



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO  
INSTITUTO DE BIOFÍSICA CARLOS CHAGAS  
FILHO



RAPHAELA RANGEL DA SILVA ARAUJO

**AVALIAÇÃO DA COMPARAÇÃO ENTRE AS CONCENTRAÇÕES DE  
CLOROFILA-a E A DENSIDADE DE CIANOBACTÉRIAS, VISANDO A  
UTILIZAÇÃO DE UM INDICADOR DE FLORAÇÕES PARA FINS DE  
MONITORAMENTO DA QUALIDADE DA ÁGUA PARA ABASTECIMENTO  
PÚBLICO**

RIO DE JANEIRO

2024

**RAPHAELA RANGEL DA SILVA ARAUJO**

**AVALIAÇÃO DA COMPARAÇÃO ENTRE AS CONCENTRAÇÕES DE  
CLOROFILA-a E A DENSIDADE DE CIANOBACTÉRIAS, VISANDO A  
UTILIZAÇÃO DE UM INDICADOR DE FLORAÇÕES PARA FINS DE  
MONITORAMENTO DA QUALIDADE DA ÁGUA PARA ABASTECIMENTO  
PÚBLICO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao  
Mestrado Profissional de Formação para a Pesquisa Biomédica do Instituto de  
Biofísica Carlos Chagas Filho da  
Universidade Federal do Rio de Janeiro como requisito à obtenção do Título de Mestre  
em Formação de Pesquisa Biomédica

**Orientadores:** Profa Dra Sandra Maria Feliciano de Oliveira e Azevedo (UFRJ/IBCCF)

Dr. Fernando Antônio Jardim (COPASA)

## CIP - Catalogação na Publicação

A663a Araujo, Raphaela Rangel da Silva  
AVALIAÇÃO DA COMPARAÇÃO ENTRE AS CONCENTRAÇÕES DE CLOROFILA-a E A DENSIDADE DE CIANOBACTÉRIAS, VISANDO A UTILIZAÇÃO DE UM INDICADOR DE FLORAÇÕES PARA FINS DE MONITORAMENTO DA QUALIDADE DA ÁGUA PARA ABASTECIMENTO PÚBLICO / Raphaela Rangel da Silva Araujo. -- Rio de Janeiro, 2024.  
135 f.

Orientador: Sandra Maria Feliciano de Oliveira Azevedo.  
Coorientador: Fernando Antônio Jardim.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Biofísica Carlos Chagas Filho, Programa de Mestrado Profissional em Formação para a Pesquisa Biomédica, 2024.

1. Cianobactérias. 2. Clorofila-a. 3. Monitoramento. 4. Padrão de potabilidade. I. Azevedo, Sandra Maria Feliciano de Oliveira, orient. II. Jardim, Fernando Antônio, coorient. III. Título.

Elaborado pelo Sistema de Geração Automática da UFRJ com os dados fornecidos pelo(a) autor(a), sob a responsabilidade de Miguel Romeu Amorim Neto - CRB-7/6283.

“Avaliação da comparação entre as concentrações de clorofila-a e a densidade de cianobactérias, visando a utilização de um indicador de florações para fins de monitoramento da qualidade da água para abastecimento público”

# RAPHAELA RANGEL DA SILVA ARAUJO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO PROFISSIONAL DE FORMAÇÃO PARA A PESQUISA BIOMÉDICA SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO VISANDO A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM FORMAÇÃO PARA A PESQUISA BIOMÉDICA.

APROVADA POR:

RIO DE JANEIRO, 19 DE DEZEMBRO DE 2024.



DRA. FLAVIA FONSECA BLOISE (DOUTORA – UFRJ)

(COORDENADORA DO CURSO DE MESTRADO PROFISSIONAL DE FORMAÇÃO PARA PESQUISA BIOMÉDICA)



DR. SANDRA MARIA FELICIANO DE OLIVEIRA E AZEVEDO (DOUTOR – UFRJ) – ORIENTADORA

**VÍDEOCONFERÊNCIA**

DR. FERNANDO ANTÔNIO JARDIM (DOUTOR – COPASA) – 2ª ORIENTADOR



DR. JOÃO PAULO MAGHADO TORRES (DOUTOR - UFRJ)

**VÍDEOCONFERÊNCIA**

DR. MARIO UBIRAJARA GONÇALVES BARROS - (DOUTOR – COGERH)

**VÍDEOCONFERÊNCIA**

DRA. PRISCILA ROBERTA BARRETO (DOUTORA – SABESP)

**VÍDEOCONFERÊNCIA**

DR. EDNILDO DE ALCÂNTARA MACHADO (DOUTOR – UFRJ) - REVISOR

## DEDICATÓRIA

*“Um dia  
Vivi a ilusão de que ser homem bastaria  
Que o mundo masculino tudo me daria  
Do que eu quisesse ter  
Que nada  
Minha porção mulher que até então se resguardara  
É a porção melhor que trago em mim agora  
É que me faz viver  
Quem dera  
Pudesse todo homem compreender, ó mãe, quem dera  
Ser o verão o apogeu da primavera  
E só por ela ser  
Quem sabe  
O super-homem venha nos restituir a glória  
Mudando como um Deus o curso da história  
Por causa da mulher”*

Gilberto Gil

Dedico este trabalho à mulher e bióloga que me tornei.

E a todas as mulheres do saneamento.

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha profunda gratidão a minha incrível orientadora, Prof. Dra. Sandra Azevedo, pela sua inestimável orientação, apoio e incentivo durante todo o processo de elaboração desta dissertação. Agradeço a paciência, compreensão, as valiosas sugestões e a constante disponibilidade para me auxiliar na superação de tantos desafios encontrados. E foram muitos. Sem a sua experiência e dedicação, este trabalho não seria possível. Mesmo.

Agradeço também ao meu segundo orientador e amigo, Dr. Fernando Antônio Jardim, o primeiro a me mostrar a beleza da Hidrobiologia. Em quem sempre me espelhei e fio condutor do meu trabalho desenvolvido junto à Copasa.

A equipe do LETC pelas valiosas discussões e colaboração durante os seminários do laboratório. Agradeço especialmente ao Ricardo por ter me dito um dia que eu precisava estudar mais (como essa frase foi importante) e pela imensa ajuda na parte estatística para o desenvolvimento dos modelos.

À Copasa, pelo incentivo à participação no Mestrado Profissional, principalmente à Ana Paula Faria por ter proporcionado que esse incentivo ocorresse. A todos os biólogos dos Laboratórios Regionais e Central pelo trabalho incrível desenvolvido junto às análises hidrobiológicas e que produziram parte dos dados utilizados nesse trabalho.

Um agradecimento especial à minha coordenadora e também bióloga Cristina e toda equipe do Setor de Biologia do Laboratório Central (Izabella, Patrícia, Mariana, Leopoldo, Adriana, Lorivan, Rosemeiry, Marcio e Edislei) pela excelência do trabalho desenvolvido e pelo apoio e compreensão, principalmente na fase final desse trabalho. À Monica Mabbub por ter cedido tão prontamente as imagens das cianobactérias utilizadas aqui e que são frutos do incrível trabalho desenvolvido por ela nos anos dedicados à Hidrobiologia no Laboratório Central.

Ao IGAM, na figura de Katiane Barbosa, pela disponibilização dos dados de monitoramento dos mananciais de Minas Gerais.

Sou grato à minha família pelo apoio incondicional durante toda a minha trajetória. À minha vó Esmerina, minha mãe Rosana, meus irmãos e sobrinhos pela compreensão da distância e da falta de presença imposta pelas minhas escolhas. À minha tia Letícia, mulher, mãe e farmacêutica incrível, minha grande inspiração para sair e correr mundo a fora.

Aos meus tios, Roseny e Francisco, meus segundos pais, meu eterno amor e agradecimento. Sem vocês nada disso teria tido início e principalmente, continuidade.

Aos meus lindos e majestosos gatos: Margarida, Sonny Blues Williamson, Carmem Lúcia, Violeta, Lavanda, Rosa, Hibisco, Quinto, Alecrim, Kurt Cobain, Nina Simone e Lô Borges. E também a cachorra vira-lata mais linda de todas, Preta.

A meu pai:

*“See how they shine*

*If you need a friend*

*I'm sailing right behind*

*Like a bridge over troubled water*

*I will ease your mind*

*Like a bridge over troubled water*

*I will ease your mind”*

Até breve.

Te amo!

## RESUMO

O consumo de água é crescente para os diversos fins, porém sua disponibilidade com boa qualidade está se tornando cada vez menor. Tal fato demanda uma maior atenção com a qualidade da água dos mananciais, utilizados sobretudo para abastecimento público. Diversos parâmetros são utilizados para o controle da qualidade da água, dentre eles, a presença de cianobactérias e cianotoxinas na água captada. Devido ao grande impacto da presença de cianobactérias/cianotoxinas na água a ser utilizada para consumo humano e as dificuldades (logística e pessoal capacitado) na identificação e quantificação das mesmas, o presente trabalho visa correlacionar a densidade de cianobactérias com a concentração de clorofila-a, em mananciais superficiais e reservatórios, tornando assim a concentração de clorofila-a uma ferramenta limnológica importante na indicação da ocorrência de florações de cianobactérias. Resultados gerados por meio de análise de Regressão Quantílica Linear, utilizando 2.194 amostras representativas do Estado de Minas Gerais e abrangendo o período de 2000 a 2020, indicaram que quando a concentração de clorofila foi de 10 µg/L pelo menos 50% das amostras excederam o valor de 10.000 cel/mL de cianobactérias e pelo menos 50% das amostras excederam o valor de 20.000 cel/mL quando a concentração de clorofila-a foi de aproximadamente 20 µg/L (valores de densidade de cianobactéria preconizados pelo Ministério da Saúde – Brasil, associados ao risco da presença de cianotoxinas na água para abastecimento). O presente trabalho buscou proporcionar valores referenciais de clorofila-a que sirvam de níveis de alerta, principalmente em locais onde não existe profissional treinado na identificação e contagem de cianobactérias, visando também minimizar o tempo entre amostragem, análise e emissão de resultado, que é crítico para a tomada de decisões. Essas limitações podem extrapolar o tempo de segurança para tomada de decisões quanto à qualidade da água distribuída.

Palavras-chave: Cianobactérias, clorofila-a, monitoramento

## ABSTRACT

The consumption of water is increasing for various purposes, but its availability with good quality is becoming less and less. This fact demands greater attention to the quality of the water from the springs, used mainly for public supply. Several parameters are used to control water quality, including the presence of cyanobacteria and cyanotoxins in the water collected. Due to the great impact of the presence of cyanobacteria/cyanotoxins in the water to be used for human consumption and the difficulties (logistics and trained personnel) in identifying and quantifying them, the present work aims to correlate the density of cyanobacteria with the concentration of chlorophyll-a, in surface springs and reservoirs, thus making the concentration of chlorophyll-a an important limnological tool in the indication of the occurrence of cyanobacterial blooms. Results generated through Linear Quantile Regression analysis, using 2,194 representative samples from the State of Minas Gerais and covering the period from 2000 to 2020, indicated that when the chlorophyll concentration was 10 µg/L, at least 50% of the samples exceeded the value of 10,000 cells/mL of cyanobacteria and at least 50% of the samples exceeded the value of 20,000 cells/mL when the concentration of chlorophyll-a was approximately 20 µg/L (cyanobacteria density values recommended by the Ministry of Health – Brazil, associated with the risk of the presence of cyanotoxins in the water supply). The present work sought to provide reference values of chlorophyll-a that serve as alert levels, especially in places where there is no professional trained in the identification and counting of cyanobacteria, also aiming to minimize the time between sampling, analysis and issuance of results, which is critical for decision making. These limitations may exceed the safety time for decision-making regarding the quality of the water distributed.

