autor por meio de coleta e análise de amostras realizadas em julho e agosto de 2021, para efeito comparativo.

Os dados históricos (2016, 2017 e 2019) são mais gerais uma vez que apresentam apenas o resultado final da água tratada. Por outro lado, os dados coletados pelo autor em 2021 são mais específicos pois as análises foram realizadas em cada etapa do tratamento (água bruta, floculada, decantada, filtrada e tratada). Deste modo, foi possível avaliar em qual etapa do tratamento ou qual ETA houve mais variações ou seria passível o aprimoramento operacional (Figura 5).

Figura 5: Fluxograma com as principais etapas metodológicas da presente pesquisa.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

## 5.2. Área de Estudo

A Estação de Tratamento Água de Macapá (ETAM) está localizada no bairro do Trem, 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. E a área total da ETAM é de aproximadamente 30.000 m<sup>2</sup> (200 m x 150m).

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 6).

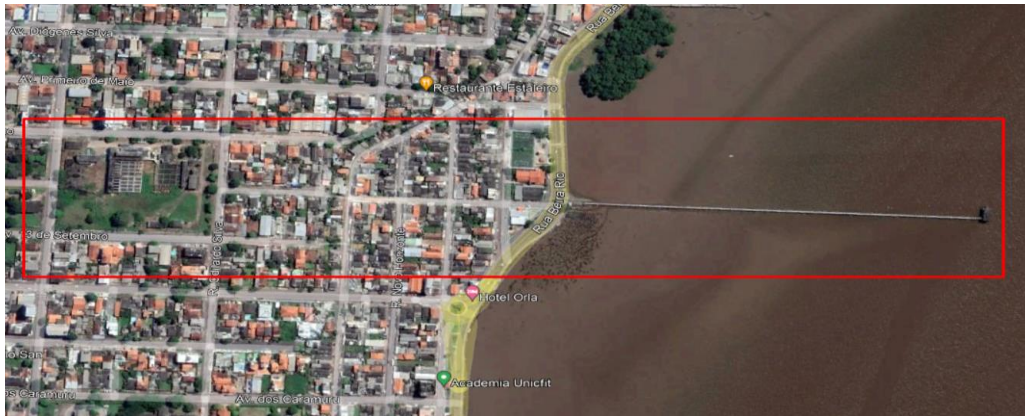
Estas ETAs são abastecidas pelo sistema de captação localizado na orla da cidade. Na captação de água bruta há uma estação de recalque, cujo objetivo é conduzir a água do Rio Amazonas até o tratamento na ETAM. Assim, um conjunto de moto-bombas bombeia água bruta pela adutora. A adutora de água bruta possui 1.000 mm de diâmetro e 1.250 m de comprimento, constituída de aço carbono, com sistema de operação ininterrupta (24 h/dia) (Figura 7).

Figura 6: Localização dos módulos de tratamento (ETA 1, 2 e 3) na ETAM



Fonte: Google Earth (adaptado) (2022)

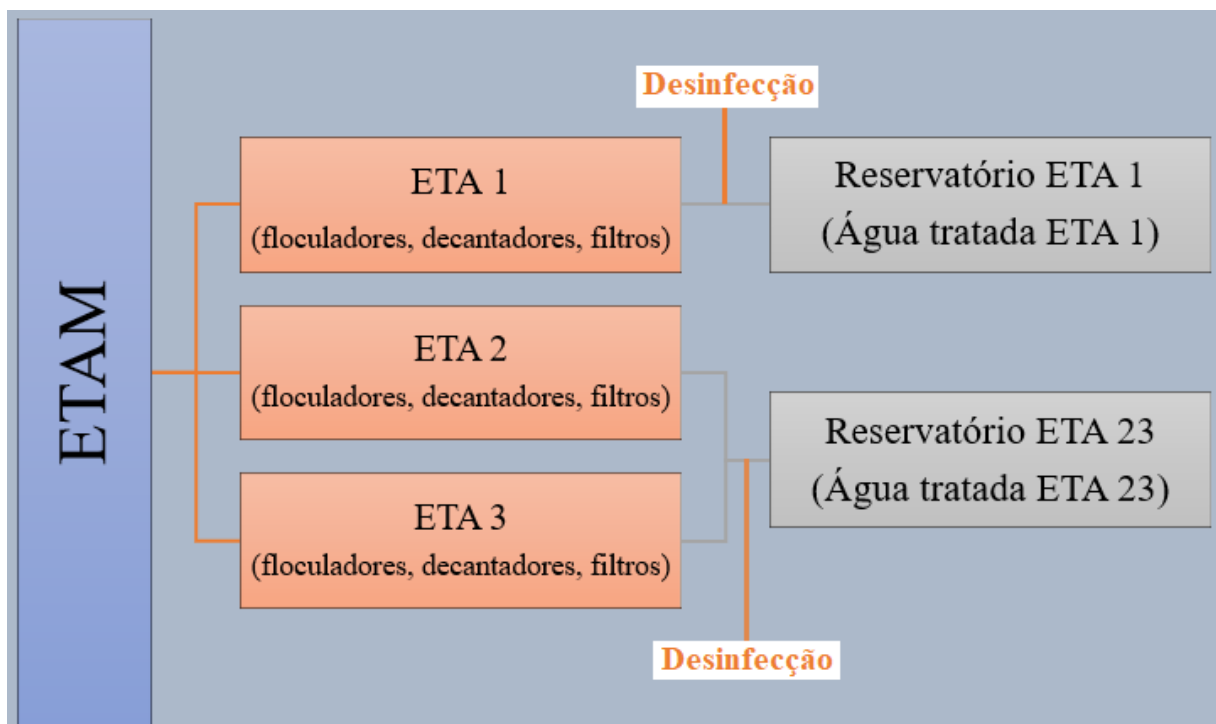
Figura 7: Captação e Estação de Tratamento



Fonte: Google Earth (adaptado) (2022).

Destaca-se que a água tratada das ETAs 2 e 3 são um média do tratamento dessas duas ETAs, pois ambas abastecem o mesmo reservatório, dessa forma quando se refere à água tratada da ETA 2 ou ETA 3, tem-se a água tratada da ETA 23. O fluxograma apresentado na figura 8 ajuda a entender a dinâmica.

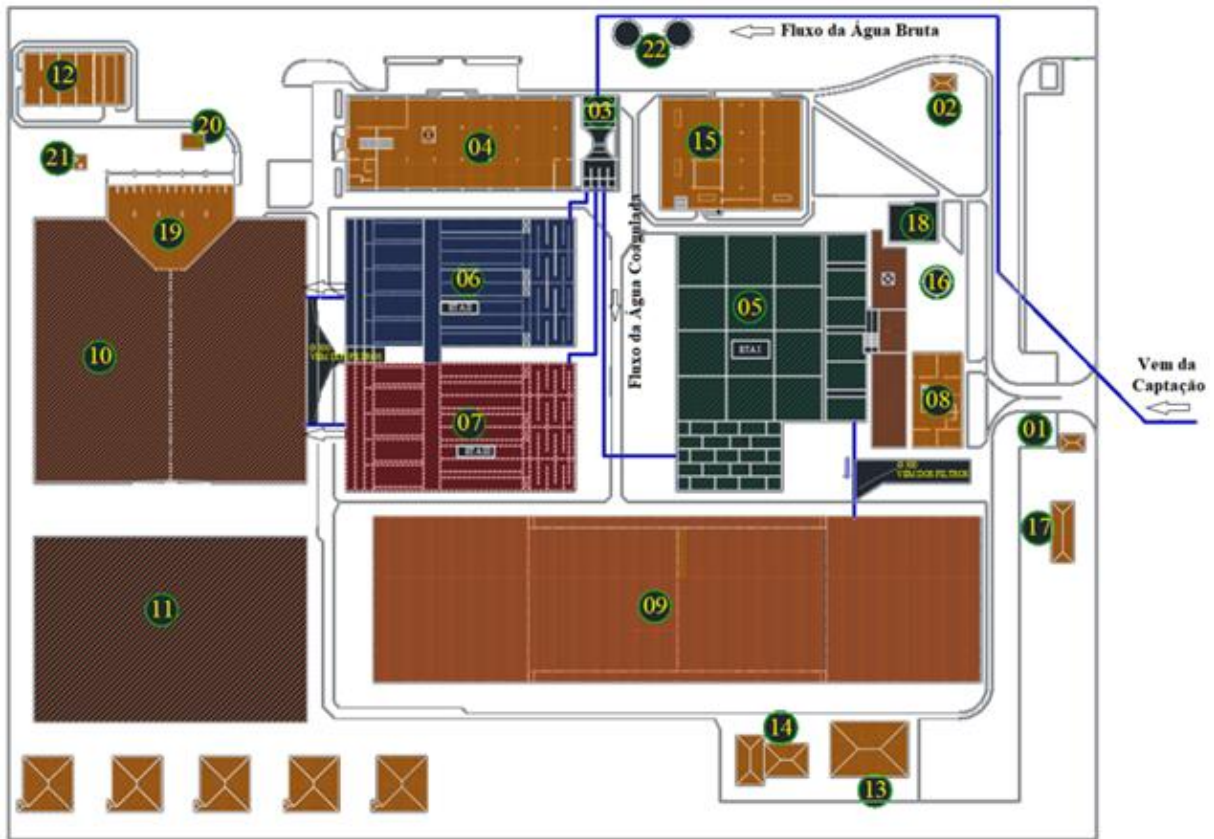
Figura 8: Fluxograma de operação da ETAM.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

A partir da planta baixa da ETAM (Figura 9) é possível compreender a dinâmica de operação dentro do sistema de tratamento de água.

Figura 9: Planta baixa ETAM e detalhes das operações unitárias



1 – Portaria	7 – ETA III	13 – EEAT ETA I	18 – Caixa de passagem água filtrada
2 – Balança	8 – Antiga Casa de Química	14 – Subestação ETA I	19 – EEAT ETA II e ETA III
3 – Calha Parshall	9 – Reservatório ETA I	15 – Câmara de Contato e Sala de Cloro-gás	20 – Caixa de Válvulas
4 – Casa de Química	10 – Reservatório ETA II e ETA III	16 – Reservatório para lavagem dos filtros ETA I	21 – Caixa de Válvulas
5 – ETA I	11 – Ampliação Reservatório	17 – Cabine de Medição de Energia	22 – Tanques de Sulfato Líquido
6 – ETA II	12 – Subestação ETA II e ETA III		

Fonte: CAESA (adaptado) (2021)

### 5.3. O Padrão de Potabilidade

As características físico-químicas e bacteriológicas da água são determinantes na escolha da tecnologia de tratamento a ser utilizada e da qualidade da água a ser fornecida a população. São diversos os parâmetros utilizados para caracterizar a qualidade de águas potáveis. Neste trabalho destacam-se: a cor, a turbidez, pH, o cloro residual livre, coliformes totais e *Escherichia coli*.

A portaria GM/MS N° 888 de 04 de maio de 2021 dispõe sobre os procedimentos de controle de vigilância da qualidade da água para consumo humano, seu periódico monitoramento, padrão de potabilidade, também define os entes e instituições competentes para dispor sobre os sistemas de abastecimento assim como suas respectivas responsabilidades e penalidades.

A referida legislação ainda estabelece os valores máximos e mínimos para os parâmetros relacionados a qualidade da água fornecida à população, os quais deverão ser obedecidos nas condições da Portaria n° 888/2021-MS, conforme o quadro 1 a seguir que demonstra os parâmetros analisados nesse trabalho e os limites estabelecidos:

Quadro 1: Parâmetros analisados e limites da norma de potabilidade.

	Parâmetros	Unidade	Limites da norma
<b>Físicos</b>	Turbidez	uT (unidade de turbidez)	- Após filtro $\leq 0,5$ uT em 95% das amostras. - $\leq 5$ uT na rede de distribuição;
	Cor	uH (unidade de Hazen) mgPt-Co/L	$\leq 15$ mgPt-Co/L (ou uH);
<b>Químicos</b>	pH	pH	Entre 6 e 9,5 pH
	Cloro Residual Livre (CRL) (Cl)	mg/L	- Entre 0,2 a 2,0 mg/L na rede de distribuição e até 5 mg/L na saída das ETAs.
<b>Micro-biológicos</b>	Coliformes Totais	NMP*/100mL	Ausência em amostras de 100mL de água
	Escherichia Coli	NMP*/100mL	Ausência em amostras de 100mL de água

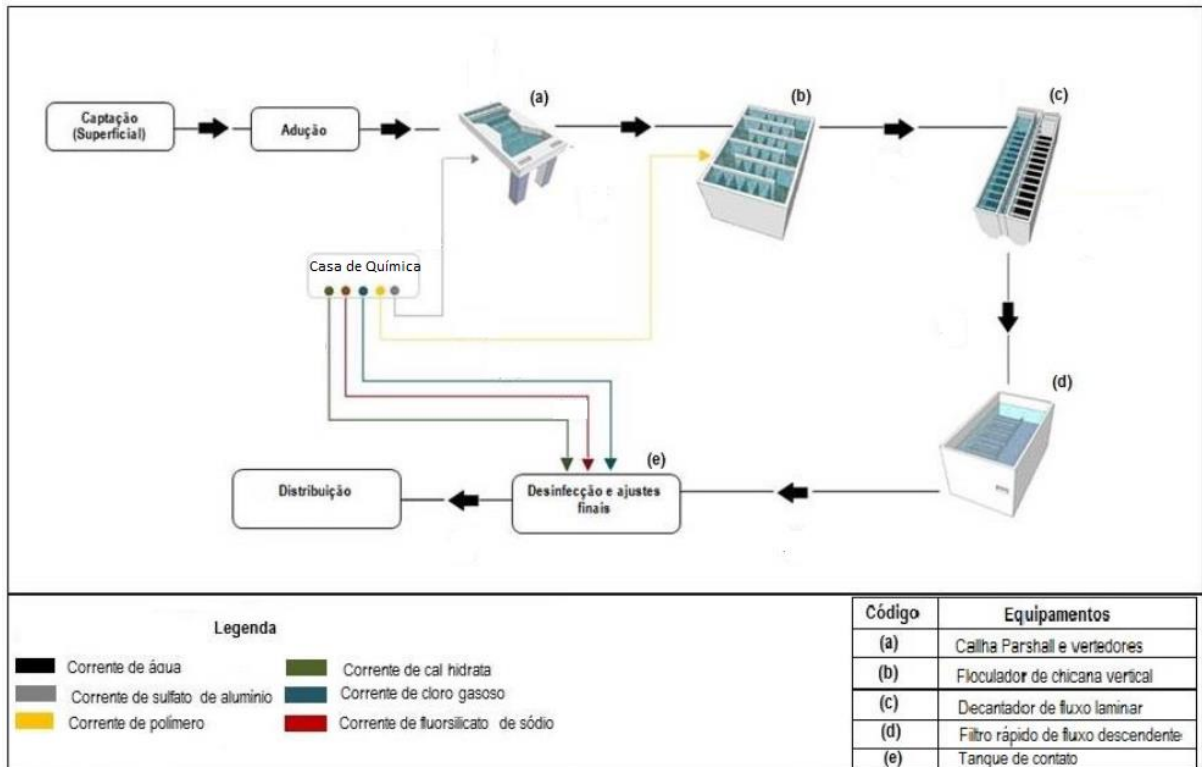
\*NMP = Número mais provável

Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

## 5.4. Dinâmica operacional da ETAM

As ETAs 1, 2 e 3 são estações de ciclo completo, pois envolve coagulação, floculação, decantação, filtração e desinfecção. O fluxograma da figura 10 detalha como ocorre o processo de tratamento em cada estação de tratamento.