Keywords: Cyanobacteria, chlorophyll-a, monitoring

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Imagens de cianobactérias sob microscopia ótica.....	17
Figura 2: Fluxograma para os níveis de alerta no monitoramento de cianobactérias, traduzido do proposto por Chorus e Welker (2021). ....	34
Figura 3: Fluxograma de monitoramento de cianobactérias em sistema de abastecimento de água potável. Adaptado de Ministério da Saúde (2021). ....	37
Figura 4: Mapa das bacias hidrográficas do estado de Minas Gerais.....	41
Figura 5: Boxplot para os valores de densidade de cianobactérias (A) e concentração de clorofila-a (B). ....	47
Figura 6: Correlação entre log da densidade de cianobactéria (cel/mL) e log da concentração de Clorofila-a ( $\mu\text{g/L}$ ) ( $n=2.194$ ). ....	48
Figura 7: Regressão linear Simples, onde densidade de cianobactéria (cel/mL) como variável resposta e concentração de Clorofila-a ( $\mu\text{g/L}$ ) como variável preditora ( $n=2.194$ ). ....	49
Figura 8: Gráfico dos Resíduos gerados pelo modelo de Regressão Linear Simples ( $n=2.194$ ). ....	50
Figura 9: Regressão Quantílica onde densidade de cianobactéria (log cel/mL) como variável resposta e concentração de clorofila-a (log $\mu\text{g/L}$ ) como variável preditora ( $n=2.194$ ) para os Quantis estimados (0,25, 0,50, 0,60, 0,75, 0,80, 0,85, 0,90, 0,95). ....	51
Figura 10: Coeficientes estimados ( $B_0$ e $B_1$ ) no modelo de Regressão Quantílica ( $n=2.194$ ). ....	51
Figura 11: Boxplot das variáveis Densidade de Cianobactéria, em cel/mL, e Concentração de Clorofila-a, em $\mu\text{g/L}$ , das amostras de água do Estado de Minas Gerais ( $n=416$ ) para o período de 2021 a .2023.....	56
Figura 12: Boxplot das variáveis Densidade de Cianobactéria, em cel/mL, e Concentração de Clorofila-a, em $\mu\text{g/L}$ , em ambientes lótico e lêntico. ....	57
Figura 13: Ocorrência de floração anual igual ou superior a 10.000 cel/mL (A) e ocorrência de floração anual igual ou superior a 20.000 cel/mL (B) em ambientes lótico e lêntico.....	58
Figura 14: Boxplot das variáveis Densidade de Cianobactéria, em cel/mL, e Concentração de Clorofila-a, em $\mu\text{g/L}$ , para as categorias I, II e III. ....	60
Figura 15: Fluxograma para proposta de monitoramento de cianobactérias em sistema de abastecimento de água potável – Mananciais lóticos sem histórico de ocorrência de cianobactérias.....	67
Figura 16: Fluxograma para proposta de monitoramento de cianobactérias em sistema de abastecimento de água potável – Ambientes lóticos com ocorrência anual de florações em até 50% das amostras.....	69

Figura 17: Fluxograma para proposta de monitoramento de cianobactérias em sistema de abastecimento de água potável – Ambientes lóticos com ocorrência anual de florações acima de 51% das amostras e ambientes lênticos..... 71

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Gêneros de cianobactérias produtoras de toxinas (amostras ambientais), suas toxinas específicas e os tecidos/órgãos afetados em humanos e valores máximos recomendados (VMR), de acordo com Chorus e Welker (2021).....	23
Tabela 2: Estatística descritiva das variáveis Densidade de Cianobactéria, em cel/mL, e Concentração de Clorofila-a, em µg/L, das amostras de água do Estado de Minas Gerais (n=2.194) para o período de 2.000 a 2020. ....	47
Tabela 3: Parâmetros estimados para os Quantis (Q) pela Regressão Quantílica Linear.....	52
Tabela 4: Valores ajustados de quantil mostrando a mudança da concentração de cianobactérias (cel/mL) com mudança na concentração de clorofila-a (µg/L). ....	52
Tabela 5: Concentração de Clorofila-a para uma dada probabilidade (Quantil) de estar dentro dos limites estabelecidos para os Níveis de Alerta I e II definidos em Chorus e Welker (2021). ....	53
Tabela 6: Concentração de Clorofila-a para uma dada probabilidade de estar dentro dos limites estabelecidos (Quantil) para os Níveis de Alerta I e II definidos em Ministério da Saúde (2021). ....	53
Tabela 7: Concentração de clorofila-a (µg/L) considerando as equações geradas nos quantis Q50, Q60 e Q85 correspondente a densidades de cianobactérias (cel/mL) referentes aos níveis de alerta (MS e OMS). ....	54
Tabela 8: Estatística descritiva das variáveis Densidade de Cianobactéria, em cel/mL, e Concentração de Clorofila-a, em µg/L, das amostras de água do Estado de Minas Gerais (n=416) para o período de 2021 a 2023. ....	56
Tabela 9: Percentual de amostras que excederam os níveis de alerta propostos (MS e OMS) de acordo a concentração de clorofila-a determinada para o quantil 50 (Q50). ....	62
Tabela 10: Percentual de amostras que excederam os níveis de alerta propostos (MS e OMS) de acordo a concentração de clorofila-a determinada para o quantil 60 (Q60). ....	63
Tabela 11: Percentual de amostras que excederam os níveis de alerta propostos (MS e OMS) de acordo a concentração de clorofila-a determinada para o quantil 80 (Q80). ....	64
Tabela 12: Percentual de amostras que excederam os níveis de alerta propostos (MS e OMS) de acordo a concentração de clorofila-a determinada para o quantil 50 (Q50). ....	64
Tabela 13: Limite de quantificação (LQ), valor do ensaio e prazo para emissão de resultado para as análises de concentração de clorofila-a e densidade de cianobactérias. ....	72

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	15
2.1 Cianobactérias .....	15
2.2 Cianotoxinas.....	21
2.3 Cianobactérias e Cianotoxinas na água de abastecimento publico .....	24
2.4 Métodos para detecção e quantificação de cianobactérias .....	28
2.4.1 Monitoramento visual.....	28
2.4.2 Monitoramento indireto .....	29
2.4.3 Monitoramento direto .....	30
2.5 Níveis de alerta para o monitoramento de cianobactérias.....	32
2.6 Padrão de potabilidade brasileiro.....	35
3 OBJETIVOS.....	39
3.1 Objetivo Geral.....	39
3.2 Objetivos específicos .....	39
4 METODOLOGIA .....	40
4.1 Dados utilizados.....	40
4.2 Dados utilizados para construção do modelo .....	40
4.2.1 Dados utilizados para verificação do modelo.....	40
4.3 Caracterização geográfica e climática.....	41
4.4 Metodologias analíticas .....	42
4.5 Análises Estatísticas para construção do modelo .....	42
4.6 Valores-referência para concentração de clorofila-a e densidade de cianobactérias ..	45
4.7 Verificação da adequação do modelo .....	46
4.8 Construção do Procedimento Operacional Padrão (POP) e material orientativo (cartilha) .....	46
5 RESULTADOS .....	47
5.1 Construção do modelo.....	47
5.2 Verificação do modelo.....	56
5.2.1 Verificação do percentual de amostras que excedem os níveis de alerta. ....	62
5.3 Proposta para utilização das concentrações de clorofila-a determinadas pelos modelos quantitativos no monitoramento de cianobactérias.....	65
5.3.1 Mananciais lóticos sem histórico de ocorrência de florações.....	66
5.3.2 Mananciais lóticos com ocorrência anual de florações de até 50% das amostras.	67

5.3.3 Mananciais lóticos com ocorrência anual de florações acima de 50% das amostras e mananciais lênticos.....	69
6. ....	DISCUSSÃO
.....	73
7 CONCLUSÃO .....	81
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	87
APÊNDICE A – Procedimento Operacional Padrão (POP) .....	94
APÊNDICE B – Cartilha.....	107

## 1 INTRODUÇÃO

A água é essencial para sustentar a vida, e um fornecimento adequado, seguro e acessível deve estar disponível para todos. Melhorar o acesso à água potável segura pode resultar em extensos benefícios para a saúde. Portanto, todos os esforços devem ser feitos para alcançar uma água de qualidade que seja a mais segura possível (WHO, 2021). Apesar de todo conhecimento sobre a importância do saneamento para a saúde pública, ainda são registradas inúmeras falhas quanto ao abastecimento público de água potável, esgotamento sanitário e gerenciamento de resíduos sólidos em nosso país e no mundo.

De acordo com dados recentes da Organização Mundial da Saúde (WHO; UNICEF; World Bank, 2022), 3,6 bilhões de pessoas convivem com situações precárias de saneamento e 2,0 bilhões de pessoas sem acesso à água potável ou a um sistema de abastecimento residencial. Dados oficiais do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) apontam que cerca de 4,8 milhões de brasileiros ainda não têm acesso à água potável e 49 milhões vivem sem coleta e tratamento de esgoto adequado, de acordo com os dados do Censo Demográfico de 2022 (IBGE, 2022).

A preocupação com a quantidade e a qualidade da água para abastecimento público torna-se real em função da escassez e deterioração desse recurso (UNESCO, 2022), em consequência, principalmente, da geração de esgotos não coletados e não tratados lançados diretamente nos mananciais utilizados para abastecimento público (Trindade et al, 2016; Campos; Barcarolli, 2023)

A água possui diferentes usos e, de acordo com a legislação brasileira, esses usos são apresentados pela resolução nº 357/2005 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Os usos principais são: irrigação, abastecimento humano, fonte energética, transporte, lazer, etc, e para cada uso requerido a água deve apresentar padrões de qualidade específicos.

Com a intenção de avaliar de maneira adequada a qualidade da água, o monitoramento regular se faz necessário (CETESB, 2021), proporcionando um melhor direcionamento das atividades a serem desenvolvidas (tratamento de água, restrição de uso pela população etc.). O monitoramento visa identificar diversos parâmetros que determinam a qualidade da água (presença e/ou ausência de contaminantes físicos, químicos e biológicos) e que estejam em desacordo com o que estabelece a legislação (CONAMA, 2005; BRASIL, 2021). Entre diversas possíveis vias de contaminação da população, destaca-se a presença das cianobactérias e cianotoxinas.

Considerando o uso da água para consumo humano, os padrões de qualidade no Brasil são definidos pelo Ministério da Saúde, através da Portaria GM/MS nº 888/2021. Nessa portaria está estabelecido o padrão de potabilidade da água e, atendendo-se aos valores definidos para cada parâmetro, a água pode ser prontamente consumida (BRASIL, 2021).

As cianobactérias são microrganismos fotossintetizantes encontrados naturalmente em lagos, rios, lagoas e outras águas superficiais. Sob certas condições como, temperatura elevada associada a uma abundância de nutrientes (nitrogênio e fósforo) elas podem proliferar e formar o que se denomina floração ou *bloom* de cianobactérias. Algumas cianobactérias são capazes de produzir toxinas, chamadas cianotoxinas, que podem representar riscos à saúde humana e de animais por meio do consumo da água potável sem que o tratamento tenha sido capaz de removê-las, por exposição à água de forma recreativa ou ocupacional, por consumo de pescado que pode ter bioacumulado essas toxinas, dentre outras vias de exposição.

Em virtude do risco associado à presença de cianobactérias na água, a Organização Mundial da Saúde (Chorus; Welker, 2021) recomenda níveis de vigilância e alerta para monitoramento e manejo em mananciais e reservatórios de abastecimento público, relacionando o risco da presença de cianotoxinas à densidade de cianobactérias e concentração de clorofila-a, concentrações essas utilizadas como referência no plano de monitoramento previsto pelo Ministério da Saúde.

Entretanto, reduzir a exposição das populações humanas às cianotoxinas requer uma detecção precoce, tratamento adequado da água e em último caso, interrupção do fornecimento de água potável, o que só pode ser alcançado por meio de monitoramento frequente.

O monitoramento da densidade de cianobactérias em amostras de água bruta é um trabalho demorado e de custo elevado, que envolve desde a coleta da amostra de maneira adequada, o envio à laboratório especializado e a correta identificação e quantificação das cianobactérias presentes na amostra (ANA, 2021). Caso sejam detectadas densidades acima dos limites permitidos pela legislação, são realizadas as análises para a detecção e quantificação de cianotoxinas. Muitas vezes o tempo decorrido entre o início e fim do processo é superior ao exigido para tomadas de decisões fundamentais para o manejo da água a ser liberada para abastecimento. Essa demora pode ocasionar riscos à saúde pública. Um caso clássico ocorrido no Brasil foi a síndrome de Caruaru – PE. Nesse episódio, aproximadamente 60 pacientes renais crônicos faleceram devido à água fornecida para as clínicas de hemodiálise na referida cidade estarem contaminadas com cianotoxinas (Azevedo et al, 2002).

A determinação de clorofila-*a*, por outro lado, apresenta um custo operacional de implantação e operação mais reduzido e de resposta mais rápida (tempo de análise em laboratório variando de 1 a 48h, dependendo do método adotado). Porém, não é possível determinar se a concentração de clorofila-*a* é oriunda de cianobactérias ou de outros organismos fitoplanctônicos. Devido ao fato de a concentração de clorofila-*a* ser uma medida indireta da presença de cianobactérias, ela não é exata para a determinação da densidade celular, sendo influenciada por diversos fatores (luminosidade, disponibilidade de nutriente, grupo fitoplanctônico, etc.) (Søndergaard et al, 2016; Chorus; Welker, 2021).

Entretanto, quando já há dados históricos que comprovam a ocorrência frequente de dominância de cianobactérias num determinado manancial, para a minimização de risco, pode-se considerar a concentração de clorofila-*a* de uma determinada amostra como sendo oriunda principalmente de cianobactérias (Jardim et al, 2014; Descy et al, 2020; Hsu et al, 2024).

Como a metodologia para a determinação de clorofila-*a* é mais facilmente implantada em laboratórios com menos recursos, inclusive por não exigir mão de obra especializada em comparação às análises qualitativas e quantitativas de identificação microscópica de cianobactérias, ela pode ser facilmente realizada em laboratórios distritais ou locais mais distantes, diminuindo os riscos associados à presença de cianobactérias na água.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 Cianobactérias

Cianobactérias são organismos procariontes, fotossintetizantes e estão presentes em ambientes diversos como aquático, terrestre, tropical, temperado e ártico. A presença de cianobactérias em ambientes aquáticos, de clima tropical e temperado, é bem documentada na literatura (Roffman, 1989; Roffman, 1999; Giani et al, 2020; Rajaneesh et al, 2020). Recentemente diversos trabalhos descrevem a ocorrência de cianobactérias em ambientes extremos, como Antártica (Taton et al, 2008; Singh et al 2021; Freitas et al, 2024) e regiões desérticas (Huang et al, 2022; Irit et al, 2023). A ocorrência de cianobactérias em tantos e tão diversos habitats é devido, em grande parte, às suas características adaptativas, como alta tolerância a níveis baixos de oxigênio, a capacidade de utilizar  $H_2S$  como fotorredutor no lugar de  $H_2O$ , e a forte capacidade de tolerância às radiações ultravioleta B e C (Sicora et al, 2023).

Apresentam diversas formas de vida (unicelular, filamentos, colônias) e tamanhos (<2 $\mu$ m a >200 $\mu$ m). As células das cianobactérias podem apresentar formas esféricas, elípticas, cilíndricas, cônicas ou em formato de disco. Não possuem flagelos, diferente de outros táxons fitoplanctônicos (Komárek; Johansen, 2015).

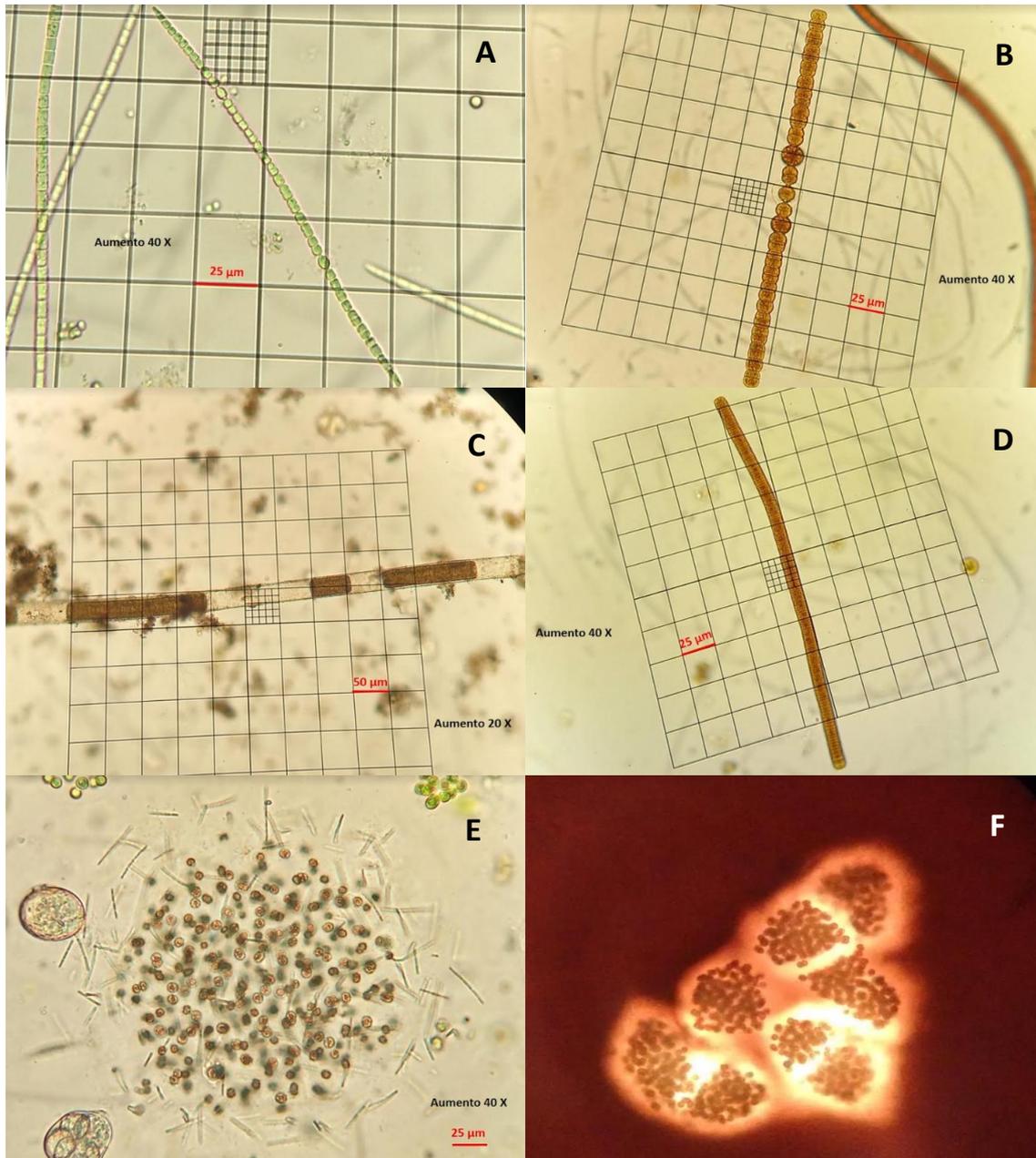
As cianobactérias são um grupo importante dentro da comunidade fitoplânctônica, apresentando uma série de vantagens competitivas que as tornam responsáveis por grande parte da produção primária em ambientes aquáticos (Bonilla et al., 2012), sendo considerados imprescindíveis para uma compreensão ecológica holística desses ambientes (Kuczyńska-Kippen, et al., 2024; Litchman; Pinto, 2024). Como vantagem competitiva podemos citar a presença de aerótopos, heterocitos e acinetos: células diferenciadas que são responsáveis por regular a posição na coluna de água, fixar nitrogênio atmosférico e facilitar a dispersão e permanência em condições adversas, respectivamente (Yema et al, 2016; Sukenik et al, 2019). Além disso, essas estruturas são importantes para classificação e identificação dos táxons por microscopia (Komárek; Johansen, 2015).

Na Figura 1 estão representados alguns gêneros de cianobactérias identificados durante a rotina analítica do Laboratório Central (Copasa).

A principal característica do fitoplâncton é a presença dos pigmentos fotossintetizantes clorofilas, carotenoides e ficobiliproteínas (ou ficobilinas). A ampla variedade de pigmentos acessórios permite ao fitoplâncton ampliar as possibilidades de absorção da luz para a fotossíntese. As clorofilas e os carotenoides estão presentes em todas as espécies de fitoplâncton. Os pigmentos clorofilados são divididos em grupos, diferenciados quimicamente e denominados por clorofilas a, b, c, d, e e. Todos os organismos fitoplanctônicos apresentam clorofila-a, enquanto que a clorofila-b está presente nas clorófitas e a clorofila-c está presente nas diatomáceas.

Uma das principais diferenças entre as cianobactérias e outras algas é a forma como captam a luz para realizar a fotossíntese. Enquanto a maioria do fitoplâncton depende principalmente de clorofila-a, as cianobactérias usam outros pigmentos fotossintetizantes, como as ficobilinas. As ficobilinas auxiliam no processo fotossintético por possuírem absorção de luz ótima em diferentes faixas do espectro luminoso, ampliando dessa forma a eficiência fotossintética. Dentre as ficobilinas podemos citar a ficocianina e a ficoeritrina. A ficocianina é comum a todas as cianobactérias e apresenta cor azul o que confere uma tonalidade azul-esverdeada a muitas cianobactérias e é encontrada somente nesse grupo, daí o nome clássico "algas verde-azuladas". A ficoeritrina apresenta cor vermelha e é responsável pela tonalidade avermelhada ou acastanhada de muitas cianobactérias (Stibert et al, 2019).

Figura 1: Imagens de cianobactérias sob microscopia ótica: A – *Aphanizomenon* sp. (amostra preservada em Lugol); B – *Dolichospermum* sp. (amostra preservada em Lugol); C – *Lyngbya* sp. (amostra preservada em Lugol) D - *Oscillatoria* sp. (amostra preservada em Lugol); E - *Microcystis* sp. (amostra sem preservação); F – *Microcystis* sp. (amostra preservada em Lugol e utilização de epifluorescência).



Fonte: Mabbub, M.

Denomina-se *bloom* ou floração, o fenômeno de crescimento acelerado de cianobactérias e espécies fitoplânctônicas eucariontes. Esse fenômeno é geralmente considerado como uma produção significativa de biomassa em um curto período de tempo, correlacionada com uma diminuição da diversidade do fitoplâncton (Merel et al, 2013; Frau, 2023).