Figura 10: Fluxograma processo modelo de potabilização da água.



Fonte: BEZERRA, P. G. F (2017).

A água bruta recalcada para a ETAM é direcionada para a calha Parshall, onde é adicionado o coagulante (Figura 11) que se mistura com a água através da própria agitação proporcionada pelo vertedor da calha Parshall. O reagente coagulante é o Sulfato de Alumínio ( $Al_2(SO_4)_3$ ) que é utilizado na forma líquida (solução 50% v/v) e/ou a partir de solução preparada *in loco* quando na forma sólida (embalagens de 25 Kg), produtos fornecidos pela empresa BAUMINAS QUÍMICA LTDA.

Figura 11: Calha Parshal e dosagem do coagulante.



Fonte: Acervo do autor (2021)

A concentração ótima para a dosagem do coagulante é calculada a partir do Teste de Jarros, realizado periodicamente pela equipe do 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 estação de tratamento de água, em busca da condição operacional que resulte na melhor eficiência possível, considerando-se as características da água a ser tratada, com a aplicação de reagentes e controle dos parâmetros envolvidos no processo (TSUTYIA, 2006).

No laboratório da CAESA o equipamento utilizado para realizar o ensaio (Figura 12) é composto de seis jarros idênticos e com capacidade de dois litros cada, contendo agitadores em seu interior (item A) que são acionados através de mecanismos que servem para otimizar a mistura dentro de cada jarro. A velocidade de rotação de cada agitador está relacionada com o controle de ajuste em “rpm” (rotações por minuto) e a aplicação do coagulante é feita por tubos de ensaio interligados (item B) por uma alavanca propiciando o contato simultâneo do coagulante nos tubos de ensaio com os jarros em questão.

Figura 12: Equipamento para ensaio de Jar Test CAESA com seis réplicas utilizadas simultaneamente.



Fonte: Acervo do Autor (2021)

A dinâmica do Jar Test consiste em coletar amostras da água bruta que será tratada e dosar diferentes concentrações do coagulante (ou outra substância que possa ter verificada) em cada amostra. Durante o ensaio são mantidos a mesma rotação e o 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).

Destaca-se que o coagulante mais utilizado em estações de tratamento de água é o Sulfato de Alumínio e o excesso desse reagente na água também reduz significativamente o pH da reação, como apresentado no item 4.5.1.1. Dessa forma, uma concentração acima do ideal torna o processo ineficaz (desperdício ou excesso de reagentes). Portanto, o controle do pH ótimo de floculação é de vital importância no tratamento da água, eficiência e economicidade do tratamento (TSUTYIA, 2006). E, além de interferir na acidez altera a eficiência da cloração (desinfecção), devido às potenciais mudanças do equilíbrio químico nesta fase operacional.

Na produção deste trabalho foram realizados três ensaios diferentes, a fim de analisar qual é o processo mais eficiente:

- I) Utilizando apenas sulfato de alumínio na concentração de 10g/L (1%).
- II) Utilizando sulfato de alumínio (10g/L) e polímero (0,5g/L).
- III) Utilizando sulfato de alumínio (10g/L), Cal (5g/L) e polímero (0,5g/L).

O preparo das soluções foi realizado utilizando os equipamentos disponíveis no laboratório da CAESA como apresentado na Figura 13 a seguir.

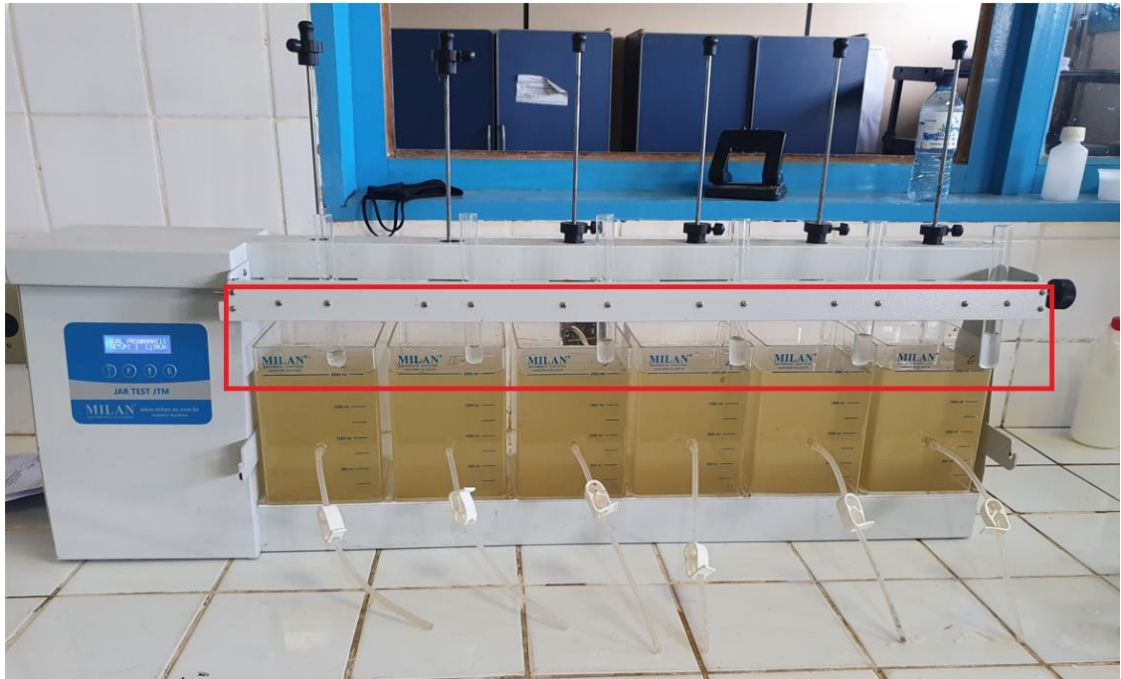
Figura 13: Preparação das soluções para realização do Jar Test



Fonte: Acervo do Autor (2021)

Com as soluções prontas foram coletadas amostras e preparada as dosagens dos reagentes nos tubos de ensaio como em destaque na Figura 14.

Figura 14: Solução nos tubos de ensaio e preparação das amostras nos jarros.



Fonte: Acervo do Autor (2021)

O quadro 2 abaixo ilustra quais reagentes e as respectivas quantidades foram utilizados em cada ensaio:

Quadro 2: Dados utilizados nos ensaios de Jar Test na ETAM em Julho e Agosto de 2021 (*in situ*)

Jar Test	Concentração dos Reagentes (g/L)	Unidade Experimental (Número do Jarro)					
		1 (mL)	2 (mL)	3 (mL)	4 (mL)	5 (mL)	6 (mL)
Test 1	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (10 g/L)	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0
Test 2	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (10 g/L)	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0
	Polímero (0,5 g/L)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Test 3	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (10 g/L)	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0
	Polímero (0,5 g/L)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	Cal (5 g/L)	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0

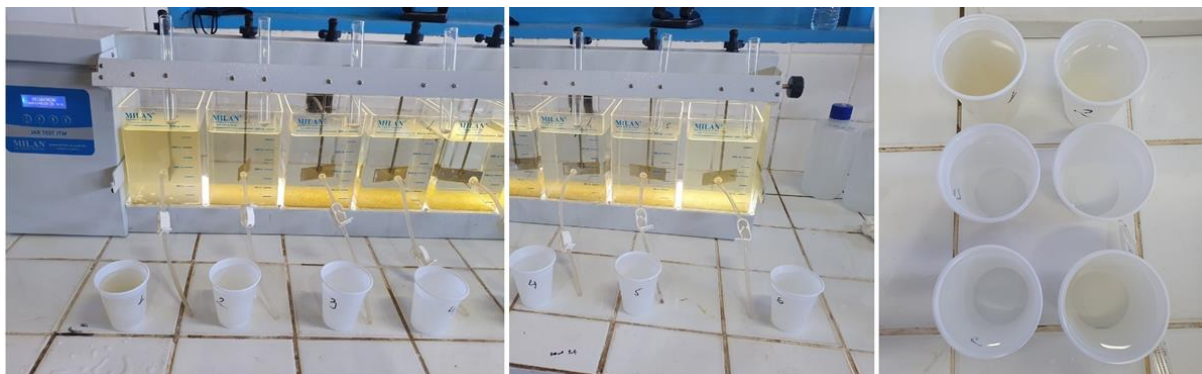
Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

O equipamento de Jar Test foi configurado para simular a operação da ETAM. Para isso, nos três ensaios, o processo iniciou-se com 2 minutos com as palhetas em **150 rpm** (rotação por minuto), simulando o processo de mistura rápida; 10 minutos com as palhetas em **50 rpm** como na etapa de floculação e 15 minutos **sem agitação** para simular o processo de decantação.

No primeiro ensaio foi adicionado apenas o coagulante no início (na etapa de mistura rápida); no segundo ensaio foi acrescentado o coagulante na primeira etapa e o polímero na etapa de floculação; e no terceiro teste primeiro foi adicionado a Cal e imediatamente depois o

sulfato de alumínio (ainda na mistura rápida), sendo o polímero utilizado apenas na etapa de floculação. Após esses procedimentos recolheu-se amostras de cada jarro (Figura 15) e foram analisados os parâmetros de cor, turbidez e pH. Os resultados estão apresentados no próximo capítulo.

Figura 15: Amostras obtidas após ensaio de Jar Test (resultado qualitativo) em Julho e Agosto de 2021

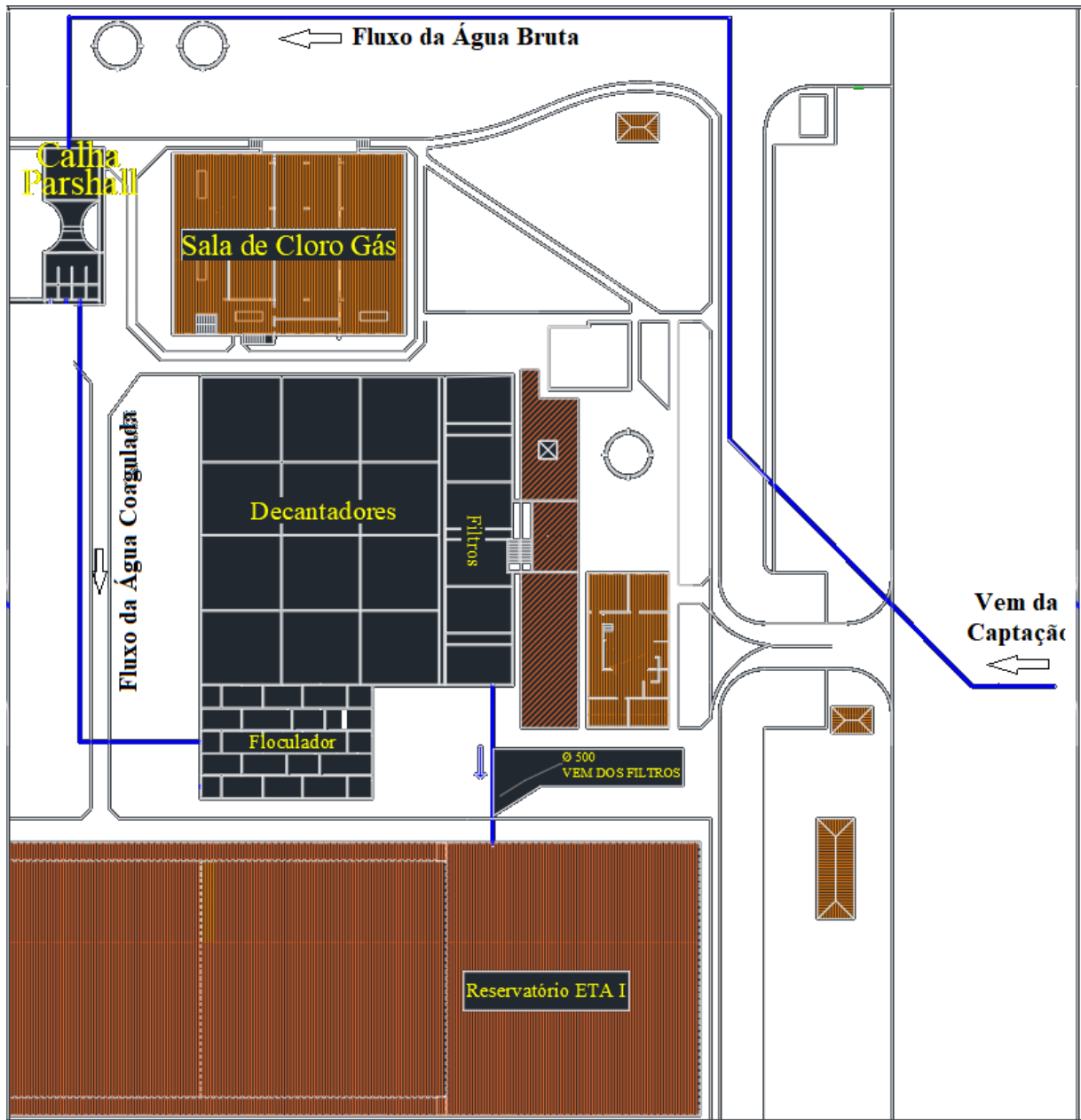


Fonte: Acervo do autor (2021)

Após a mistura rápida e a coagulação na calha Parshall, a água segue para os três módulos de tratamento (ETA 1, ETA 2 e ETA 3), ressaltando-se que só há uma única calha Parshall que abastece as três ETAs.

A Figura 16 representa a planta baixa indicando a dinâmica da ETA 1. Nesse módulo de tratamento o processo inicia-se com a chegada da água já coagulada nos flocculadores que são do tipo hidráulico de chicanas com fluxo vertical (figura 17). Posteriormente ocorre a etapa de decantação, a qual é composta de 12 decantadores onde a massa líquida possui um movimento laminar a ponto dos flocos formados na etapa anterior se depositarem no fundo e a parte superior, mais clarificada, ser direcionada para os filtros.

Figura 16: Planta baixa ETA 1.



Fonte: CAESA (adaptado) (2021)

Figura 17: Floculadores, Decantadores e Filtros ETA 1.



Fonte: Acervo do Autor (2021)

Por fim, ocorre o processo de desinfecção da água por meio do sistema de cloro gás da estação que é comum nas três ETAs. Ou seja, as ETAs 1, 2 e 3 são abastecidas pelo mesmo sistema apresentado na Figura 18 a seguir.

Figura 18: Sistema de Cloro Gás (ETA 1, 2 e 3) da ETAM



Fonte: Acervo do autor (2021)

As ETAS 2 e 3 trabalham de forma muito semelhante, especialmente devido ao mesmo modelo construtivo de ambas. 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 observa-se na Figura 19. A coleta da água decantada é feita através de tubos perfurados submersos, e depois é direcionada para calha coletora e levada para os filtros.

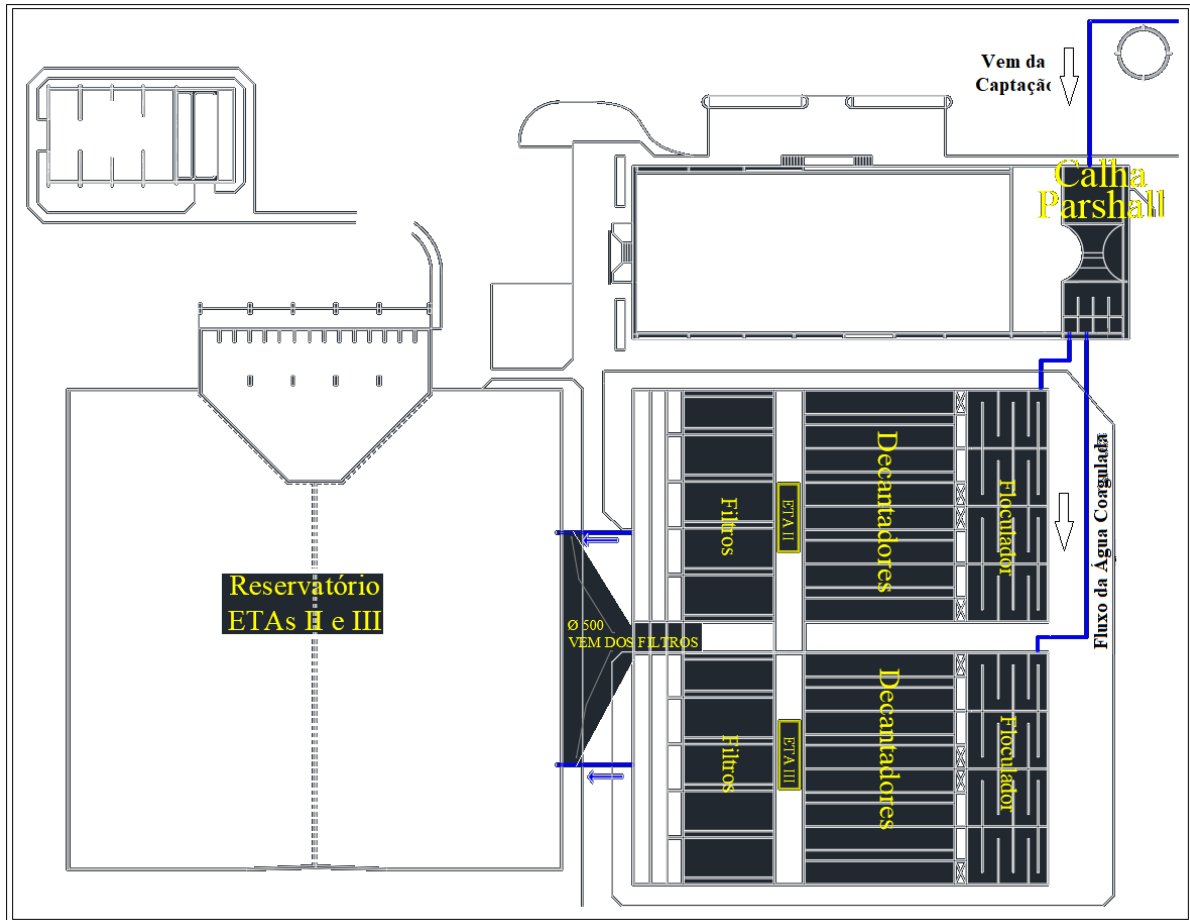
Figura 19: Floculadores ETA 2 e 3 (esquerda), Decantadores ETA 2 e 3 (direita)



Fonte: Acervo do autor (2021)

A planta baixa das ETA 2 e 3 (Figura 20) ajuda a entender o processo durante as etapas do tratamento. Após a filtração, a água é desinfectada e ambas as ETAs abastecem o mesmo reservatório, ou seja, há uma mistura do líquido proveniente de cada uma. Por esse motivo não se tem o resultado da água tratada apenas da ETA 2 ou ETA 3, portando a água tratada pertence a ETA 23.

Figura 20: Planta Baixa ETAs 2 e 3 que compõem a ETAM



Fonte: CAESA (adaptado) (2021)

### 5.5. Pontos de coleta e análise dos dados *in situ* (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 analisados foram: pH, turbidez, cor aparente, cloro, coliformes totais e Escherichia Coli, 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).

Além dos dados coletados nas respectivas campanhas também é parte desse trabalho os dados de anos anteriores da ETAM do mesmo período (julho e agosto) e servirão como base para as comparações estatísticas, principalmente das séries históricas (2016, 2017 e 2019).

As figuras 21 a 30 a seguir retratam os pontos de coletas de cada amostra coletada.

Figura 21: Ponto de coleta de amostra da água bruta (ETA 1, 2 e 3)



Fonte: Acervo do Autor (2021)

Figura 22: Ponto de coleta água floculada ETA 1.



Fonte: Acervo do Autor (2021)

Figura 23: Ponto de coleta água floculada ETA 2



Fonte: Acervo do Autor (2021)

Figura 24: Ponto de coleta água floculada ETA 3



Fonte: Acervo do Autor (2021)

Figura 25: Ponto de coleta água decantada ETA 2



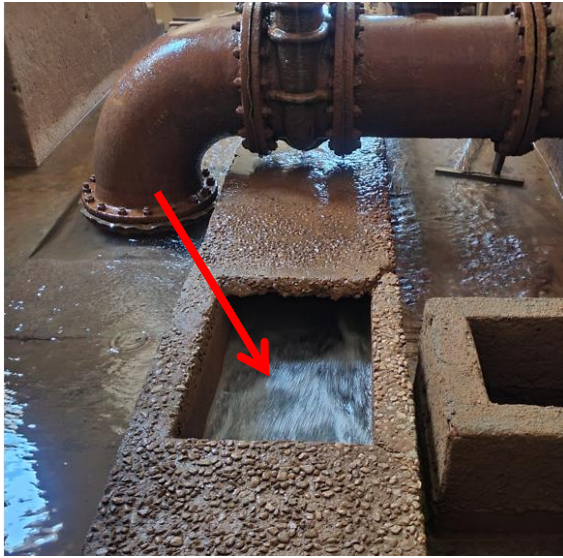
Fonte: Acervo do autor (2021)

Figura 26: Ponto de coleta água decantada ETA 3



Fonte: Acervo do autor (2021)

Figura 27: Ponto de coleta água pós-filtro ETA 1



Fonte: Acervo do autor (2021)

Figura 28: Ponto de coleta água pós-filtro ETA 2



Fonte: Acervo do autor (2021)

Figura 29: Ponto de coleta pós filtro ETA 3



Fonte: Acervo do autor (2021)

Figura 30: Ponto de coleta água tratada ETA 1 e ETAs 23



Fonte: Acervo do autor (2021)

Após a coleta, as amostras foram analisadas, sendo os parâmetros pH, cor aparente, turbidez e cloro analisados utilizando os equipamentos do próprio laboratório da CAESA (medidor de pH sensION+ PH31, turbidímetro Policontrol AP2000, espectrofotômetro HACH DR/3900) (Figura 31) e os parâmetros bacteriológicos (coliformes totais e escherichia coli) analisados no Laboratório de Química, Saneamento e Modelagem de Sistemas Ambientais (LQSMSA) da Universidade Federal do Amapá, tendo em vista que o laboratório da CAESA estava sem os insumos necessários para a realização dessas análises.

Figura 31: Equipamentos para resultados quantitativos CAESA.



Fonte: Acervo do autor (2021)

O método realizado para as análises bacteriológicas foi o Colilert, que detecta e quantifica simultaneamente coliformes totais e *Escherichia coli*. Essa técnica se baseia na ação de enzimas produzidas pelos Coliformes, por meio da alteração de cor e pelo aparecimento de fluorescência após um período de 24 horas onde as amostras ficam armazenadas a temperatura de 36 °C em estufa. Esse método é específico para microrganismos alvo, sendo rápido e eficaz (CUNHA et al., 2012; DA SILVA et al., 2017; GROTT et al., 2018; OLIVERIA et al., 2019).

A presença de coliformes totais é quantificada pela coloração amarelada nas cartelas utilizadas, enquanto a verificação da quantidade estimada de *E. Coli* se dá pela fluorescência da amostra quando em contato com a luz ultravioleta. A Figura 32 mostra as etapas da análise realizada.



## 6. RESULTADOS

### 6.1. Resultados Jar Test (2021)

Inicialmente, neste tópico, estão resumidos os principais resultados das análises do Teste de Jarro (*Jar Test* realizado em 2021), de acordo com os seguintes fatores: a) estação (ETA) e por b) etapa operacional (Tratamento ou Trat.). Isto é, avaliou-se a eficiência do teste de coagulação (dosagem com ótima concentração de coagulantes) segundo o nível de tratamento operacional e parâmetro da qualidade da água. Estes testes são indicados a seguir.

#### Teste de Jarro 1 (Jar Test 1)

No ensaio de Jar Teste 1 foi utilizado apenas o coagulante Sulfato de Alumínio. Deste modo, o experimento iniciou-se a partir de solução com concentração de 10 g/L (onde cada 1 mL dessa solução contém 10 mg do coagulante). Como os jarros utilizados no ensaio possuem capacidade volumétrica de 2 L, conclui-se que 2 mL da solução adicionados em 2L de água da amostra resultou em uma nova concentração de 10mg/L (Tabela 1):

Tabela 1: Resultados Jar Test 1 (apenas sulfato de alumínio).

	Reagente	Concentração	pH	Turbidez	Cor
Água Bruta	-	-	6,42	29,6	362
Jarro 1		2 mL => 10 mg/L	6,09	22,5	328
Jarro 2		3 mL => 15 mg/L	6,12	13,6	187
Jarro 3	Sulfato de Alumínio	4 mL => 20 mg/L	5,91	3,78	34
Jarro 4		<b>5 mL =&gt; 25 mg/L</b>	<b>5,87</b>	<b>1,54</b>	<b>9</b>
Jarro 5		6 mL => 30 mg/L	5,71	2,92	23
Jarro 6		7 mL => 35 mg/L	5,39	6,08	68

$C1 = 10\text{g/L} = 10\text{ mg/mL}; V1 = 2\text{ mL}; V2 = 2000\text{ mL} + 2\text{ mL} = 2002\text{ mL}; C2 = ?$

$C2 = (C1 \times V1) / V2 \rightarrow C2 = (10 \times 2) / 2002 \rightarrow C2 = 0,01\text{ mg/ml} = 10\text{ mg/L}$

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

A partir dos dados do primeiro ensaio observamos que a concentração de reagente no jarro 4 foi a que apresentou melhor resultado. Portanto, a concentração ideal do reagente está por volta de 25 e 30 mg/L e o pH entre 5,71 a 5,86. Isto é, a tabela 1 mostra que a turbidez atinge o menor valor (igual a 1,54 uT) exatamente com a dosagem obtida no Jarro 4.

#### Teste de Jarro 2 (Jar Test 2)

No segundo ensaio foram utilizados dois reagentes, o sulfato de alumínio, nas mesmas concentrações do ensaio anterior, e o polímero a partir de solução com concentração de 0,5 g/L. Nestas condições, o resultado obtido foi a concentração de 0,25 mg/L quando adicionado 1 mL dessa última solução em 2 litros da amostra. A quantidade da solução de polímero foi a mesma

em todos os jarros. Contudo, a quantidade da solução de sulfato de alumínio variou, como apresentado na tabela 2, a seguir:

Tabela 2: Resultados Jar Test 2 (combinando sulfato de alumínio e polímero).