Não há um consenso de qual a densidade fitoplanctônica pode ser denominada de floração. Diversos autores utilizam esse termo para denominar somente um evento qualitativo (interpretação visual, como uma camada ou espuma esverdeada na superfície da água) porém outros definem as florações como eventos quantitativos, relacionando à densidade do fitoplâncton ou com a concentração de pigmentos fotossintetizantes, determinada por análises laboratoriais ou imagens de satélite, podendo variar de 80.000 a 249.000 células/mL (Rocha et al, 2024) ou 41 a 69 µg/L de clorofila-a (MA et al, 2024). Em um recente trabalho de revisão sobre a ocorrência de florações de cianobactérias na América Latina, Aguilera e outros (2024), encontram 13 (treze) diferentes limites de abundância celular definindo eventos de floração, de 2.000 a 10.000.000 células/mL, o que, segundo os autores, dificulta a estimativa da ocorrência de floração.

Campos e outros (2024), em um trabalho sobre a ocorrência de cianobactérias associadas à produção de cianotoxinas no Brasil entre 1993 e 2021, identificaram 421 (quatrocentos e vinte e um) eventos de floração de cianobactérias. *Microcystis* e *Raphidiopsis* foram os gêneros mais frequentemente identificados (32 e 20% respectivamente), seguidos por *Planktotrix* (8%) e *Aphanizomenon* (7%). Os autores destacam o fato de que 80% dos eventos analisados foram encontrados em reservatórios. Esses ambientes, além de oferecerem condições favoráveis ao desenvolvimento de cianobactérias também são mais estudados e recebem mais atenção devido à sua importância no abastecimento público.

Geralmente, a formação de floração de cianobactérias é regulada por uma combinação de três fatores ambientais primários: temperatura, luminosidade e concentração de nutrientes (eutrofização).

A temperatura é um dos principais fatores ambientais que afetam os processos fisiológicos do fitoplâncton, incluindo cianobactérias, atuando em diversos estágios de crescimento e desenvolvimento dos organismos, como motilidade, reprodução, absorção de nutrientes e fotossíntese (Wells et al, 2015). Além disso, o aumento da temperatura atmosférica favorece a estabilidade da estratificação de lagos e conseqüentemente a proliferação de cianobactérias adaptadas à essas condições, como a presença de aerótopo em *Microcystis sp.* (Pearl; Huismam, 2008; Druga et al, 2021).

Godoy e outros (2023) avaliando a influência da temperatura na proliferação de cianobactérias em um lago eutrófico do Estado de São Paulo, Brasil, concluíram que em temperaturas de água mais elevadas (acima de 25,3 °C e classificadas como evento extremo), foram observadas maiores frequências de valores elevados para microcistina (87,5%), clorofila-a (70%) e cianobactérias (82,5%) em comparação com temperaturas mais frias (<19,6 °C), considerando os valores propostos pela legislação brasileira para águas recreativas.

Eutrofização é o enriquecimento das águas superficiais por nutrientes como o fósforo e o nitrogênio, podendo ocorrer de maneira natural ou devido à ação antrópica pelo despejo nos corpos hídricos de produtos resultantes de atividades industriais e agropecuárias, bem como esgoto doméstico. O excesso de nutrientes é um fator importante para aumentar a concentração de algas e cianobactérias em um ambiente (Lurling et al, 2018), acarretando muitas vezes na diminuição de outros grupos de organismos importantes e ao desequilíbrio ecológico desses ambientes (Silva et al, 2020).

Em 2003, a Agência de Proteção Ambiental Americana (EPA) organizou um evento onde discutiu-se a relação entre eutrofização e floração de algas nocivas, não somente cianobactérias (Heisler et al, 2008). Dentre as declarações de consenso oriundas das discussões estão: o aumento da poluição por incremento de nutrientes promove a degradação da qualidade da água e a persistência de algas tóxicas; a composição e não somente a quantidade de nutrientes presentes nos corpos hídricos afeta o crescimento e desenvolvimento de algas tóxicas, já que diferentes grupos apresentam necessidades nutricionais distintos; para que grandes florações sejam sustentadas, há a necessidade de entrada de nutrientes no ambiente; há a necessidade de melhoria em ferramentas para detecção precoce de florações; o gerenciamento da entrada de nutrientes no corpo hídrico pode controlar o desenvolvimento de florações de algas tóxicas.

Acuña-Alonso e outros (2020) em um estudo sobre três reservatórios espanhóis encontraram uma relação positiva entre a o nível de eutrofização dos reservatórios, avaliado pela concentração de nitrogênio e fósforo, e a presença de *Microcystis sp*, assim como a presença de microcistina, sendo o nitrogênio o nutriente limitante para o crescimento de *Microcystis sp*.

Figueiredo e outros (2016) em um estudo de longo prazo (15 anos) avaliaram a evolução do processo de eutrofização em um reservatório tropical urbano (Lagoa da Pampulha, Belo Horizonte, Brasil). Os autores constataram um processo contínuo de deterioração da qualidade da água, principalmente relacionado ao aumento dos níveis de nutrientes e biomassa de fitoplâncton, bem como à diminuição da transparência da água. O aumento da biomassa foi mais acentuado no grupo das cianobactérias, não só em densidade como em número de ocorrência de florações e persistência, o que acarretou também a diminuição da diversidade fitoplanctônica da lagoa. Ainda segundo os autores, o fósforo foi o principal nutriente determinante das florações e embora as concentrações de nitrogênio fossem muito altas neste sistema, elas não foram significativamente correlacionadas com a biomassa de fitoplâncton ou cianobactéria. Importante salientar que a Lagoa da Pampulha foi utilizada como manancial de abastecimento da região metropolitana de Belo Horizonte até o ano de 1981 e devido às consequências do processo de eutrofização citados acima perdeu seu papel de abastecimento público.

Estudos recentes indicam que o aumento da temperatura global aliado ao aporte de nutrientes para ambientes aquáticos têm aumentado a incidência de eventos de florações de cianobactérias (O'Neil et al, 2012; Kuczyńska-Kippen et al, 2024).

Li e outros (2022) concluíram que uma onda de calor em 2022 (com duração de 44 dias e 6,6°C acima da média histórica) aumentou a proliferação de cianobactérias no lago Taihu (China), um lago eutrófico raso com ocorrência histórica de florações, porém não com a mesma intensidade (biomassa de cianobactérias) encontrada nesse ano específico. Os autores atribuem a esse evento, não somente o aumento da temperatura, mas também o aumento no aporte de nutrientes oriundos de áreas de agricultura adjacentes (uso de fertilizantes).

## 2.2 Cianotoxinas

A proliferação excessiva de cianobactérias representa um problema global com efeitos nocivos para a saúde humana, para a economia e para os ecossistemas. Certas espécies de cianobactérias têm a capacidade de produzir metabólitos secundários que têm um grande efeito negativo nas células, tecidos e organismos, sendo esses compostos denominados cianotoxinas (Chorus; Welker, 2021). Outros metabólitos secundários produzidos pelas cianobactérias são a geosmina e o 2-metilisoborneol (MIB) (Watson et al, 2008). Apesar desses metabólitos não serem tóxicos, conferem gosto e odor à água comprometendo a sua qualidade, além de serem indicativos da presença de cianobactérias (Sotero-Martins et al, 2024).

Diversos estudos indicam que a produção de compostos secundários pelas cianobactérias está relacionada à proteção contra herbivoria. Porém, estudos recentes indicam que a produção desses compostos secundários pode estar relacionada à proteção celular contra oxidantes produzidos pelo processo fotossintético (Freitas et al, 2024).

O Sistema Guandu é a principal fonte de abastecimento de água para a região metropolitana do Rio de Janeiro, sendo composto pela Represa do Rio Guandu e pela Estação de Tratamento de Água (ETA Guandu), que trata a água captada da represa. No entanto, desde a década de 2000 com intensificação nos anos de 2020 e 2021, a presença de geosmina e 2-metilisoborneol (MIB) vem causando problemas de odor e sabor na água tratada distribuída à população e gerando preocupações quanto à sua segurança para consumo humano, já que, apesar de a geosmina e o MIB não serem tóxicos, são indicativos da presença de cianobactérias na água (Sotero-Martins et al, 2024).

As cianotoxinas em água para abastecimento é um problema de saúde pública que tem preocupado autoridades e especialistas, podendo trazer sérias consequências para a saúde humana, como irritação na pele e mucosas, problemas gastrointestinais e até mesmo casos mais graves, como danos no fígado e sistema nervoso, dependendo do nível de exposição.

Com base em sua estrutura química, as cianotoxinas podem ser classificadas como: peptídeos cíclicos, de origem proteica, alcalóides e lipopolissacarídeos (LPS)

(Molica; Azevedo, 2009; Cepoy, 2024). Podem ser classificadas também de acordo com o seu modo de ação e efeito em mamíferos como hepatotóxica, neurotóxica e dermatotóxica (Chorus; Welker, 2021).

As hepatotoxinas atuam como potentes inibidores das fosfatases de serina e treonina eucarióticas, servindo como promotoras de tumores no fígado, processos de apoptose e morte celular. Sendo responsáveis, portanto, por sérios danos hepáticos, o que pode ocasionar a morte por insuficiência hepática (Azevedo et al, 2002). Neste grupo estão incluídas as microcistinas, cilindrospermopsinas e nodularinas, produzidas, dentre outros, pelos gêneros *Microcystis*, *Anabaena*, *Planktotrix*, *Aphanocapsa* e *Raphidiopsis* (Metcalf; Codd, 2020).

As neurotoxinas, anatoxina-a, homoanatoxina-a, anatoxina-a(s) e saxitoxina, apresentam diferentes efeitos bioquímicos nas células nervosas, podendo atuar assemelhando-se à acetilcolina (induzindo contração muscular), como inibidor da colinesterase (promovendo a continuidade da contração muscular) (RODGERS et al., 2018) ou também bloqueando os canais de sódio (inibindo a condução do impulso nervoso e induzindo a paralisia muscular) (FIORI et al., 2020). Os principais gêneros conhecidos produtores de neurotoxinas são: *Anabaena*, *Aphanizomenon*, *Oscillatoria*, *Trichodesmium*, *Lyngbya* e *Cylindrospermopsis* (Chorus e Welker, 2021).

As citotoxinas são representadas principalmente pela cilindrospermopsina. Essa cianotoxina atua na inibição da síntese protéica e do DNA, podendo acarretar a desestruturação e necrose do fígado, danos em células renais, cardíacas, pulmonares e também da mucosa gástrica. Os principais gêneros produtores de cilindrospermopsina são *Raphidiopsis*, *Aphanizomenon*, *Chrysoosporum*, *Oscillatoria* (Chorus e Welker, 2021).

Os principais gêneros relatados como produtores de cianotoxinas no Brasil são: *Microcystis*, *Raphidiopsis*, *Planktothrix*, *Aphanizomenon*, *Sphaerospermopsis* e *Dolichospermum* (Jardim; Azevedo, 2006; Buratti et al, 2017; Campos et al, 2024).

Uma visão geral das cianotoxinas com importância à saúde humana e que possuem como rota de exposição o contato com água de abastecimento está apresentada na Tabela 1.

Tabela 1: Gêneros de cianobactérias produtoras de toxinas (amostras ambientais), suas toxinas específicas e os tecidos/órgãos afetados em humanos e valores máximos recomendados (VMR), de acordo com Chorus e Welker (2021).