	Reagente	Concentração	pH	Turbidez	Cor
<b>Água Bruta</b>	-	-	6,4	23,9	338
<b>Jarro 1</b>	Sulfato de Alumínio	2 mL => 10 mg/L	6,21	20,8	287
	Polímero	1 mL => 0,25 mg/L			
<b>Jarro 2</b>	Sulfato de Alumínio	3 mL => 15 mg/L	6,14	7,27	86
	Polímero	1 mL => 0,25 mg/L			
<b>Jarro 3</b>	Sulfato de Alumínio	4 mL => 20 mg/L	5,97	1,92	8
	Polímero	1 mL => 0,25 mg/L			
<b>Jarro 4</b>	Sulfato de Alumínio	<b>5 mL =&gt; 25 mg/L</b>	<b>5,80</b>	<b>1,83</b>	<b>7</b>
	Polímero	<b>1 mL =&gt; 0,25 mg/L</b>			
<b>Jarro 5</b>	Sulfato de Alumínio	6 mL => 30 mg/L	5,57	3,22	23
	Polímero	1 mL => 0,25 mg/L			
<b>Jarro 6</b>	Sulfato de Alumínio	7 mL => 35 mg/L	5,22	7,23	77
	Polímero	1 mL => 0,25 mg/L			

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

No segundo ensaio, coincidentemente, o melhor resultado também se deu no jarro 4. Porém, a melhor concentração de sulfato de alumínio ficou entre 20 e 25 mg/L, e o pH entre 5,97 e 5,80. Durante a execução do ensaio foi possível observar que o processo de decantação ocorreu de forma mais rápida que no ensaio anterior. Esse efeito ocorreu, provavelmente, pela adição do polímero, intensificando a taxa de formação de flocos mais densos, acelerando ainda mais a sedimentação e economizando tempo na etapa de filtração. Isto é, a tabela 2 mostra que a turbidez atinge o menor valor (igual a 1,83 uT) exatamente com a dosagem de sulfato e polímero obtida no Jarro 4 (pH = 5,80, turbidez = 1,83 e cor aparente = 7,0).

### Teste de Jarro 3 (Jar Test 3)

O terceiro ensaio foi realizado com três soluções simultâneas: sulfato de alumínio (10 g/L), polímero (0,5 g/L) e cal (5 g/L). Para esse ensaio foi usado 4 mL de cal em cada jarro de 2 litros. Isso resultou em uma concentração de 10 mg/L de cal em cada jarro. Novamente apenas o que foi alterado nos jarros foi a concentração do coagulante. A concentração de polímero e de cal foi a mesma nos seis jarros.

Tabela 3: Resultados Jar Test 3 (combinando sulfato de alumínio, polímero e cal).

	Reagente	Concentração	pH	Turbidez	Cor
<b>Água Bruta</b>	-	-	6,47	28,9	430
<b>Jarro 1</b>	Sulfato de Alumínio	2 mL => 10 mg/L	6,45	21,4	301
	Polímero	1 mL => 0,25 mg/L			
	Cal	4 mL => 10 mg/L			
<b>Jarro 2</b>	Sulfato de Alumínio	3 mL => 15 mg/L	6,36	19,0	267
	Polímero	1 mL => 0,25 mg/L			
	Cal	4 mL => 10 mg/L			
<b>Jarro 3</b>	Sulfato de Alumínio	4 mL => 20 mg/L	6,23	2,39	14
	Polímero	1 mL => 0,25 mg/L			
	Cal	4 mL => 10 mg/L			
<b>Jarro 4</b>	Sulfato de Alumínio	5 mL => 25 mg/L	6,17	1,95	12
	Polímero	1 mL => 0,25 mg/L			
	Cal	4 mL => 10 mg/L			
<b>Jarro 5</b>	Sulfato de Alumínio	<b>6 mL =&gt; 30 mg/L</b>	<b>6,04</b>	<b>1,84</b>	<b>10</b>
	Polímero	<b>1 mL =&gt; 0,25 mg/L</b>			
	Cal	<b>4 mL =&gt; 10 mg/L</b>			
<b>Jarro 6</b>	Sulfato de Alumínio	7 mL => 35 mg/L	5,86	2,29	16
	Polímero	1 mL => 0,25 mg/L			
	Cal	4 mL => 10 mg/L			

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Com a adição da cal percebeu-se um aumento significativo do pH da água. E este aumento interfere diretamente no pH ótimo de floculação que, nesse ensaio, ficou entre 6,04 e 6,17. Deste modo a amostra de água do jarro 5 foi a que apresentou o melhor resultado (turbidez = 1,84, pH = 6,17 e cor aparente = 10).

## 6.2. Parâmetros da Qualidade da Água da ETAM CAESA (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). Deste modo, foram quantificados os parâmetros da qualidade da água em cada uma das etapas do tratamento (parâmetros pH, Turbidez, Cor, Coliformes Totais e Escherichia Coli), sendo esses dois últimos parâmetros analisados apenas na água bruta, pós-filtro e na água tratada. Os dados a seguir servem como embasamento para entender onde o tratamento pode ser melhorado.

### 6.2.1. Água Bruta (2021)

Neste tópico, descrevemos uma análise simples da qualidade da água bruta, fundamental para qualquer estudo de monitoramento de qualidade da água de ETAs, uma vez que interferem em todo os processos de tratamento nas respectivas unidades operacionais.

A Tabela 4 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 cor aparente elevada ( $223 < \text{cor aparente} < 430$ ), elevado número de coliformes totais ( $\text{CT} > 2419,6$ ) e E. coli ( $26 < \text{E. coli} < 325,5$ ).

Tabela 4: 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

Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

### 6.2.2. Água Flokulada (2021)

Os flocladores utilizados nas ETAs 1, 2 e 3 são do tipo hidráulico de chicanas com fluxo vertical. Nesta etapa a água apresenta-se bastante turva devido à formação dos flocos resultantes da coagulação, onde se percebe-se uma considerável queda no pH.

A Tabela 5 mostra os parâmetros relevantes de floclação monitorados ao longo do período de julho e agosto de 2021. Uma análise de variância 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.

Tabela 5: pH, Turbidez e Cor da Água Flokulada (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

Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

### 6.2.3. Água Decantada (2021)

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 que ficam próximas a superfície. Já as ETAs 2 e 3 possuem o mesmo modelo construtivo entre si, porém se diferem do modelo da ETA 1.

As ETAs 2 e 3 contam com 4 módulos de decantação dispostos paralelamente e cada módulo conta com dois decantadores. Possuem fluxo laminar e ascendente e contam com placas (módulos de decantação) que são responsáveis em criar esse fluxo laminar. A coleta da água decantada é feita através de tubos perfurados submersos próximos a superfície, e depois é direcionada para calha coletora.

A Tabela 6 mostra os parâmetros relevantes da operação de decantação monitorados ao longo do período de Julho e Agosto de 2021. Uma análise de variância multicomparativa (Kruskal-Wallis) mostrou que a cor aparente, turbidez e pH não resultaram em significativa diferença entre si ( $p > 0,05$ ), sugerindo desempenho similar nas três ETAs para estes parâmetros da qualidade da água.

Tabela 6: 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

Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

### 6.2.4. Água Filtrada (2021)

A ETA 1 conta com 4 filtros que são abastecidos por seu respectivo decantador enquanto as ETAs 2 e 3 possuem 5 filtros cada uma. A água decantada e coletada na calha é distribuída para os filtros. O controle de vazão é feito através de válvulas. Os filtros são do tipo rápido de fluxo descendente por gravidade, e o meio filtrante é composto de areia.

A Tabela 7 mostra os parâmetros relevantes monitorados ao longo do período de Julho e Agosto de 2021, incluindo-se Coliformes Totais e E. coli. Uma análise de variância 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 7: 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)	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

Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

### 6.2.5. Água Tratada (2021)

Após o filtro, a ETA 1 abastece um reservatório (figura 15) enquanto as ETAs 2 e 3 abastecem outro reservatório (figura 20). Desta forma, a água tratada das ETAs 2 e 3 é resultado da mistura das duas ETAs. Portanto, a inauguração da ETA 3 resultou em uma ampliação da ETA 2, por esse motivo não é possível determinar o resultado da água tratada da ETA 3 separadamente da ETA 2.

Os dados em negrito na tabela 8 correspondem aos parâmetros que estão dentro do limite de potabilidade estabelecido pela legislação (conformidade legal em relação a Portaria 888 do MS/2021) (BRASIL, 2021).

Tabela 8: pH, Cloro (Cl), Turbidez (Turb), Cor, Coliformes Totais (CT) e Escherichia Coli (E. Coli) da Água Tratada (ETA 1 e ETA 23).

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

Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Uma análise de t-student pareada comparando os seis parâmetros dos parâmetros da qualidade da água (pH, Cl, Turb, Cor Aparente, CT e E.coli) indicou que houve diferenças significativas entre as médias para pelo menos 4 parâmetros: Cl, Turb, Cor Aparente e CT ( $p < 0,05$ ). É relevante informar que no caso do Cl e CT as significâncias ficaram próximas, e

um pouco acima de 0,05, respectivamente, com  $p = 0,085$  para o Cl e  $p = 0,065$  para CT, no limite do intervalo de confiança. Isso significa dizer que cor aparente, cloro e turbidez podem ser consideradas como significativamente distintas para esse nível de significância. A única exceção seriam pH e E. Coli.

### 6.3. Conformidade dos Resultados com o Padrão de Potabilidade (MS 888/2021)

Durante os anos de 2016 e 2017, a ETAM operava apenas com a ETA 1 e ETA 2. Nas tabelas 9 e 10, os dados em negrito correspondem à porcentagem de amostras que se adequaram ao padrão de potabilidade exigido por lei. Destaca-se que a ETA 1, mesmo sendo 27 anos mais antiga que a ETA 2, apresente melhor resultado geral. Porém, ainda muito aquém do padrão determinado em três dos quatro parâmetros analisados.

Tabela 9: Conformidade da Água Tratada das ETA 1 e ETA 2 (2016) 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)
<b>Quantidade de amostras</b>	365	364	360	366	372	371	366	373
<b>Média</b>	5,23	1,45	22	1,61	5,25	6,12	72	1,6
<b>Limite exigido</b>	6 - 9	< 0,5	<15	0,2 - 2	6 - 9	< 0,5	<15	0,2 - 2
<b>Em conformidade (% amostras)</b>	<b>0,5</b>	<b>33,8</b>	<b>44,4</b>	<b>100</b>	<b>0,2</b>	<b>3,5</b>	<b>4</b>	<b>99,1</b>

Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Tabela 10: Conformidade da Água Tratada das ETA 1 e ETA 2 (2017) 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)
<b>Quantidade de amostras</b>	378	378	378	378	376	3,76	376	376
<b>Média</b>	5,86	1,90	20	1,37	6,04	6,34	66	1,24
<b>Limite exigido</b>	6 - 9	< 0,5	<15	0,2 - 2	6 - 9	< 0,5	<15	0,2 - 2
<b>Em conformidade (% amostras)</b>	<b>36,2</b>	<b>13</b>	<b>59,2</b>	<b>93</b>	<b>47,3</b>	<b>0,5</b>	<b>7,4</b>	<b>99,5</b>

Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

A partir dos dados de 2019 houve uma 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 qualidade da água tratada passou por uma mudança significativa, dando origem a água tratada da ETA 23 que é resultado do tratamento das duas ETAs simultaneamente.

As tabelas 11 e 12 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 ficasse dentro do padrão exigido.

Tabela 11: Conformidade da Água Tratada das ETA1 e ETA 23 (2019) com o Padrão de Potabilidade

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

Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Tabela 12: Conformidade da Água Tratada das ETAs 1 e 23 (2021) com o Padrão de Potabilidade.

	ETA 1						ETA 23					
	pH	Turb (uT)	Cor (uH)	Cl (mg/L)	C. Totais (NMP/100mL)	E. Coli (NMP/100 mL)	pH	Turb (uT)	Cor (uH)	Cl (mg/L)	C. Totais (NMP/100mL)	E. Coli (NMP/100 mL)
<b>Quantidade de amostras</b>	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
<b>Média</b>	5,76	5,3	49,5	0,95	< 0	< 0	5,63	3,82	26,5	1,22	8,5	< 0
<b>Limite exigido</b>	6 - 9	< 0,5	<15	0,2 - 2	Ausência em 100 mL		6 - 9	< 0,5	<15	0,2 - 2	Ausência em 100 mL	
<b>Em conformidade de (% amostras)</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>25</b>	<b>100</b>	<b>75</b>	<b>100</b>

Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

#### 6.4. Análise comparativa da conformidade legal da qualidade da água nos períodos de julho e agosto (2016, 2017, 2019 e 2021)

De acordo com a Portaria nº 888/2021 do MS, uma das exigências legais mais relevantes dos serviços de saneamento básico é o atendimento legal dos padrões físico-químicos e microbiológicos da qualidade da água. Assim, uma análise estatística multicomparativa foi realizada para avaliar o nível de conformidade legal dos parâmetros-chave para os períodos de 2016, 2017, 2019 (referentes às séries históricas da CAESA) e 2021 (referentes às análises experimentais das séries históricas e também das análises experimentais atuais).

Neste tópico, compreende-se como conformidade legal o atendimento dos índices estipulados pela Portaria 888/2021 do MS, Uma Análise de Variância unidimensional (One-Way) foi realizada para comparar a conformidade legal da água tratada da ETAM (produto

final) com os seguintes resultados (quadro 3). Com base nas médias e variâncias observadas em termos de não conformidade legal operacional o pior período observado ocorreu em 2019, com aproximadamente 37,50%, contra um intervalo de [0,36% < Não Conformidade < 4,4%] para os demais períodos.

Quadro 3: ANOVA One-Way para avaliar a variação da conformidade legal e seu impacto na ETAM em quatro períodos diferentes (2016, 2017, 2019 e 2021)

<b>Anova: fator único</b>						
<b>RESUMO</b>						
<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
ETA2016	8	2,86	0,36	0,18		
ETA2017	8	3,56	0,45	0,14		
ETA2019	8	34,93	4,37	129,35		
ETA2021	8	300	37,50	2678,57		
<b>ANOVA</b>						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	7763,996	3	2587,999	3,686279	0,023549	2,946685
Dentro dos grupos	19657,75	28	702,0625			
Total	27421,75	31				

Fonte: Elaborado pelo autor a partir do software R–Project (2022).

De acordo com os resultados do quadro 3 acima, observamos que a análise multicomparativa resultou em diferenças significativas entre as médias em termos de parâmetros em não conformidade, considerando todos os quatro períodos e integrando todas as unidades operacionais da ETAM ( $p = 0,023$ , isto é  $p\text{-valor} < 0,05$ ).