Toxinas	Gêneros produtores	Órgãos e Tecidos Comprometidos	VMR <sup>(a)</sup>
<b>Microcistinas</b>	<i>Microcystis</i> <i>Dolichospermum</i> <i>Planktothrix</i>	Fígado (hepatotoxina)	1,0 µg/L
<b>Nodularina</b>	<i>Nodularia</i>	Fígado (hepatotoxina)	-
<b>Cilindrospermopsina</b>	<i>Raphidiopsis</i> <i>Aphanizomenon</i> <i>Chrysochlorum</i> <i>Oscillatoria</i>	Rins e Fígado (citotoxina)	0,7 µg/L
<b>Anatoxina -a</b> <b>Homoanatoxina-a</b>	<i>Phormidium</i> <i>Microleus</i> <i>Dolichospermum</i> <i>Aphanizomenon</i> <i>Cuspidothrix</i> <i>Cylindrospermum</i> <i>Arthrospira</i> <i>Anabaena</i>	Sistema nervoso central e cardiovascular (neurotoxina)	30,0 µg/L (anatoxina-a)
<b>Anatoxina-S</b>	<i>Dolichospermum</i>	Sistema nervoso periférico (neurotoxina)	-
<b>Saxitoxina</b>	<i>Dolichospermum</i> <i>Planktothrix</i> <i>Aphanizomenon</i> <i>Raphidiopsis</i> <i>Microseira</i>	Sistema nervoso central (neurotoxina)	3,0 µg/L

(a) Concentrações derivadas de estudo com animais, com exceção da Saxitoxina. Não há estudos suficientes para derivação de concentrações de Homoanatoxina-a e Anatoxina-S.

Fonte: Chorus e Welker (2021).

No Brasil, o primeiro relato sobre a ocorrência de microcistina produzida por *Microcystis aeruginosa* foi feito por Azevedo e outros (1994) a partir de uma amostra ambiental oriunda da Lagoa das Garças, São Paulo. Com relação à intoxicação por cianotoxinas, o primeiro caso confirmado ocorreu em 1986 na cidade de Caruaru, Pernambuco, Brasil (Azevedo et al; 2002). Nesse episódio, 131 pacientes em tratamento em uma clínica de hemodiálise apresentaram sintomas como alterações visuais e distúrbios gastrointestinais, sendo que 100 desses pacientes desenvolveram insuficiência hepática aguda com aproximadamente 60 óbitos relatados. Análises no sangue e tecidos das vítimas indicaram a presença de microcistina assim como nos filtros do sistema de tratamento da clínica foram detectadas microcistina e cilindrospermopsina. Posteriormente foi verificado que no manancial utilizado para

abastecimento havia a ocorrência sistemática de florações de cianobactéria e que houve falhas na não identificação da floração, assim como falhas durante o tratamento e distribuição da água para a clínica de hemodiálise. Em decorrência desse evento, no ano de 2000 o monitoramento de cianobactérias e cianotoxinas na água de abastecimento passou a ser obrigatório e regulamentado pelo Ministério da Saúde (MS, 2000).

Em 1988 na cidade de Paulo Afonso, Bahia, Brasil (população de 212.500 habitantes), foram notificados cerca de 2.000 casos de gastroenterite e 88 mortes registradas e associadas a esse quadro. A partir da caracterização da epidemia e do modo de transmissão (consumo de água), hipóteses sobre o possível agente etiológico foram postuladas, entre elas a presença de cianobactérias na água de abastecimento público, que era realizado pelo reservatório de Itaparica. Foram detectadas a presença das cianobactérias (*Anabaena* e *Microcystis*) na água bruta, com valores 3,7 e 32,5 vezes o valor estabelecido como aceitável pela Organização Mundial da Saúde (OMS). Não foram realizadas análises de cianotoxinas na água e nem nos tecidos das vítimas dos óbitos, sendo esse caso relatado somente como suspeito e não confirmado de intoxicação por cianotoxinas.

Na Ásia, em países como Sri Lanka e China diversos estudos têm correlacionado a presença de cianobactérias (*Microcystis* e *Cylindrospermopsis*) e cianotoxinas presentes em águas de abastecimento público à casos de doenças renais crônicas (Kulasooriya, 2017).

Nos Estados Unidos, duas cidades de Ohio (Toledo e Carroll Township) tiveram a distribuição de água potável interrompida após detecção de concentrações acima das recomendadas pela OMS para microcistina na água da saída da estação de tratamento (He et al, 2016).

### 2.3 Cianobactérias e Cianotoxinas na água de abastecimento publico

Os mananciais utilizados para captação de água para abastecimento público (água bruta), podem ser classificados em dois tipos: lóticos e lênticos.

Ambientes lóticos e lênticos apresentam características intrínsecas que fazem com que apresentem probabilidades de ocorrência de floração diferenciada (risco associado), sendo menor nos ambientes lóticos e maior nos lênticos.

Mananciais lóticos são aqueles com velocidade de corrente mais elevada e curto tempo de residência da água, onde as condições não são tão favoráveis a formação de florações de cianobactérias. A ocorrência de florações nesses ambientes provavelmente está correlacionada a fontes externas como represamento à montante (usinas hidrelétricas) e despejo de efluentes de lagoas de tratamento de esgoto e tanques de piscicultura. São classificados como lóticos os rios, riachos, arroios e córregos.

Mananciais lênticos são aqueles com maior probabilidade de ocorrência de cianobactérias, provavelmente por apresentarem as condições ideais para o seu desenvolvimento: tempo de retenção da água elevado, baixa velocidade de correnteza e acúmulo de nutrientes como nitrogênio e fósforo. São classificados como lênticos as represas, reservatórios, lagos e barragens.

O risco da ocorrência de cianobactérias com a consequente presença de cianotoxinas em níveis acima dos recomendados é uma preocupação real e urgente. Apesar de os ambientes lênticos, como reservatórios eutrofizados, oferecerem condições mais apropriadas para a proliferação de cianobactérias, há registros de florações de cianobactérias em reservatórios não eutrofizados e ambientes lóticos, todos potencialmente utilizados para abastecimento público (Menezes et al, 2015; Barros et al, 2019).

Sonobe e outros (2019) avaliaram diversas variáveis de qualidade da água, incluindo cianobactérias e cianotoxinas (microcistina), em sete reservatórios utilizados para captação de água bruta destinada ao abastecimento público no Estado de São Paulo entre os anos de 2011 e 2015: Jaguari, Billings, Cascata, Cabuçu, Itupararanga, Guarapiranga e Rio Jundiaí. Os reservatórios Billings, Itupararanga, Cascata e Guarapiranga apresentaram as maiores densidades de cianobactérias com valores de 277.132 cel/mL, 169.671 cel/mL, 177.996 cel/mL e 50.247 cel/mL, respectivamente. Foram observadas concentrações de microcistina acima dos limites preconizados pelo Ministério da saúde (1µg/L) nas represas Billings (22,4µg/L), Cascata (10,9 µg/L) e Jaguari (3,0 µg/L). Os autores enfatizam que, embora os dados

sejam referentes a água bruta, existe a possibilidade de intoxicação da população caso o sistema de tratamento de água não seja eficaz o suficiente para a remoção dessa substância. Tal observação é importante devido ao fato de que, somente a Represa Billings é a responsável pelo abastecimento de 7,5 milhões de pessoas em mais de 40 municípios.

Benati e outros (2005) relataram, em 2004, a ocorrência de floração da cianobactéria *Planktothrix mougeotii* na água bruta do Rio Guaíba que abastecia três estações de tratamento de água na cidade de Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil. Na ocasião, a densidade máxima da floração foi de 250.000 cel/mL. Foram realizadas também análise de cianotoxinas, sendo detectadas microcistinas e saxitoxina na água bruta e tratada, com maiores concentrações na primeira comparada à segunda, e em nenhuma amostra o valor excedeu o preconizado pelo Ministério da Saúde (1 µg/L para microcistina e sem valores referência para saxitoxina à época). De acordo com os autores, os resultados indicaram que o processo de tratamento de água foi eficiente para a remoção das baixas concentrações de cianotoxinas presentes na água bruta.

Em Minas Gerais, desde o início do programa de monitoramento para detecção de cianobactérias e cianotoxinas imputado pela legislação vigente à época até o ano de 2023, diversos eventos de floração de cianobactérias em sistemas de abastecimento público foram relatados.

Jardim e outros (2014) descrevem eventos periódicos e constantes (2005 a 2012) de florações de cianobactérias no Rio Doce. Os táxons identificados como responsáveis por esses eventos foram: *Raphidiopsis raciborskii* (2005 e 2009), *Aphanocapsa* sp (2007), e *Dolichospermum planctonicum* e *D. solitarium* (2010, 2011 e 2012). Nos anos de 2005 e 2009 as cepas de *Raphidiopsis raciborskii* apresentaram-se tóxicas.

No de 1997, nos sistemas de abastecimento das cidades de Três Marias (Represa de Três Marias) e de Fama (Represa de Furnas) ocorreram florações de *Microcystis wesenbergii* e *Microcystis aeruginosa*, respectivamente. Em ambos os casos não foram detectadas presença de cianotoxinas nas amostras de água dos reservatórios (Jardim, 1999).

Na cidade de Cataguases, abastecida pelo Rio Pomba, ocorreram florações da cianobactéria *Raphidiopsis raciborskii* em 2014 (aproximadamente 50.000 cel/mL) e

2016 (aproximadamente 30.000 cel/mL). Na primeira floração foi detectada a presença de microcistina, porém abaixo do valor máximo recomendado (VMR) no padrão de potabilidade (MS). Na época a clínica de hemodiálise da cidade foi abastecida com caminhão pipa e água tratada oriunda de poço artesiano. A segunda floração não se apresentou tóxica.

Quando os sistemas de monitoramento alertam sobre o aumento nas densidades de cianobactérias e concentrações de cianotoxinas, mecanismos de operação e tratamento eficazes são imprescindíveis para proteger o sistema de abastecimento e garantir a qualidade de água.

Antes da água ser distribuída à população ela deve passar por um processo de tratamento nas Estações de Tratamento de Água (ETA). É o local onde deve ocorrer a remoção de compostos químicos e agentes biológicos, garantindo a qualidade e segurança da água para abastecimento público.

O processo de tratamento é dividido em diversas etapas, que garantem a qualidade da água fornecida à população. No tratamento convencional com ciclo completo, a primeira etapa, que não é necessariamente obrigatória, é a pré-oxidação, que tem como objetivo oxidar materiais orgânicos e metais presentes, a fim de facilitar sua remoção em processos posteriores. Na coagulação, substâncias químicas são adicionadas para unir as partículas presentes na água, facilitando sua remoção na etapa seguinte, a floculação. Na floculação, a água é misturada lentamente para formar agregados maiores chamados flocos, que irão sedimentar na etapa de decantação. Nessa etapa, os flocos são separados e retirados. A água então passa por uma filtração, que remove partículas menores e microrganismos presentes. Após a filtração, é adicionado cloro para promover a desinfecção. Na última etapa, a água é armazenada em reservatórios e distribuída para a população por meio de redes de distribuição.

Uma etapa crítica em Estações de Tratamento de Água abastecidas com água onde há presença de cianobactérias é a pré-cloração: nessa etapa, o agente oxidante lisa as células das cianobactérias solubilizando as cianotoxinas até então internalizadas. Além disso, as estações de tratamento por ciclo completo são capazes de remover células intactas de cianobactérias, porém ineficientes na remoção de cianotoxinas dissolvidas (Figueiredo, 2016; He et al, 2016).

## 2.4 Métodos para detecção e quantificação de cianobactérias

Inúmeras ferramentas de monitoramento estão disponíveis para alertar as partes interessadas sobre a ocorrência de cianobactérias: visual (presença de nata verde na superfície da água, que também pode ser indicativo da floração de outros grupos fitoplanctônicos), direta (identificando e quantificando esses organismos, seja em células/ml ou biomassa, por análise microscópica) e indireta/qualitativa (concentração de clorofila-a e ATP).

Os valores considerados (limites de alerta: baixo, médio, alto) para os parâmetros monitorados devem servir como diagnóstico, de maneira que os responsáveis pelo abastecimento público iniciem o monitoramento de cianotoxinas com tratamento adicional, se pertinente, nas estações de tratamento de água (Chorus; Welker, 2021). A capacidade de monitorar cianobactérias com rapidez e precisão, identificando corretamente o limiar de um nível de alerta é um fator importantíssimo na implementação de estratégias para gerenciamento dos riscos associados.

A escolha da ferramenta metodológica utilizada para o monitoramento de cianobactérias deve levar em consideração a sensibilidade do método (limites de quantificação), assim como tempo de análise e custo.

### 2.4.1 Monitoramento visual

O monitoramento mais simples de um corpo hídrico é a por meio da alteração de suas características visuais. Alterações na turbidez, cor e formação de natas e/ou tapetes esverdeados na superfície podem ser indicativos de florações (Chorus; Welker, 2021). Porém, o monitoramento visual individualizado não pode diagnosticar, com segurança, que a alteração dos parâmetros citados, principalmente a formação de nata esverdeada, é devido à presença de cianobactérias. Além disso, nem todas as cianobactérias formam natas e/ou tapetes esverdeados na superfície da água. Alguns gêneros como *Synechococcus* e *Cyanobium* (Li et al, 2024) e *Raphidiopsis* (Fucich; Chen, 2020) formam florações dispersas na coluna de água entre as camadas estratificadas de reservatórios, dificultando a identificação de uma possível floração.

#### 2.4.2 Monitoramento indireto

O objetivo do monitoramento indireto é quantificar a atividade biológica na água, por meio por exemplo, da concentração de adenosina trifosfato (ATP) ou clorofila-a. A simplicidade e o baixo custo dessas metodologias permitem que elas sejam usadas frequentemente em monitoramento de rotina.

O ATP é uma molécula encontrada em todas as células vivas. É um metabólito central que desempenha papéis fundamentais como molécula de transferência de energia, doador de fosfato e molécula de sinalização no interior das células, sendo parte integrante de muitos processos metabólicos como armazenamento, transporte, reprodução e liberação de energia de uma célula (Tantama; Yellen, 2014). Em uma comunidade fitoplanctônica o ATP representa a biomassa viável total, apesar de valores de ATP variar entre as espécies. Kibuye e outros (2024) avaliando o crescimento de cianobactérias em laboratório e em condições naturais, encontram uma forte correlação entre a concentração de ATP total e o número de células de cianobactérias (em monocultura) e média correlação com o número de cianobactérias em amostras naturais. Na ocorrência de floração, os autores identificaram variações durante as etapas de proliferação, com maiores concentrações de ATP no início da floração devido ao rápido crescimento celular.

Porém, para que o ATP seja usado como um indicador de alerta precoce para florações de algas, as contribuições dos outros grupos fitoplanctônicos e demais organismos presentes para a estimativa da concentração total devem ser conhecidas (Greenstein; Wert, 2019). Sendo o ATP encontrado em todos os organismos presente no ambiente aquático e não somente em algas, um corpo d'água sempre provocará uma resposta de atividade celular (Hanssem et al, 2019).

A clorofila é um componente essencial dos sistemas autotróficos, sendo a responsável pela absorção da luz durante os processos fotossintéticos (Stibert et al, 2019). Por estar presente em todos os organismos fitoplanctônicos e ser um dos principais responsáveis pela fotossíntese, têm sido utilizada para estimar a biomassa do fitoplâncton e inferir sobre a qualidade da água (Ergun et al, 2004).

Embora a concentração de clorofila-a contida no fitoplâncton possa variar em função da disponibilidade de luz, nutrientes e grupo específico, a clorofila-a é uma

medida amplamente utilizada e aceita como o total da biomassa fitoplanctônica (Chorus; Welker, 2021). As cianobactérias possuem clorofila-a, além de ficocianina e ficoeritrina como pigmentos fotossintetizantes (Saiani et al, 2018).

Diversos trabalhos buscaram correlacionar a densidade de cianobactérias à concentração de clorofila-a. Os resultados encontrados são diversos, variando desde baixa ou não significativa correlação (Marino, 2017) a alta correlação (Veerman et al, 2024). Marino (2017), em um estudo em sistemas de abastecimento do Estado de São Paulo, não encontrou correlações positivas entre densidade de cianobactéria e concentração de clorofila-a. Segundo a autora, a baixa correlação encontrada deve-se ao fato de não ter sido considerada a quantificação dos outros grupos do fitoplâncton, não se sabendo a contribuição das cianobactérias para o resultado da concentração de clorofila-a. Em um trabalho relacionando concentração de clorofila-a e biomassa fitoplanctônica, Du e outros (2014) descreveram uma correlação positiva entre as variáveis. Porém essa correlação diminui com o aumento da biodiversidade na amostra analisada. Jardim e outros (2014), analisando diferentes parâmetros relacionados às florações de cianobactéria na água do Rio Doce, descreveram uma alta correlação entre densidade de cianobactérias e concentração de clorofila-a, podendo ser este um parâmetro indicador para florações, nesse caso. Rousso e outros (2022) em um estudo com culturas monoalgal e mistas, descrevem uma correlação positiva entre o número de células de cianobactérias e a concentração de clorofila-a, sendo que essa correlação é variável em função da morfologia, tamanho celular e fase de crescimento.

#### 2.4.3 Monitoramento direto

A identificação e contagem de células de cianobactérias por microscopia óptica é uma técnica convencional e amplamente difundida, empregada por empresas de abastecimento e agências de monitoramento. É considerada técnica padrão ouro para o monitoramento de cianobactérias. As espécies são identificadas, sob ampliação, por sua morfologia e características taxonômicas, e contadas seguindo protocolos estabelecidos de contagem de algas usando câmaras de contagem (APHA, 2021).

A identificação e contagem microscópica de células, filamentos ou colônias de cianobactérias tem a vantagem de avaliar diretamente a abundância de gêneros/espécies potencialmente tóxicas. Apesar de precisa, a análise microscópica é bastante demorada, tendo em vista a acurácia analítica necessária para diferenciar todos os gêneros/espécies presentes na amostra (Chorus; Welkwer, 2021). Devido à especialidade técnica envolvida na contagem e identificação dos táxons, as amostras são geralmente enviadas a laboratórios distantes, aumentando o tempo entre coleta, análise e emissão do resultado. Portanto, os resultados podem não mais refletir as concentrações atuais de cianobactérias no manancial.

O monitoramento direto de cianobactérias também pode ser realizado utilizando-se a métodos moleculares a partir do sequenciamento o RNA ribossômico 16S (rRNA) amplificado usando reação em cadeia da polimerase (PCR) do DNA genômico. A utilização de ferramentas moleculares tem a vantagem de detectar todas as espécies em umas amostras, sendo mais precisas que a identificação e contagem microscópica. Porém o tempo de resposta, assim como na microscopia, é alto e fornece apenas a abundância relativa das células e não a densidade exata.

Zang e outros (2023) compararam a identificação de fitoplâncton presente em doze grandes rios dos Estados Unidos usando as técnicas de qPCR e microscopia. A correlação entre os resultados obtidos por qPCR e microscopia foi alta e significativa ( $r^2=0,836$ ,  $p<0,001$ ). Em outro trabalho os mesmos autores correlacionaram a quantificação de fitoplâncton por qPCR e concentração de clorofila-a, tendo também um valor significativo de correlação ( $r^2=0,544$ ,  $p <0,001$ ). Para os autores, a caracterização molecular e taxonômica do fitoplâncton por meio da técnica de qPCR permite uma avaliação equivalente, porém mais detalhada da comunidade fitoplanctônica e do estado trófico do corpo d'água.

Pacheco e outros (2016) em uma revisão sobre a técnica do qPCR como indicador do risco de cianotoxinas, destacam como vantagem desse método a alta sensibilidade, sendo possível a detecção de cianobactérias tóxicas mesmo em baixas concentrações. Como limitações os autores destacam que o método informa somente o potencial tóxico das cianobactérias e não a concentração real da concentração de cianotoxinas presente na amostra.

## 2.5 Níveis de alerta para o monitoramento de cianobactérias

Em decorrências dos potenciais efeitos à saúde humana ocasionados pela exposição à cianotoxinas por meio da água de abastecimento a Organização Mundial da Saúde (OMS) publicou, em 1999, a primeira edição de *Toxic Cyanobacteria in Water* (Chorus; Bartran, 1999), um guia orientativo correlacionando, em diversos níveis de alerta, as concentrações de cianotoxinas à densidade de cianobactérias e concentração de clorofila-a. Cada nível de alerta está associado a um conjunto de ações que abrange amostragem e análise da água, medidas operacionais, consulta e comunicado às autoridades competentes, o que auxilia no gerenciamento de riscos e implementação de medidas de proteção à saúde pública. Os níveis de alerta propostos são baseados na contagem de células de cianobactérias (ou seu biovolume) e na concentração de clorofila-a.

Em 2021, *Toxic Cyanobacteria in Water* teve a sua segunda edição publicada (Chorus; Welker, 2021), com revisões importantes para os níveis de exposição/alerta para cianobactérias, clorofila-a e cianotoxinas. Os autores enfatizam que os valores que definem os níveis de alerta são orientativos e que cada país ou região, de acordo com as características do manancial de abastecimento e capacidade operacional podem adaptar tanto os valores referência quanto as ações operacionais às suas características locais.

O fluxograma proposto para os níveis de alerta utiliza três níveis de concentrações limites para orientar a avaliação de uma floração de cianobactérias potencialmente tóxicas, com ações e respostas relativas à cada nível. A sequência dos níveis de alerta baseia-se na progressão, desde a detecção inicial de cianobactérias no nível de vigilância até o aumento de sua concentração/biomassa e possível presença de cianotoxinas no nível de alerta 1. A partir desse nível, ações operacionais devem ser implementadas a fim de se garantir a eficiência do tratamento na remoção de células de cianobactérias e cianotoxinas. Para o nível de alerta 2, os valores para concentração/biomassa de cianobactérias são elevados de modo que a eficiência operacional e o tempo para implantação de medidas eficazes podem ser insuficientes, o que justifica a utilização de outra fonte de água bruta ou distribuição de água potável oriunda de outro manancial. As ações que acompanham cada nível abrangem diferentes tipos de respostas, tais como amostras e testes adicionais,

gerenciamento operacional, consulta das autoridades de saúde e repasse da informação ao público através de comunicados de imprensa.