Embora tenha ocorrido contínuas expansões nos sistemas de tratamento, com melhorias da infraestrutura física, não foi observado redução significativa das não conformidades em todo o período de estudo, isto é, de 2016 a 2021. Na verdade, na média, o nível de não conformidade só se elevou no tempo, sendo um contrassenso o seu aumento significativo. Portanto, a ETAM ainda passa por período crítico em sua operação (talvez de adaptação), com praticamente perdas crescentes do controle de qualidade da água ao longo dos processos de modernização do sistema de tratamento nas unidades operacionais. Por exemplo, ocorreu um aumento significativo das não conformidades em relação a 2021, justamente quando está disponível a ETA23 em sua nova estrutura operacional.

#### 6.4.1. Análise estatística integrada (Série Histórica 2016 a 2019)

A tabela 13 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), considerando os períodos de coleta das series históricas disponíveis da CAESA (2016, 2017 e 2019).

De acordo com os resultados da Tabela 13 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 o processo de cloração (onde este ocorreu).

Tabela 13: Teste não-paramétrico de Kruskal-Wallis para a variável [Cl] segundo influências de parâmetros e fatores intervenientes da qualidade da água potável da ETA de Macapá-AP/Amapá/Brasil.

Parâmetro Dependente Cl (mg/L) (Média 1,24 ± 0,57)	Resumo Descritivo	Kruskal-Wallis test	Comentários
Parâmetros Independentes (i)	Média ± DP $\chi^2_{(GL)}$	<i>p</i> -value	
Hora (do dia)	Média = 12,69 ± 3,44 $\chi^2_{(GL=8)} = 27.30$	0.00063 ***	Há influência da hora do dia na concentração de Cloro ( $p < 0,05$ )
Dia (do mês)	Média = 15,77 ± 8,97 $\chi^2_{(GL=30)} = 151.88$	< 0,0011 ***	Há influência do dia do mês na concentração de Cloro ( $p < 0,05$ )
Mês (do ano)	Média = 15,75,00 ± 1 $\chi^2_{(GL=172)} = 1.35$	0.2458 NS	Não há influência do mês do ano (Jul/Ago) na concentração de Cloro ( $p < 0,05$ ). 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 Cloro 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 Cloro ( $p < 0,05$ )
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 ( $p < 0,05$ )
Turbidez (NTU)	Média = 12,00 ± 1 $\chi^2 = 971.15, df = 854$	0.003162 **	Houve variações significativa da concentração de Cloro com a variação da turbidez nas diferentes unidades operacionais e ETAs ( $p < 0,05$ )
Cor Aparente (mg Co)	Média = 109,00 ± 141 $\chi^2_{(GL=172)} = 221.36$	0.006611**	Houve variações significativa da concentração de Cloro 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 Cloro com o pH nas diferentes unidades operacionais e ETAs ( $p < 0,05$ )

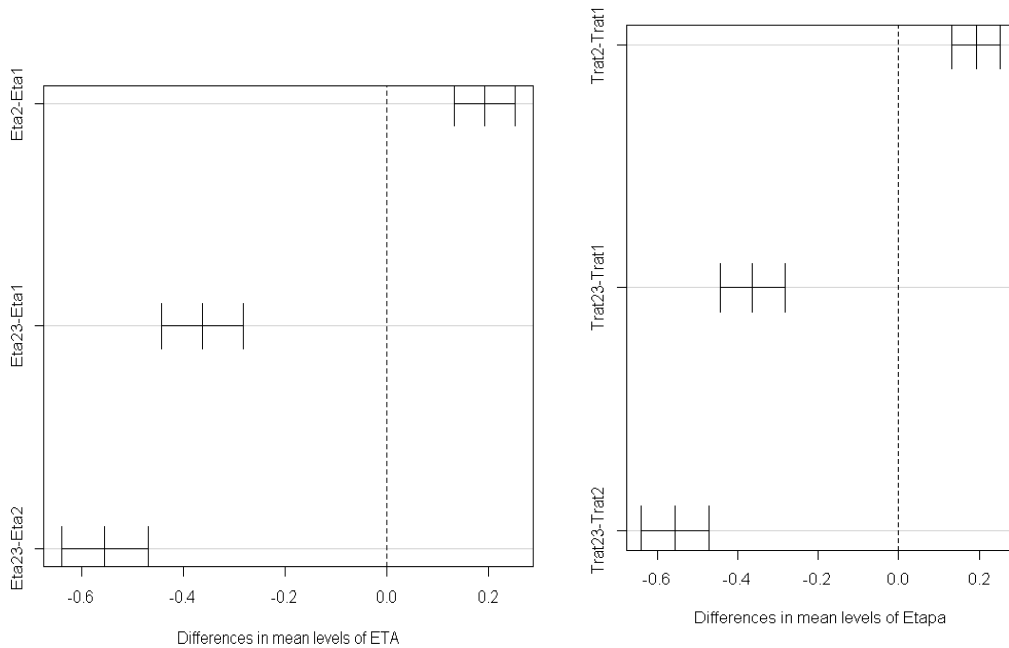
Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Fonte: Elaborado pelo autor a partir do software R-Project (2022).

Além disso, a etapa operacional ou a ETA específica (1, 2 ou 3) podem ser representados pelo gráfico da Figura 34a-b multicomparativo (Eta-Eta e trat-trat) sugerindo, respectivamente, que estas diferem significativamente entre si (medido pelo distanciamento dos gráficos de

intervalos de confiança (95%) da linha pontilhada vertical). Esta observação pode ser avaliada em relação aos intervalos de confiança distantes da linha vertical tracejada. Quanto mais distantes forem os intervalos comparativos ( $ETA_i-ETA_j$  ou  $Trat_i-Trat_j$ ) em relação à linha vertical tracejada, mais significativa é a diferença entre si (Figura 34a).

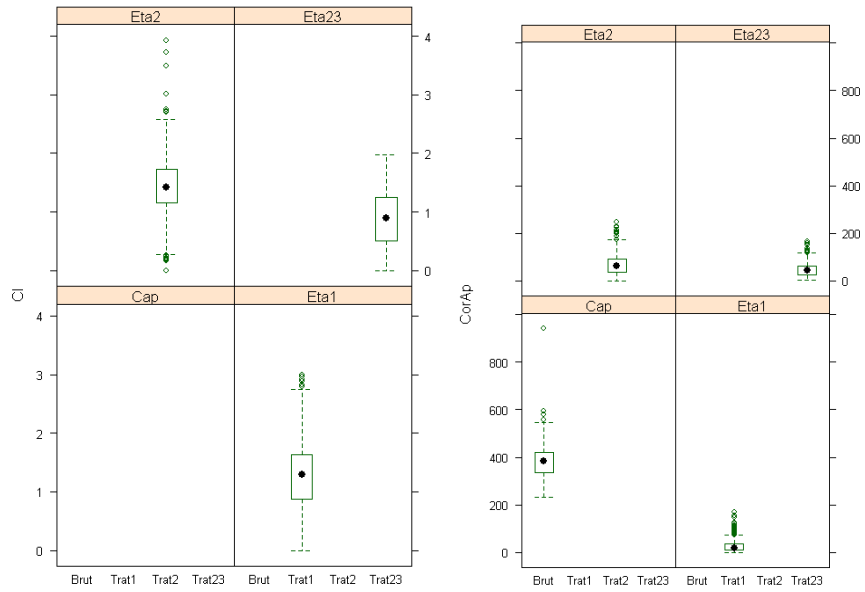
Figura 34a-b: Teste multicomparativo não-paramétrico de Kruskal-Wallis: a) considerando os diferentes fatores ETA e b) estágio operacional intervenientes na qualidade da água potável – ETAM-AP/Amapá/Brasil.



Fonte: Elaborado pelo autor a partir do software R-Project (2022).

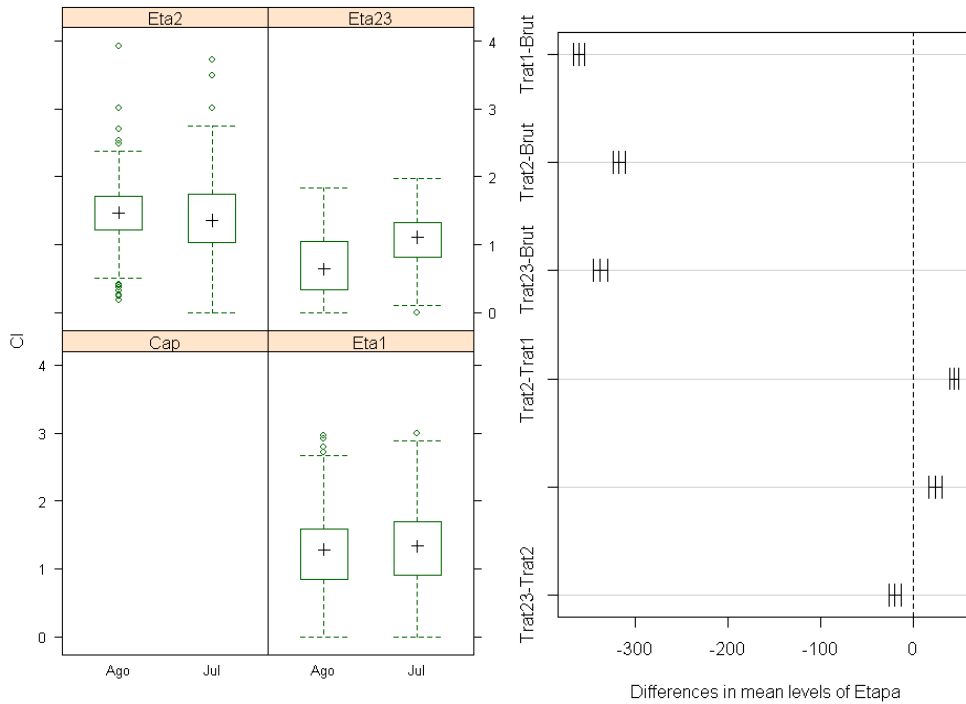
Esta observação pode ser confirmada também pelo gráfico (box-plot) (Figura 34c-d) avaliada em relação aos intervalos de confiança distantes da linha vertical tracejada. Quanto mais distantes forem os intervalos comparativos ( $ETA_i-ETA_j$  ou  $Trat_i-Trat_j$ ) em relação à linha vertical tracejada, mais significativa é a diferença entre si.

Figura 34c-d: Variações dos parâmetros-chave da qualidade da água da ETAM c) Cl x Etapa; d) Cor Aparente x Etapa;



Fonte: Elaborado pelo autor a partir do software R–Project (2022).

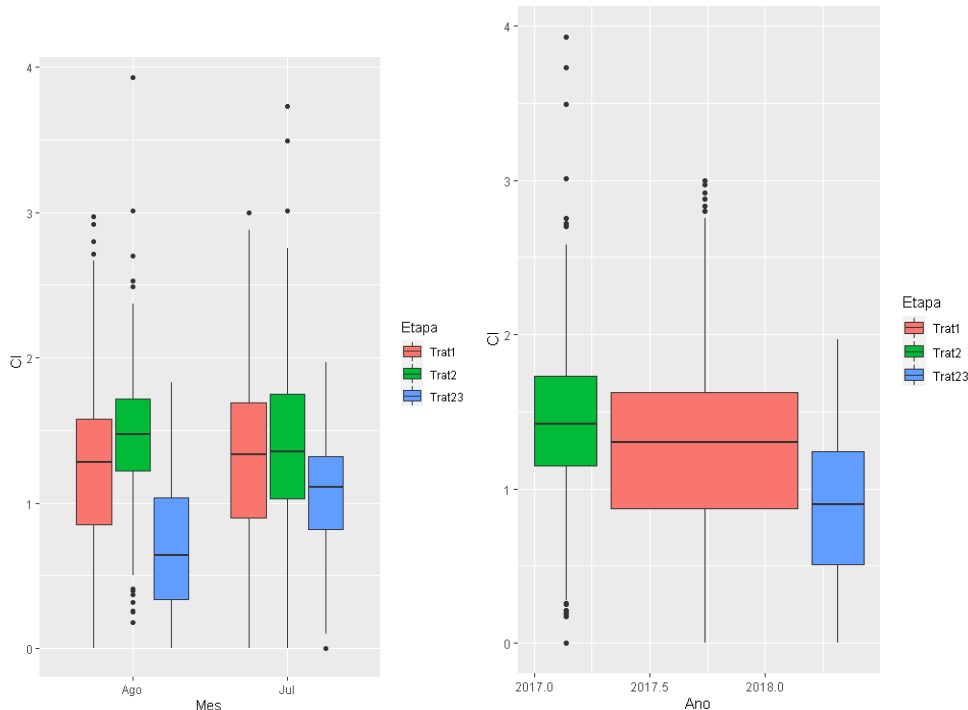
Figura 34e-f: Variações dos parâmetros-chave da qualidade da água da ETAM e) Cl x Etapa; f) Trat x Trat.



Fonte: Elaborado pelo autor a partir do software R–Project (2022).

Uma observação importante são as regressões múltiplas, onde o parâmetro cloro (eficiência do tratamento) pode ser observado em termos de várias variáveis independentes (Figura 34g-h).

Figura 34g-h: Variações dos parâmetros-chave da qualidade da água da ETAM g) Cl x Mês; h) Cl x Ano.



Fonte: Elaborado pelo autor a partir do software R-Project (2022).

Uma síntese dessas correlações individuais é dada pelas tabelas 14 a 19.

Tabela 14: regressão da variação de concentração de cloro em função do nível de tratamento.

O sinal positivo indica aumento da concentração de Cl e o negativo indica redução (explicabilidade de 10%).

Call: `lm(formula = Cl ~ Etapa, data = amaral)`

Residuals:	Min	1Q	Median	3Q	Max
	-1.42204	-0.32024	0.04287	0.36976	2.50796
Coefficients:	Estimate	Std Error	t value	Pr(> t )	
<b>Intercept</b>	1.23024	0.01652	74.454	< 2e-16 ***	
<b>Etapa[T.Trat2]</b>	0.19181	0.02574	7.451	1.34e-13 ***	
<b>Etapa[T.Trat23]</b>	-0.36311	0.03434	-10.575	< 2e-16 ***	

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.5385 on 2123 degrees of freedom (1117 observations deleted due to missingness)

Multiple R-squared: 0.1011, Adjusted R-squared: 0.1003

F-statistic: 119.4 on 2 and 2123 DF, p-value: < 2.2e-16

Fonte: Elaborado pelo autor a partir do software R-Project (2022).

Tabela 15: cor aparente em função das Etapas operacionais. O sinal positivo indica aumento da concentração de cor aparente e o negativo indica redução. Explicabilidade de 84%. NS = Não Significativo.

Call: lm(formula = CorAp ~ Etapa, data = amara12)					
Residuals:	Min	1Q	Median	3Q	Max
	-150.00	-10.62	0.50	13.12	154.75
Coefficients:	Estimate	Std Error	t value	Pr(> t )	
<b>Intercept</b>	354.00	31.36	11.287	3.25e-13 ***	
<b>Etapa[T.Dec1]</b>	-326.75	44.35	-7.367	1.29e-08 ***	
<b>Etapa[T.Dec2]</b>	-343.25	44.35	-7.739	4.37e-09 ***	
<b>Etapa[T.Dec3]</b>	-340.50	44.35	-7.677	5.23e-09 ***	
<b>Etapa[T.Floc1]</b>	-15.00	44.35	-0.338	0.737 (NS)	
<b>Etapa[T.Floc2]</b>	-36.75	44.35	-0.829	0.413 (NS)	
<b>Etapa[T.Floc3]</b>	5.25	44.35	0.118	0.906 (NS)	
<b>Etapa[T.Pfiltro1]</b>	-299.50	44.35	-6.752	7.99e-08 ***	
<b>Etapa[T.Pfiltro2]</b>	-316.75	44.35	-7.141	2.51e-08 ***	
<b>Etapa[T.Pfiltro3]</b>	-353.50	44.35	-7.970	2.24e-09 ***	
<b>Etapa[T.Trat1]</b>	-299.67	47.91	-6.255	3.57e-07 ***	
<b>Etapa[T.Trat23]</b>	-327.50	44.35	-7.384	1.23e-08 ***	

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 62.73 on 35 degrees of freedom (1 observation deleted due to missingness)

Multiple R-squared: 0.8853, Adjusted R-squared: 0.8492

F-statistic: 24.55 on 11 and 35 DF, p-value: 2.991e-13

Fonte: Elaborado pelo autor a partir do software R-Project (2022).

Tabela 16: pH em função das Etapas operacionais. O sinal positivo indica aumento da concentração de cor aparente e o negativo indica redução. Explicabilidade de 52%. NS = Não Significativo.

Call: lm(formula = pH ~ Etapa, data = amara12)					
Residuals:	Min	1Q	Median	3Q	Max
	-0.64750	-0.05875	0.02750	0.09500	0.33000
Coefficients:	Estimate	Std Error	t value	Pr(> t )	
<b>Intercept</b>	6.40000	0.09806	65.267	< 2e-16 ***	
<b>Etapa[T.Dec1]</b>	-0.49750	0.13868	-3.587	0.001010 **	
<b>Etapa[T.Dec2]</b>	-0.58750	0.13868	-4.236	0.000157 ***	
<b>Etapa[T.Dec3]</b>	-0.92250	0.13868	-6.652	0.00000108 ***	
<b>Etapa[T.Floc1]</b>	-0.59250	0.13868	-4.273	0.000141 ***	
<b>Etapa[T.Floc2]</b>	-0.47000	0.13868	-3.389	0.001749 **	
<b>Etapa[T.Floc3]</b>	-0.61750	0.13868	-4.453	0.000082723 ***	
<b>Etapa[T.Pfiltro1]</b>	-0.48250	0.13868	-3.479	0.001365 **	
<b>Etapa[T.Pfiltro2]</b>	-0.47250	0.13868	-3.407	0.001665 **	
<b>Etapa[T.Pfiltro3]</b>	-0.80000	0.13868	-5.769	0.000001557 ***	
<b>Etapa[T.Trat1]</b>	-0.59667	0.14979	-3.983	0.000328 ***	
<b>Etapa[T.Trat23]</b>	-0.77000	0.13868	-5.552	0.000003005 ***	

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.1961 on 35 degrees of freedom (1 observation deleted due to missingness)

Multiple R-squared: 0.632, Adjusted R-squared: 0.5163

F-statistic: 5.464 on 11 and 35 DF, p-value: 0.00005315

Fonte: Elaborado pelo autor a partir do software R-Project (2022).

Tabela 17: Turbidez em função das Etapas operacionais. O sinal positivo indica aumento da concentração de turbidez e o negativo indica redução. Explicabilidade de 79%. NS = Não Significativo.

Call: lm(formula = Turb ~ Etapa, data = amaral2)					
Residuals:	Min	1Q	Median	3Q	Max
	-14.8500	-0.8825	0.1950	1.1525	23.0500
Coefficients:	Estimate	Std Error	t value	Pr(> t )	
<b>Intercept</b>	24.750	2.998	8.254	9.95e-10 ***	
<b>Etapa[T.Dec1]</b>	-21.188	4.240	-4.996	1.62e-05 ***	
<b>Etapa[T.Dec2]</b>	-22.530	4.240	-5.313	6.22e-06 ***	
<b>Etapa[T.Dec3]</b>	-21.755	4.240	-5.130	1.08e-05 ***	
<b>Etapa[T.Floc1]</b>	4.175	4.240	0.985	0.331604 (NS)	
<b>Etapa[T.Floc2]</b>	0.625	4.240	0.147	0.883672 (NS)	
<b>Etapa[T.Floc3]</b>	9.500	4.240	2.240	0.031521 *	
<b>Etapa[T.Pfiltro1]</b>	-19.363	4.240	-4.566	5.91e-05 ***	
<b>Etapa[T.Pfiltro2]</b>	-20.625	4.240	-4.864	2.42e-05 ***	
<b>Etapa[T.Pfiltro3]</b>	-23.135	4.240	-5.456	4.03e-06 ***	
<b>Etapa[T.Trat1]</b>	-18.883	4.580	-4.123	0.000219 ***	
<b>Etapa[T.Trat23]</b>	-20.930	4.240	-4.936	1.95e-05 ***	

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 5.997 on 35 degrees of freedom (1 observation deleted due to missingness)

Multiple R-squared: 0.8422, Adjusted R-squared: 0.7926

F-statistic: 16.98 on 11 and 35 DF, p-value: 6.415e-11

Fonte: Elaborado pelo autor a partir do software R–Project (2022).

Tabela 18: Coliformes Totais em função das Etapas operacionais. O sinal positivo indica aumento da concentração de cor aparente e o negativo indica redução. Explicabilidade de 14,74%. NS = Não Significativo.

Call: lm(formula = Ecoli ~ Etapa, data = amaral2)					
Residuals:	Min	1Q	Median	3Q	Max
	-526.33	-2.56	0.00	1.59	1179.98
Coefficients:	Estimate	Std Error	t value	Pr(> t )	
<b>Intercept</b>	552.9	167.3	3.305	0.00419 **	
<b>Etapa[T.Pfiltro1]</b>	-541.1	236.6	-2.287	0.03530 *	
<b>Etapa[T.Pfiltro2]</b>	-534.4	236.6	-2.258	0.03736 *	
<b>Etapa[T.Pfiltro3]</b>	-549.8	236.6	-2.324	0.03280 *	
<b>Etapa[T.Trat1]</b>	-552.9	255.6	-2.163	0.04504 *	
<b>Etapa[T.Trat23]</b>	-552.9	236.6	-2.337	0.03195 *	

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 334.6 on 17 degrees of freedom (25 observations deleted due to missingness)

Multiple R-squared: 0.3411, Adjusted R-squared: 0.1474

F-statistic: 1.76 on 5 and 17 DF, p-value: 0.1749

Fonte: Elaborado pelo autor a partir do software R–Project (2022).

Tabela 19: E. coli em função das Etapas operacionais. O sinal positivo indica aumento da concentração de cor aparente e o negativo indica redução. Explicabilidade de 32,51%. NS = Não Significativo.

Call: lm(formula = Cl ~ Ano + CorAp + Dia + Hora, data = Dataset)					
<b>Residuals:</b>	Min	1Q	Median	3Q	Max
	-1.43287	-0.26790	0.01971	0.29768	2.43230
<b>Coefficients:</b>	Estimate	Std Error	t value	Pr(> t )	
<b>Intercept</b>	537.53257	16.93435	31.74	< 2e-16 ***	
<b>Ano</b>	-0.265794	0.008393	-31.67	< 2e-16 ***	
<b>CorAp</b>	-0.001438	0.000275	-5.22	0.000000196 ***	
<b>Dia</b>	-0.002195	0.001131	-1.94	0.0523 (No limite do Intervalo)	
				- Potencialmente Significativo)	
<b>Hora</b>	-0.0016301	0.0029619	-0.550	0.5821 (NS)	

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.4666 on 2106 degrees of freedom (1132 observations deleted due to missingness)

Multiple R-squared: 0.3263, Adjusted R-squared: 0.3251

F-statistic: 255.1 on 4 and 2106 DF, p-value: < 2.2e-16

Fonte: Elaborado pelo autor a partir do software R–Project (2022).

Uma matriz de correlação múltipla de Spearman foi gerada (Tabela 20) indica que o parâmetro mais bem correlacionado com o nível de cloração é o parâmetro cor aparente ( $R = -0,79$ ) e Turbidez ( $R = -0,81$ ). O sinal negativo indica que quanto menor for a cor aparente ou a turbidez maior a concentração de cloro (indicando obviamente o nível ou etapa avançando no tempo e em cada unidade operacional).

Por outro lado (Tabela 20) a concentração de Cl é proporcionalmente maior quanto mais tarde for a hora do dia (monitoramento) ( $R = 0,63$ ).

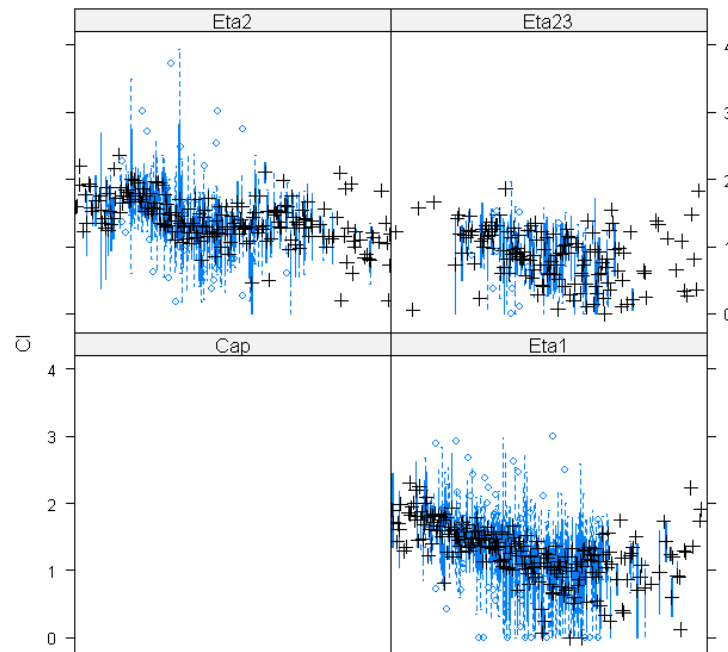
Tabela 20: Matriz de correlação (Spearman) para os parâmetros-chave da qualidade da água

	Ano	Dia	Hora	Cl	CorAp	Turb	pH
Ano	1	NA					
Dia	NA	1.00000000					
Hora	NA	0.00000000	1.00000000				
Cl	NA	-0.37796447	0.6324555	1.00000000			
CorAp	NA	-0.09449112	-0.4743416	-0.7857143	1.00000000		
Turb	NA	0.09449112	-0.3162278	-0.8214286	0.78571429	1.00000000	
pH	NA	0.18898224	-0.4743416	-0.5000000	0.46428571	0.60714286	1.00000000

Fonte: Elaborado pelo autor a partir do software R–Project (2022).

A figura 35 mostra a variação da concentração de Cl em relação amostras dos meses de julho e agosto em cada uma das ETAs. É possível observar uma sensível variação negativa (decrecente) do cloro com a evolução do tratamento no tempo para todas as ETAs.

Figura 35: Variação de Cl no Tempo.



Fonte: Elaborado pelo autor a partir do software R-Project (2022).

## 7. DISCUSSÕES

### 7.1. Turbidez

Os resultados apresentados em geral tiveram como foco os meses de julho e agosto dos anos de 2016, 2017, 2019 e 2021, historicamente disponíveis. Estes meses são climatologicamente marcados pela transição do período chuvoso para o menos chuvoso no Amapá (CUNHA et al, 2005), influenciando a qualidade da água bruta.

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 ao longo dos quatro anos analisados. Nestes casos, os resultados obtidos foram significativos, aplicando-se método de Kruskal-Wallis (p-valor < 0,001).

Durante o monitoramento experimental realizado em cada etapa do tratamento em 2021 a turbidez, após filtros nas ETAs 1 e 2, foram maiores que no da saída dos decantadores destas ETAs. E apenas os filtros da ETA 3 progrediram no resultado com relação a este parâmetro (turbidez) (Tabela 7). A turbidez fora dos limites estabelecidos foi provavelmente associada fatores como a falta de manutenção preventiva e corretiva na infraestrutura da ETA, principalmente nas etapas de decantação e filtração quando ainda há elevada concentração de partículas em suspensão (LOPES, 2020). Isso pode colocar em risco a qualidade da água favorecendo o aumento da concentração bacteriológica, existência de parasitas e vírus, podendo até causar doenças de veiculação hídrica à população que as consomem (ARAÚJO, 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. Estes valores ficaram muito acima do estabelecido na legislação vigente de potabilidade (0,5 uT) na saída dos filtros, ocorrendo não conformidade legal. 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 (nos experimentos de 2021) não apresentou diferença significativa na etapa pós-filtro (Kruskal-Wallis p-valor = 1,000). Também a água tratada da ETA 2 (2021) ocorreu pequena melhora, mas também não significativa (p-valor = 0,386). Exceto na ETA 3 (2021) houve uma piora estatisticamente significativa (p-valor = 0,021) para a turbidez. Esta variação pode ser explicada pelo fato dessas duas ETAs dividirem o mesmo reservatório sendo o resultado da água tratada uma média do tratamento da ETA 2 e ETA 3 simultaneamente. Mas este resultado é o inverso do que seria esperado, pois ao invés de reduzir, houve um aumento da turbidez conforme a água é tratada nas diferentes etapas operacionais.