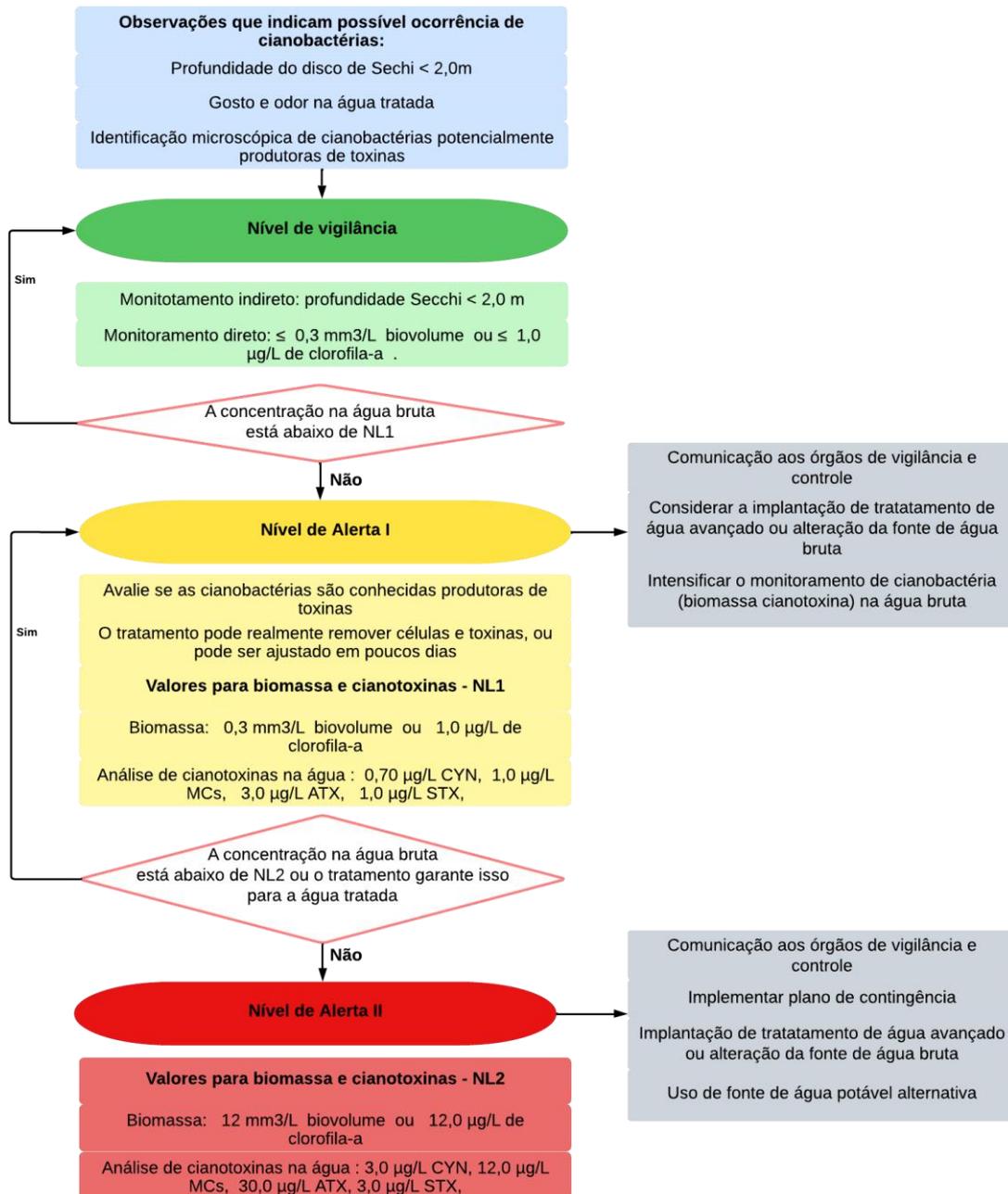
A Figura 2 indica os níveis de exposição/alerta para cianobactérias e clorofila-a recomendados pela OMS que devem desencadear ações para o gerenciamento de riscos.

Prever com precisão as florações de cianobactérias em fontes de água para abastecimento é um grande desafio. Sistemas de monitoramento de alerta precisam considerar vários aspectos de uma floração de cianobactérias: se uma floração está ocorrendo no manancial (rio ou reservatório), se ela pode ser transportada para a estação de tratamento de água, se há presença de cianotoxinas e em qual concentração.

Husein Almuhtaram e outros (2024), em uma recente revisão sobre ferramentas para detecção de cianobactérias, propõem três níveis subsequentes de monitoramento, sendo cada nível composto por diversas técnicas analíticas que poderão ser implantadas de acordo com a disponibilidade financeira e analítica da parte interessada, levando-se também em consideração as vantagens e limitações de cada uma delas.

As ferramentas de primeiro nível são aquelas onde há a detecção de atividade biológica, como a visualização de natas e espumas indicando a ocorrência de florações, avaliação da alteração da concentração de ATP na água, indicando aumento da biomassa fitoplanctônica, e a quantificação de pigmentos fotossintetizantes como a clorofila-a. Para os autores essas seriam ferramentas para uma vigilância contínua da qualidade da água superficial. Sendo de baixo custo de implantação e acompanhamento, podem ser utilizadas para estabelecer limites de alerta usados para acionar o monitoramento das ferramentas de segundo nível para confirmar a presença de cianobactérias.

Figura 2: Fluxograma para os níveis de alerta no monitoramento de cianobactérias, traduzido do proposto por Chorus e Welker (2021).



Fonte: Chorus e Welker (2021).

As ferramentas de segundo nível são aquelas em que, após sinalização indicativa de ocorrência de floração de cianobactérias pelas ferramentas de primeiro nível, são utilizadas para confirmar a presença desses organismos, tanto em número (densidade) quanto em espécie/gênero. As ferramentas de segundo nível, segundo

os autores, são a identificação e quantificação das cianobactérias por microscopia, concentração de ficocianina (monitoramento por sondas *in loco* ou indireta via imagem de satélite) e métodos moleculares de detecção, como o PCR. O monitoramento pela concentração de ficocianina, apesar de se correlacionar positivamente com a concentração de cianobactérias, não fornece as espécies/gêneros que estão presentes naquela floração.

Após a detecção de eventos biológicos/floração no primeiro nível e a confirmação da presença de cianobactérias no segundo nível, o objetivo do monitoramento do terceiro nível é confirmar se as espécies de cianobactérias detectadas produzem cianotoxinas. As principais ferramentas utilizadas para análise quantitativa das concentrações de cianotoxinas na água são as análises imunoenzimáticas (ELISA) e análise de cromatografia líquida associada a espectrometria de massa (LCMS).

Ainda segundo Husein Almuhtaram e outros (2024), um sistema eficiente de alerta precoce precisa incluir uma combinação de ferramentas de monitoramento nos três níveis, pois nenhuma ferramenta pode fornecer informações sobre todos os aspectos importantes de uma floração de cianobactérias.

## 2.6 Padrão de potabilidade brasileiro

No Brasil, desde 1977, é de responsabilidade do Ministério da Saúde o estabelecimento de normas e padrões de potabilidade a serem seguidos a fim de minimizar os riscos à saúde pública associados ao consumo de água. O Ministério da Saúde preconiza o monitoramento de cianobactérias em mananciais superficiais utilizados para abastecimento público a fim de minimizar os riscos associados à ingestão de cianotoxinas pela população atendida.

A primeira portaria de potabilidade foi publicada em 1977 (PRT BSB n.º 56/1977), sendo seguida por seis atualizações, sendo a última e ainda vigente, a Portaria GM/MS n.º 888/2021. Porém, a obrigatoriedade do monitoramento de cianobactérias e os valores máximos permitidos para a concentração de cianotoxinas na água bruta e tratada foi incluída somente em 2000, por meio da homologação da Portaria 1469/2000.

De acordo com a Portaria 1469/2000, o monitoramento de cianobactérias no ponto de captação de água (água bruta) deveria ser realizado na frequência mensal quando a densidade de cianobactérias fosse inferior a 10.000 células/mL e semanal se superior a esse valor. Caso a densidade de cianobactérias fosse superior a 20.000cel/mL ( $2\text{mm}^3$  /L de biovolume) o monitoramento deveria se estender à água tratada (saída da estação de tratamento) e nas entradas (hidrômetros) das clínicas de hemodiálise e indústrias de injetáveis e o monitoramento para detecção de cianotoxinas deveria ser iniciado. Como à época não existia o estabelecimento de especificações em normas nacionais ou internacionais para valores seguros de concentração de cianotoxinas (exceção para microcistina,  $1,0 \mu\text{g/L}$ ) quando a densidade de cianobactéria ultrapassasse 20.000 cel/mL era preconizado a comprovação de toxicidade por bioensaios em camundongos. A única cianotoxina que constava como obrigatória para detecção e quantificação era a microcistina, com valor máximo permitido de  $1,0 \mu\text{g/L}$ . A detecção de saxitoxina e cilindrospermopsina era somente recomendada, com valores máximos definidos de  $3,0 \mu\text{g/L}$  e  $15,0 \mu\text{g/L}$ , respectivamente.

Em 2004 a Portaria 1469/2000 foi revisada, sendo substituída pela Portaria 518/2004 e pela PRT GM/MS n.º 2.914/2011 em 2011. Em 2017 a Portaria 2914/2011 foi inserida no Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS n.º 5/2017, porém sem alteração do seu texto normativo. Em maio de 2021 foi instituída a nova e atual portaria de potabilidade, Portaria GM/MS 888/2021.

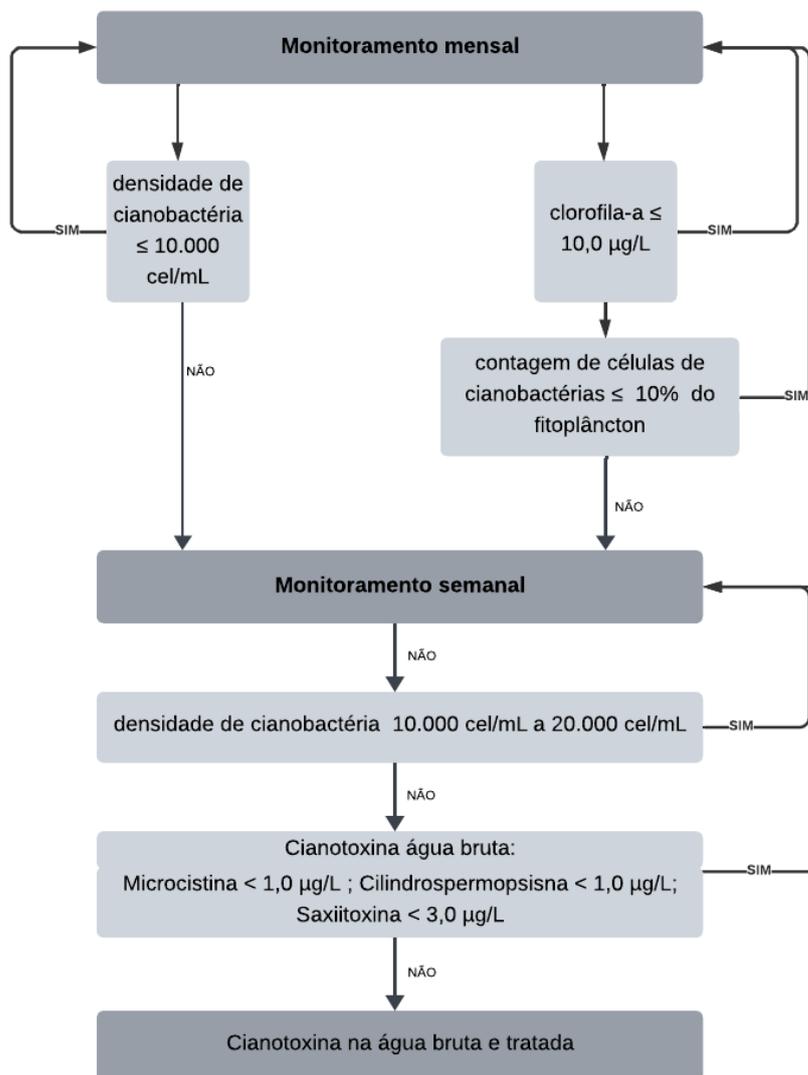
A Portaria 2914/2011 manteve a frequência de monitoramento e densidade de cianobactérias, mas incorporou a obrigatoriedade da detecção e quantificação de saxitoxina, com valor máximo permitido de  $3,0 \mu\text{g/L}$ . Manteve a recomendação para detecção de cilindrospermopsina, com valor máximo permitido de  $1,0 \mu\text{g/L}$ , e incluiu a recomendação da detecção de anatoxina-a, porém não definiu valores máximos recomendados.