Quando se leva em consideração o monitoramento após os filtros é possível afirmar, conforme a tabela 8, que 100% das amostras analisadas na saída das ETAs 1, 2 e 3 estavam fora dos padrões de potabilidade, conforme estabelecido na legislação vigente que é  $\leq 0,5$  uT na saída dos filtros (BRASIL, 2021). Assim, o valor elevado de turbidez, mesmo não trazendo “inconvenientes sanitários diretos”, esteticamente é desagradável na água potável. Mas os sólidos em suspensão podem servir de “abrigo” para microrganismos patogênicos porque dificultam a ação do cloro residual nessas partículas (PERPÉTUO, 2014; VON SPERLING, 2005).

Assim, as ETAs 1 e 2 demandam manutenção corretiva, a fim de implementar um processo de clarificação da água mais eficiente. Evidentemente, se a qualidade da água for comprometida, poderá expor a população a potencial contaminação por microrganismos patogênicos. Como dito anteriormente, valores elevados de turbidez podem comprometer a ação do cloro como desinfetante residual (LEVY et al., 2008) além de depreciar a qualidade microbiana da água tratada (OBI et al., 2008).

Amostras com turbidez superiores a 0,5 uT, após filtragem, e superiores 5,0 uT na rede de distribuição em qualquer ponto de amostragem, segundo a portaria MS nº 888/2021, são consideradas impróprias para o consumo humano. Pode-se dizer que para esse parâmetro em vários pontos e por diversas campanhas a água da CAESA se apresentou imprópria para o consumo.

## **7.2. Cor Aparente**

Similarmente ao que ocorre como o parâmetro turbidez, a cor aparente da água também apresentou valores estatisticamente significativos e diferentes para cada ano de estudo (2016, 2017, 2019 e 2021). A significância do teste de Kruskal-Wallis foi elevada, da ordem de p-valor  $<0,001$ .

Em cada etapa do tratamento (2021) a cor aparente, após filtros nas ETAs 1 e 2, foi maior que na saída dos decantadores (Tabela 7). 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 a análises experimentais.

Os resultados obtidos experimentalmente em 2021 da água tratada (tabela 8), observou-se apenas uma amostra dentro do padrão de conformidade esperado. As demais amostras

tiveram como resultado cor aparente acima de 15 uH, limite máximo estabelecido pela legislação (BRASIL, 2021).

A cor aparente fora dos limites estabelecidos na saída da ETA está associada com a gestão operacional ineficiente e a falta de manutenção nas estruturas, principalmente nas etapas de decantação e filtração das partículas em suspensão e dissolvidas. Todavia, a cor aparente, embora seja um atributo eminentemente estético, não se relaciona necessariamente com problemas de evidente contaminação. Mas a cor provoca repulsa psicológica pelo consumidor devido a associação com a descarga de esgotos (PERPÉTUO, 2014).

As ETAs 1 e 2 portanto precisam de manutenções preventivas e corretivas nos filtros, incluindo-se reparos na estrutura e reposição de leitos filtrantes para efetivar um melhor trabalho de absorção de substâncias dissolvidas e melhor clarificação da água (SALCEDO et al, 2011).

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 (BRASIL, 2021) são consideradas não satisfatória para o consumo humano (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, 2011), 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).

A cor aparente da água, nos pontos cujas concentrações estão em desacordo com a legislação (não conformidade, vide tabelas 9, 10, 11 e 12), sugere que o tratamento nas respectivas ETAs é inadequado. Na pior das hipóteses, indica que a infraestrutura da ETAM precisa ser melhorada. No presente caso, foi demonstrado que a qualidade da água está frequentemente fora dos padrões legais. Este também pode ser um indicativo de tratamento insuficiente e/ou presença excessiva até de poluentes na água bruta.

### **7.3. Potencial Hidrogeniônico (pH)**

O pH da 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 apresentado na água bruta devido, principalmente, a adição

de sulfato de alumínio ao longo do processo de coagulação/floculação e conforme demonstrado na equação 2 do capítulo 2.4.1.1 deste trabalho.

De acordo com portaria do Ministério da Saúde nº 888/2021, é recomendado que o pH da água utilizada para consumo humano fique entre 6,0 e 9,0 (BRASIL, 2021). Essa recomendação se configura como a última etapa do tratamento de água, a qual é responsável pela adição de álcalis para ajustar o pH ao limite (neutralizar a acidez), caso seja necessário. O pH ácido da água além de ser pró-corrosiva 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).

A média do valor do pH da água tratada durante as análises experimentais (2021) da ETA 1 ficou em  $5,84 \pm 0,14$  e a média das ETAs 2 e 3 ficou  $5,63 \pm 0,18$ . Ou seja, ambas com resultados fora do padrão legal exigido (não conformidade).

Para corrigir o pH seria necessário adicionar à água tratada reagentes capazes de diminuir a acidez. Porém, durante o período de coleta de amostras, o sistema de dosagem da cal estava inoperante e a correção do pH não estava sendo realizada. Esses problemas se somam às várias etapas da ETAM, resultando em problemas sistêmicos de não conformidade legal. Mas esta deficiência tende a comprometer a eficiência da desinfecção com cloro residual livre (CRL) (KERRY et al., 2012)

#### **7.4. Cloro Residual Livre (CRL)**

Para a série estudada (2016, 2017, 2019 e 2021) a concentração diária de cloro é fundamental para o tratamento e blindagem contra microrganismos, mesmo após a saída da água tratada da ETA. Portanto, um ponto positivo da desinfecção por cloração é a característica de produzir um residual de cloro livre (CRL) que garante a ausência de patógenos mesmo após a água sair do sistema de tratamento.

Para as análises experimentais de 2021, as amostras de água da saída da ETA 1 apresentaram um valor médio de CRL de  $0,95 \pm 0,33$  mg/L  $\text{Cl}_2$  durante o período de monitoramento e na saída da ETA 23 o valor médio foi de  $1,22 \pm 0,36$  mg/L  $\text{Cl}_2$  (Tabela 8). Deste modo, este parâmetro estava dentro dos padrões de potabilidade estabelecidos pela portaria MS nº888/2021.

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  $\text{Cl}_2$  em qualquer

ponto ao longo da rede de distribuição e até a chegada em residências. Todavia, a concentração máxima é de 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 por exemplo, 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). O cloro residual em baixas concentrações na rede de distribuição, associado à turbidez elevada (ou não conforme), pode ser um potencial causador de “contaminação” na água por microrganismos patogênicos (LEVY et al., 2008). Portanto, quando o parâmetro turbidez está em não conformidade na saída da ETA, é um sinal de alta probabilidade de baixa efetividade ou eficiência da cloração.

Freitas, Brilhante e Almeida (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. Cabe ressaltar que não era estipulado teor máximo de cloro livre na legislação da época. Entretanto, na legislação atual, o valor é de 2,0 mg/L (na rede, não na saída da ETA).

Por outro lado, é importante frisar que a inclusão de um limite para o teor de cloro residual livre máximo no padrão de potabilidade vem de encontro com estudos sobre a formação de compostos trihalometanos (THMs).

Os THMs podem ser prejudiciais à saúde humana pelo consumo contínuo (DUARTE E PINTO, 2008). Contudo, esse risco parece ser maior quanto maior for o nível de falhas nas fases anteriores de tratamento, onde por exemplo possa ocorrer concentrações ainda elevadas de resíduos de matéria orgânica na água. Então, as falhas de tratamento podem provavelmente resultar em maiores chances ou mais alto nível de concentração de matéria orgânica, a qual também pode estar associada com maior nível de turbidez ou cor aparente da água elevada.

A relação de concentração de CRL e turbidez deve ser estudada de forma mais atenta pela CAESA ou IDEIAS (nova concessionária após desestatização da CAESA). Pois, a partir dos dados da Tabela 8, e do histórico analisado nos anos 2016, 2017 e 2019, percebe-se uma alta turbidez (acima do recomendado) que pode comprometer a eficiência da cloração e até favorecer a formação dos THMs na rede de distribuição, sem o conhecimento das autoridades ou gestores que a conduzem.

## **7.5. Coliformes Totais e Escherichia Coli (E. Coli) nos Experimentos de 2021**

Para a série história dos anos de 2016, 2017 e 2019 não houve dados disponíveis para as análises bacteriológicas realizadas pela CAESA. Como essas análises não são realizadas periodicamente, ocorre uma irregularidade legal (BRASIL, 2021). Os dados de 2021 expostos nas tabelas 4, 7 e 8 são relativos às campanhas experimentais exclusivas da presente pesquisa.

Por exemplo, nas ETAs 1, 2 e 3 os resultados das análises bacteriológicas na água mostraram diminuição quantitativa considerável de colônias bacterianas durante as etapas de tratamento (resultado obviamente esperado). O ponto de partida foi a água bruta da captação, a qual apresentou valor médio de 604 NMP/100mL de Coliformes totais e de 552 NMP/100ml de E. coli, relativamente altos (CUNHA et al., 2004; CUNHA et al., 2005).

Durante o processo de tratamento as amostras após os filtros das três ETAs apresentaram redução significativa da quantidade de coliformes totais e E. Coli. E estas etapas concentram apenas etapas físicas. Porém a desinfecção com o agente químico (cloro) é sempre imprescindível. Tanto que a Portaria MS nº 888/2021 estabelece que na saída do tratamento a água deve estar isenta de coliformes totais e E. Coli em cada 100 mL de água.

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 cloro (dentro do limite de conformidade legal). Uma explicação é que outros fatores ou parâmetros-chave (pH e Turbidez) estavam ocasionalmente também fora do padrão (BRASIL, 2021; LEVY 2008).

Esses resultados, no entanto, são aparentemente inconsistentes. Põe potencialmente em xeque a segurança da saúde da população macapaense. Richter e Azevedo Netto (1991) comentam que as ETAs atendem menos do que 60% da população da América Latina, mesmo assim estão concentradas em grandes cidades. E estas são servidas por estes tipos de sistemas modulares a partir de padronização de projetos. Não bastasse o déficit brasileiro do saneamento, os problemas estão concentrados em seu maior volume na região norte do Brasil (ARAÚJO et al., 2021), 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). Apesar da ETAM ter se expandido com investimentos em infraestrutura (ETAs 2 e 3).

Todavia, não bastam apenas a infraestrutura. É necessário recursos humanos, equipamentos e excelente operacionalidade. As falhas do sistema apontam que os investimentos podem ter sido subestimados, pois faltou aplicação de recursos na operação. E, provavelmente, parecem comprometer a eficiência geral desses investimentos. Mas, ao invés disso, houve a

precarização dos recursos humanos, muito provavelmente não sendo possível otimizar todas as unidades operacionais da ETAM. Portanto, é necessário ações estruturantes, como capacitação técnica, melhoria do nível técnico operacional, manutenções preventivas e corretivas, além de uma profunda fiscalização e monitoramento da qualidade da água ao longo das fases de tratamento.

Richter e Azevedo Netto (1991) comentam que são necessárias, além de qualquer bom projeto, que as ETAs devem satisfazer condições básicas, a fim de permitir o seu emprego sob situações as mais diversas. Os projetos das ETAs devem ser de fácil adaptação a quaisquer condições de projeto e operação apresentar suficiente flexibilidade para ajustar a sua capacidade à demanda de projeto atual e futura (TSUTYIA, 2006).

A última condição a ser satisfeita com a adoção de projetos modulares (como a ETAM), ou seja, com módulos entendidos como unidades completa de tratamento, devem se somar sem contar com dispositivos ou partes intermediárias ou sem serem independentes para que a adição das novas unidades ocorra sem prejudicar a operação normal do sistema no futuro.

Mas o que foi observado na ETAM no período parece ter sido justamente o inverso. As novas unidades mostraram-se frequentemente menos eficientes que as anteriores. Portanto, é necessário pensar em ETAs no qual o emprego de equipamento seja minimamente operacional e que seu manejo não exceda o nível tecnológico local. Isso é possível quando a técnica é aplicada corretamente, conduzindo a uma extraordinária redução de custos, fácil operação com mínimo de manutenção, mas sem redução de eficiência (RICHTER E AZEVEDO NETTO, 1991).

E, segundo os referidos autores, é possível ainda aprimorar tecnicamente as ETAs com soluções economicamente simples. Há casos na literatura em que as diversas fases de tratamento podem conduzir a uma considerável redução nos investimentos necessários à implantação de um programa de abastecimento de água em uma dada localidade ou região, a ponto de que com apenas 40% da área construída em ETAs convencionais por unidade de volume tratado se obtenha a mesma eficiência, bastando para isso incorporar mais conhecimento sobre as etapas de mistura e floculação.

Uma segunda problemática é o 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 trialometanos (THMs). Quanto mais ampla é a rede de distribuição, mais difícil é manter a concentração de cloro residual; b) mas quanto mais cloro residual é adicionado à rede (mesmo somente em

pontos críticos ou intermediários com menor concentração), os riscos de formação de THMs se elevam.

Isto é, se suficiente ou excessiva concentração de CRL for adicionado ao sistema o nível de THMs pode ser excedido. Mas, além desse problema, há a influência do projeto (desenho eficiente) das redes de distribuição de água de abastecimento (KERRY et al., 2012), mantendo-se a pressão correta de distribuição e mistura para minimamente manter a concentração de cloro na rede em conformidade legal (*looping das redes*), sem, contudo, exceder os níveis permitidos de THMs.

## 8. CONCLUSÕES

Com base nos estudos e análises realizadas foi possível identificar os principais fatores que influenciam na eficiência dos três módulos de tratamento (ETA 1, ETA 2 e 3).

Por meio das séries históricas dos parâmetros-chave de qualidade da água na ETAM, durante os anos 2016, 2017 e 2019, foi possível verificar que as três ETAs apresentaram diferenças significativas de eficiência operacional entre si.

Um aspecto relevante refere-se aos principais parâmetros de qualidade da água tratada, que definem a eficiência de uma ETA. Estes parâmetros-chave estiveram frequentemente fora dos limites estabelecidos pela portaria de potabilidade (MS 888/2021 – BRASIL/2021). Assim, foi possível avaliar a evolução dos dados experimentais de junho e julho de 2021, onde cada etapa do tratamento apresentou demandas de correção preventiva ou corretiva no nível operacional. Deste modo, foram propostas melhorias da qualidade do produto da ETAM com base nas deficiências operacionais estudadas.

Ensaio experimentais de “Jar Test” permitiram a identificação da concentração ideal do coagulante e o pH ótimo de floculação, variando-se as tipologias de uso de sulfato de alumínio em combinação com polímero e, em alguns casos, cal hidratada. Mas, observou-se, que este tipo de teste não é realizado com frequência. Nem decisões de aplicações de componentes químicos são realizadas com base nesses testes.

Diferentes níveis operacionais da ETAM variaram em eficiência. Notadamente as diferentes fases de tratamento, onde mostraram oscilação dos valores de pH na operação de floculação, principalmente quando há necessidade de preparar a solução do coagulante *in loco*.

A turbidez e cor aparente, após os filtros das ETAs 1 e 2, revelam que as ambas demandam urgente manutenção corretiva, com destaque aos filtros e limpeza dos reservatórios para a produção de uma água de melhor qualidade, pois apresentaram valores mais elevados do que antes da filtração, uma inconsistência operacional indesejada. Percebe-se que a companhia não realiza monitoramento após a filtração e pré-desinfecção. Isto é, em não conformidade com a Portaria MS nº 888/2021.

Os parâmetros bacteriológicos da água bruta (captada pela ETAM) apresentam elevados níveis de contaminação. Os valores elevados e frequentes de CT e *E. Coli* podem ser um sintoma da ausência de sistemas de esgotamento sanitário em Macapá que costumam ser registrado ao longo de toda a orla. E esses impactos põem em risco a segurança hídrica e potencialmente impactam a saúde pública e elevam os custos de tratamento.

Tal fato exige uma cuidadosa manutenção da operação de cloração adequada ao longo de todo o processo de tratamento na ETAM, a despeito da considerável redução de coliformes totais e *Escherichia coli* pelos métodos físicos (decantação e filtração). Dado as falhas operacionais, esta providência manteria o agente desinfetante como blindagem da água contra os agentes patogênicos. E, apesar da concentração de cloro se manter geralmente dentro dos limites adequados, foram detectados testes positivos para coliformes fecais na água tratada da ETA 23. Nestes termos, alerta-se para o fato de que outros parâmetros em não conformidade podem reduzir a eficiência da desinfecção (turbidez, cor aparente e pH), comprometendo o tratamento com um todo.

Estatisticamente, ao se testar a influência de fatores operacionais nas variações dos parâmetros-chave envolvidos da qualidade da água da ETAM, especialmente a eficiência da cloração surgiram resultados controversos. Por exemplo, a ETA 23 é uma unidade operacional recente, mas nem por isso garantiu melhor eficiência no tratamento quando comparada com as mais antigas (ETAs 1 e 2). Esse fato demonstra que não são suficientes apenas investimentos em infraestrutura. Há evidências demonstrada na presente investigação a necessidade de melhorias em ações estruturantes. Dentre estas a capacitação e qualificação de equipes de planejamento, operação e gerenciamento da ETA. Além disso, o fortalecimento e valorização do monitoramento, incluindo-se regulação da frequência dos testes de jarros, com a frequência operacional adequada ensejada pela legislação.

Desta forma, com as devidas correções, haveria melhor economicidade e eficiência do tratamento da ETAM, pois não obstante, praticamente todas as unidades operacionais necessitam de intervenções, com correções das deficiências das unidades operacionais a serem superadas.

Em se tratando de uma infraestrutura essencial de uma cidade, que beneficia toda uma sociedade na zona urbana de Macapá, os níveis de inconsistência, deficiência, não observação legal, não conformidades, etc., tornaram-se atualmente intoleráveis. Porque o cidadão que paga pelos serviços não somente tem o direito à saúde como à qualidade dos serviços de saneamento, mas também porque o cidadão comum demanda uma maior confiança sobre o funcionamento do sistema operacional da ETAM, como parte até do direito do consumidor.

Assim, os serviços prestados pela ETAM cumpririam melhor sua missão principal se os serviços de oferta de água fossem adequados tanto em quantidade e quanto em qualidade. Estes quesitos são básicos e manteriam a qualidade de vida e a saúde dos cidadãos. E,

consequentemente, não haveria tantas críticas e questionamentos evidenciadas pelas não conformidades ao longo do ciclo de vida da ETAM e no horizonte de longo prazo.

## **9. RECOMENDAÇÕES**

A partir dos resultados obtidos e da literatura estudada, algumas recomendações são sugeridas para ajudar a melhorar a eficiência da ETAM (ETA 1, ETA 2 e ETA 3), em se tratando das características operacionais e cumprimentos ao padrão de potabilidade.

- Realização do teste de jarros nos diferentes períodos sazonais para trabalhar sempre na dosagem ótima de produto químico. Por exemplo, em outros meses mais secos ou mais chuvosos;
- Manutenção corretiva e preventiva nos filtros.
- Limpeza frequente dos reservatórios.
- Fazer a correção do pH de saída da ETAM
- Controlar a vazão de entrada e saída das ETAs – monitorar os parâmetros hidráulicos.
- Realizar análises bacteriológicas com maior frequência e avaliar potenciais problemas de cianobactérias (toxinas já observadas anteriormente em estudos científicos).
- Equipar o laboratório para analisar os parâmetros exigidos na portaria MS nº888/2021.
- Fazer análises periódicas da concentração de cloro residual livre na rede de distribuição (incluindo-se as pontas de rede) e, se for o caso, adotar sistemas de recloração em pontos estratégicos.
- Adequar o tempo de contato do cloro com a água tratada de acordo com as tabelas da portaria MS nº888/2021.

## 10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, C. H. M. CUNHA, A. C. Hydrodynamic modeling and simulation of water residence time in the estuary of the lower Amazon river. *Water (Switzerland)*, v. 12, n. 3, 2020.

ALEGRE, P. et al. Evolution of physicochemical species concentration in streams based on heavy rainfall event data obtained for high-frequency monitoring. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Porto Alegre, v. 21, n. 4, p. 653-665, 2016.

ARAÚJO, E. P. et al. 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.

BANCO NACIONAL DO DESENVOLVIMENTO - BNDS. Plano Municipal de Saneamento Básico de Macapá/AP. 334 p. 2018.

BEZERRA, P, G, F. Análise da eficiência da estação de tratamento de água (ETA II) de Macapá, Amapá. Monografia (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal do Amapá, Amapá, 2017.

BRASIL. Diário Oficial da União. Publicado em: 07/05/2021 | Edição: 85 | Seção: 1 | Página: 127. Órgão: Ministério da Saúde/Gabinete do Ministro. 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.

BRASIL. Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020. Brasília, 2020.

BRASIL. Manual prático de análise de água/ FUNDAÇÃO NACIONAL DA SAÚDE. 4. ed. – Brasília: Funasa, 150 p. 2013.

BRASIL. Manual de controle da qualidade da água para técnicos que trabalham em etas. Ministério da Saúde, Fundação Nacional de Saúde. – Brasília: Funasa, 112 p. 2014.

CORRÊA, M. C. P.; BARBOSA, G. R. R.; FAVA, M. B.; CUNHA, A. C. Variação espacial de flúor em residências e correlação com a distância do sistema de abastecimento público da ETA de Macapá-AP/Brasil. *Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais*, v.12, n.3, p.267- 282, 2021. DOI: 10.6008/CBPC2179-6858.2021.003.002

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 Jr, 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, 2004, p. 322-328. <http://dx.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 - PA, v. 1, n.1, p. 191-199, 2005.

CUNHA, A. C; SILVEIRA, L. S. L. Usings table isotopes  $^{18}\text{O}$  and  $^2\text{H}$  of lake water and biogeochemical analysis to identify fators affecting water quality in four estuarine Amazonian shallow lakes. Hydrological Processes, v. 32, p. 1188-1201, 2018.

CUNHA, H. F. A.; LIMA, D. C. I.; BRITO, P. N. DE F.; CUNHA, A. C. DA; SILVEIRA JUNIOR, A. M. DA; BRITO, D. C. Qualidade físico-química e microbiológica de água mineral e padrões da legislação. Revista Ambiente & Água, v. 7, p. 155-165, 2012

DUARTE, A. A. L.; PINTO, J. A. D. S. Aplicação de modelos matemáticos no controle da formação de trihalometanos em águas de abastecimento. XIII SILUBESA - Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2008.

FERREIRA FILHO, S. S. Tratamento de água: concepção, projeto e operação de estações de tratamento. Elsevier, 1. ed. - Rio de Janeiro: 2017.

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.

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, 2001.

FURTADO, R. N. et al. Avaliação da conformidade físico-química e microbiológica da água tratada e distribuída no município de Santana/AP. Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais, v. 8, n. 4, p. 101–110, 2017.

GROTT, S. L. Águas subterrâneas em Macapá. Dissertação de Mestrado em Direito Ambiental e Políticas Públicas –PPGDAPP/UNIFAP (2016).

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.

HELLER, L.; PADUA, V. L. Abastecimento de Água para Consumo Humano. Belo Horizonte, MG. Editora UFMG, 2010.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. Síntese de Indicadores Sociais - 2019. Disponível em: < <http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 02 fev. 2022.

INSTITUTO TRATA BRASIL. Ranking Do Saneamento Instituto Trata Brasil 2021 (Snis 2019). v. 2021, n. Snis 2019, p. 133, 2021.

KAMIWADA, W. Y.; ANDRADE, P. V. Emprego do cloreto de polialumínio em estudos de tratabilidade de água de abastecimento via coagulação, floculação e sedimentação. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, v.25, n.5, p. 667-676, 2020.

KERRY, J.H.; DAVID, W.H.; JOHN, C.C. *Principles of Water Treatment*. 1 ed. New Jersey, EUA: Ed. John Wiley & Sons, INC, 2012, 654 p.

LENZI, E. Et al. *Introdução à química da água: ciência, vida e sobrevivência*. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2014.

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.

LIBÂNIO, M. *Fundamentos de Qualidade e Tratamento da Água*. Campinas, SP: Editora Átomo, 2016.

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.

MUNDO EDUCAÇÃO. Portal Mundo Educação. Processo de Coagulação/Floculação. 2021. Disponível em: <<https://mundoeducacao.uol.com.br/quimica/floculacao.htm>> Acesso em 30 de agosto de 2021.

NASCIMENTO, R. S. Simulação de alterações numa ETA convencional de porte médio para a produção de água segura. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, vol. 21, n. 2, p. 439 - 450, 2016.

OLIVEIRA, E. D. C.; CASTELO-BRANCO, R.; 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.

OLIVEIRA, E. D. C; CUNHA, A. C; SILVA, N. B; FAUSTINO, S. M. M; CASTELO BRANCO, R. RAMOS, V; MORAIS, J; SCHNEIDER, M. P. C. VASCONCELOS, V. Morphological and molecular characterization of cyanobacterial isolates from the mouth of the amazon river. *Phytotaxa*, v. 387, n. 4, p. 269–288, 2019.

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.

PEREIRA, R. F.; AURÉLIO, M.; CASTRO, H. DE. Calibração do Coeficiente de Decaimento do Cloro (kw) em Redes de Abastecimento de Água Utilizando o Método Iterativo do Gradiente Hidráulico Alternativo Adaptado para Gradiente de Concentração. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 18, n.4, p. 67-76, 2013.

PERPÉTUO, E. A. Parâmetros de caracterização da qualidade das águas e efluentes industriais. São Paulo: CEPEMA-USP, 2014. 90p

PERTEL, M. Avaliação de desempenho dos sistemas de abastecimento de água do Agreste brasileiro. *Ambiente Construído*, v. 19, n. 3, p. 249–258, 2019.

PRADO, E. P.; ARAÚJO, D. DE; RAETANO, C. G. Influência da dureza e potencial hidrogeniônico da calda de pulverização sobre o controle do ácaro-da-leprose em frutos de laranja doce. *Bragantia*, v. 70, n. 2, p.389-396, 2011.

RICHTER, C. A. Métodos e Tecnologias de Tratamento. São Paulo, SP: Editora Blucher, 2009.

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

SALCEDO, J. C; TESTEZLAF, R; MESQUITA, M. Processo Da Retrolavagem Em Filtros De Areia Usados Na Irrigação Localizada. *Revista Engenharia Agrícola*, v.31, n.6, p.1226-1237, 2011.

SALGADO, S. R. T. Estudo dos parâmetros do decaimento do cloro residual em sistema de distribuição de água tratada considerando vazamento. Dissertação de Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlo, 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.

SENEDA, R. M.; GARCIA, G. F.; REIS, A. G. DOS. Cinética da floculação: um estudo comparativo no uso do cloreto de polialumínio com alta e baixa basicidade e o sulfato de alumínio. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 26, n. 2, p. 283–290, 2021.

TSUTYIA, M. T. Abastecimento de Água. São Paulo, SP: Escola Politécnica da USP. 3ª Edição, 2006.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAPÁ - UNIFAP. CUNHA, A. C. (org) et al. Plano Municipal de Saneamento Básico (PMSB) – Município de Amapá/AP. Prospectiva e planejamento estratégico. 293 páginas. Macapá – AP. 2021.

VALERIO, A. L. D. E. M. A. V et al. Using CDOM optical properties for estimating DOC concentrations and p CO<sub>2</sub> in the Lower Amazon River. *Optics Express*, v. 26, n. 14, 2018.

VON SPERLING, M. V. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. 3. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais, 2005. 243 p.

VON SPERLING, M, VERBYLA, M. E. AND OLIVEIRA, S. M. A. C. Assessment of Treatment Plant Performance and Water Quality Data: A Guide for Students, Researchers and Practitioners. IWA Publishing Alliance House. London SW1H 0QS, UK. 2020.

WARD, NICHOLAS D. et al. Velocity-amplified microbial respiration rates in the lower Amazon River. *Limnology and Oceanography Letters*, v. 1, p. 1, 2018.