Até a Portaria 2914/2011 o monitoramento de cianobactérias deveria ser realizado exclusivamente por meio de metodologias para identificação e contagem do número de células de cianobactérias. Com a publicação da Portaria GM/MS 888/2021, a determinação da concentração de clorofila-a na água bruta passa a ser permitida, em complementação ao monitoramento pela quantificação do número de células de cianobactérias. O valor limite estabelecido para a concentração de clorofila-a é  $10 \mu\text{g/L}$  e após esse valor o monitoramento deve ser realizado por identificação e

contagem do número celular. Não houve alteração com relação à frequência do monitoramento. A detecção e quantificação de cilindrospermopsina passa a ser obrigatória e a detecção de anatoxina-a deixa de ser recomendada.

Na A Figura 3 está representado o fluxograma de monitoramento de cianobactérias de acordo com a Portaria GM/MS 888/2021.

Figura 3: Fluxograma de monitoramento de cianobactérias em sistema de abastecimento de água potável. Adaptado de Ministério da Saúde (2021).



Fonte: Ministério da Saúde (MS, 2021).

As revisões das portarias de potabilidade brasileiras foram orientadas pela publicação de diversas diretrizes e normas internacionais, incorporando novos

conceitos com relação à interpretação de parâmetros quando da avaliação da qualidade da água (Chorus e Bartran, 1999; Chorus e Welker, 2021).

De acordo com a Portaria GM/MS 888/2021, o controle da qualidade da água para consumo humano deve ser exercido pelo responsável do sistema de abastecimento, enquanto a vigilância da qualidade da água (verificação do atendimento aos padrões estabelecidos) deve ser exercida pela autoridade de saúde pública.

A Companhia de Saneamento de Minas Gerais (Copasa) é a empresa responsável pela gestão e prestação de serviços de abastecimento de água e tratamento de esgoto no estado de Minas Gerais, atendendo 75% dos municípios do Estado. É a responsável pelo tratamento de água em 638 municípios, com impacto direto em 11,8 milhões de habitantes e tratamento de esgoto em 309 municípios impactando 8,6 milhões de habitantes. (COPASA, 2024). Para os municípios atendidos, ela é a responsável pelo controle de qualidade da água distribuída à população.

O Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM) é um órgão do Governo do Estado de Minas Gerais responsável pela gestão dos recursos hídricos no estado. Criado em 1998, o Instituto tem como objetivo principal promover a gestão integrada e sustentável das águas em todo o território mineiro. Entre suas competências destacam-se: a elaboração de planos e programas de recursos hídricos, a outorga de direitos de uso da água, a fiscalização e monitoramento dos recursos hídricos. No que se refere o monitoramento, o órgão possui um programa denominado “Água de Minas” com ampla rede de monitoramento para parâmetros físico, químicos e biológicos, incluindo cianobactérias e clorofila-a. Os resultados são compilados em relatórios e assim como os dados primários utilizados neste trabalho estão disponíveis para consulta pública (IGAM, 2024).

Pelos dados apresentados fica evidente a importância de se determinar valores para concentração de clorofila-a que podem ser utilizados, principalmente em nível de vigilância, como indicadores de florações de cianobactérias em água para abastecimento público.

## 3 OBJETIVOS

### 3.1 Objetivo Geral

Construção de uma ferramenta fácil e de rápida utilização para tomada de decisões, utilizando uma correlação entre a densidade de cianobactérias e concentração de clorofila-a em amostras de água bruta em mananciais superficiais como pontos de captação de água para consumo humano, onde há o predomínio de cianobactérias.

### 3.2 Objetivos específicos

- a) Avaliar a potencial correlação entre os dados de concentrações de clorofila-a e as densidades de cianobactérias nos dados disponibilizados pela Copasa e pelo IGAM (Instituto Mineiro de Gestão das Águas) referentes a 20 anos de monitoramento de mananciais superficiais (2000 a 2020).
- b) Caso se determine uma correlação positiva entre esses parâmetros, determinar concentrações limites de clorofila-a (por meio de análises de regressão) que podem ser utilizados como um nível de alerta da qualidade da água distribuída para abastecimento público;
- c) Verificar se as concentrações de clorofila-a estipuladas pela OMS e MS aplicam-se de maneira segura aos mananciais e reservatórios utilizados pela Copasa ou para outros usos (dados do IGAM).
- d) Construção de modelos onde valores referenciais de clorofila-a correlacionam-se a densidades de cianobactérias, podendo ser utilizados como ferramentas de monitoramento, a nível de vigilância, em mananciais utilizados para abastecimento.
- e) Desenvolvimento de procedimento operacional padrão (POP) e material orientativo (cartilha) contendo fluxogramas baseados nas concentrações de clorofila-a determinadas pelos modelos propostos, alinhados às determinações preconizadas pelo Ministério da Saúde, no que se refere ao monitoramento de florações de cianobactérias.

## 4 METODOLOGIA

### 4.1 Dados utilizados

O presente trabalho baseia-se em dados secundários (densidade de cianobactérias e concentrações de clorofila-a) gerados durante as atividades analíticas dos laboratórios da Copasa e armazenados em banco de dados próprio, abrangendo os períodos de 2000 a 2020. Também em dados obtidos a partir do banco de dados do órgão que monitora a qualidade da água, incluindo as densidades de cianobactérias e clorofila-a, da água dos principais rios e represas no Estado de Minas Gerais (IGAM), para o período de 2010 a 2020.

Os dados inicialmente analisados para o período descrito acima, pertencem às Bacias Hidrográficas do Rio Buranhém, Rio Doce, Rio Grande, Rio Itabapoana, Rio Itanhém, Rio Jequitinhonha, Rio Jucuruçu, Rio Mucuri, Rio Paraíba do Sul, Rio Paranaíba, Rio Paraopeba, Rio Pardo, Rio Piracicaba, Rio São Francisco e Rio São Matheus (Figura 4). Somente amostras que apresentaram análises simultâneas de densidade de cianobactérias e concentração de clorofila-a foram selecionadas, totalizando 7.068 amostras.

### 4.2 Dados utilizados para construção do modelo

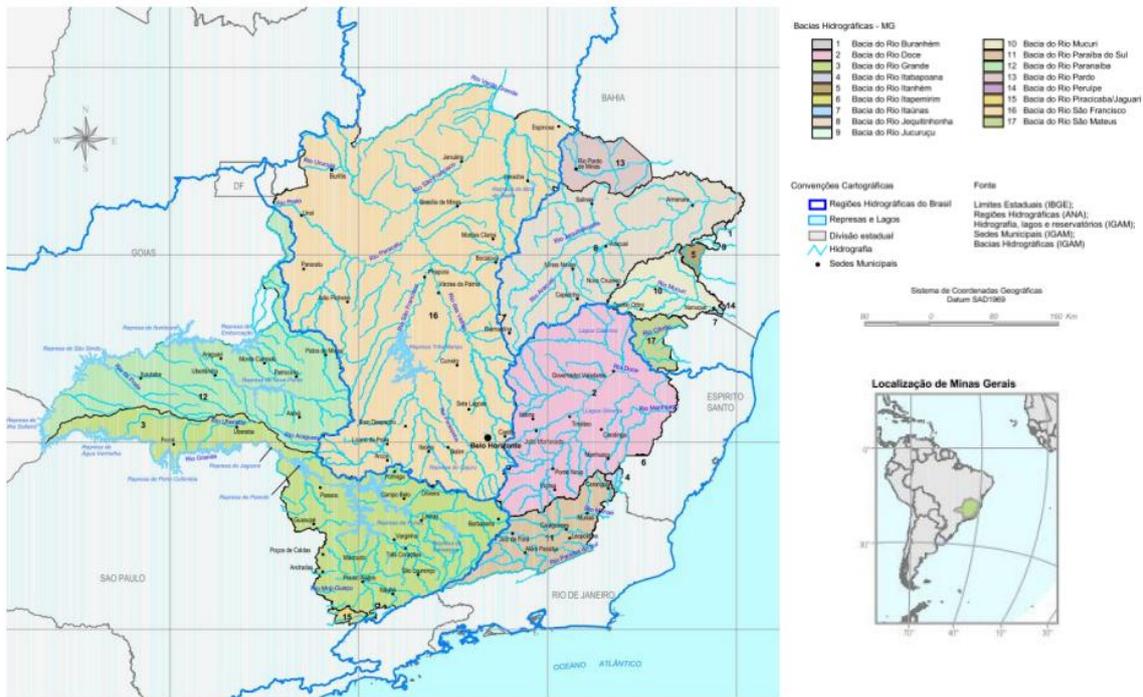
Foi realizada uma triagem nos dados identificando amostras onde a densidade de cianobactérias foi igual ou superior a 1.000 cel/mL e concentração de clorofila-a igual ou superior a 1 µg/L. Portanto, o número de amostras utilizadas para construção do modelo, dentre as 7.068 identificadas inicialmente, foi de 2.194 pertencentes às Bacias dos Doce, Grande, Jequitinhonha, Paraíba do Sul, Paranaíba, Paraopeba, Pardo e São Francisco.

#### 4.2.1 Dados utilizados para verificação do modelo

Para verificar a validade do modelo foram utilizados dados secundários (densidade de cianobactérias e concentrações de clorofila-a) disponíveis no banco de

dados do IGAM para o período de 2021 a 2023, cujas amostras apresentaram densidade de cianobactérias igual ou superior a 1.000 cel/mL e concentração de clorofila-a igual ou superior a 1 µg/L, totalizando 416 amostras.

Figura 4: Mapa das bacias hidrográficas do estado de Minas Gerais. Fonte: IGAM.



Fonte: IGAM (2024)

### 4.3 Caracterização geográfica e climática

Os dados analisados são representativos das grandes bacias hidrográficas de Minas Gerais, responsáveis pelo abastecimento de 20.538.718 habitantes (IBGE, 2024). O período considerado para aquisição dos dados foi de 24 anos, o que torna o banco de dados robusto com relação a variações climáticas (temperatura e pluviosidade).

Ao longo do período estudado foram registrados 9 eventos de El Niño no Brasil, com duração e intensidade variáveis. O ano de 2015 foi marcado por um dos episódios mais intensos, resultando em secas severas em diferentes regiões do país. Já em

2020, houve a ocorrência de um El Niño tardio, causando chuvas acima do normal em algumas áreas.

Cabe ressaltar que durante o período considerado, Minas Gerais presenciou duas grandes catástrofes ambientais que afetou diretamente as características e dinâmicas de grandes e importantes rios como Rio Doce (rompimento da barragem de rejeitos da mineradora Samarco, em Bento Rodrigues) e Rio Paraopeba (rompimento da barragem do Córrego do Feijão, em Brumadinho) que estão incluídos como pontos de monitoramento nesse trabalho. Em ambos os casos, impactos na qualidade da água não ficaram restritos à bacia hidrográfica local, estendendo-se e ultrapassando as fronteiras estaduais.

#### 4.4 Metodologias analíticas

Para a determinação da densidade de cianobactérias o procedimento de análise utilizado, tanto pela Copasa quanto pelo IGAM, é descrito pelo Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2023). Nessa metodologia a amostra deve ser concentrada (sedimentação, filtração ou sedimentação) para posterior análise ao microscópio (em câmara específica) onde todos os organismos fitoplanctônicos devem ser identificados e contados.

Para determinação da concentração de clorofila-a, o método de análise é o descrito em ISO 10260 (ISO, 1992), no caso dos dados da Copasa, ou o descrito no Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2017), para dados do IGAM. Em ambos os métodos, a amostra é filtrada, sendo submetida posteriormente ao processo de extração dos pigmentos (etanol, metanol ou acetona) seguido pela leitura em espectrofotômetro, fluorímetro ou cromatógrafo.

#### 4.5 Análises Estatísticas para construção do modelo

Análises de Regressão são amplamente utilizadas em análises ecológicas onde busca-se determinar a relação entre duas ou mais variáveis. A Regressão Linear Simples, por ser de fácil entendimento e estar disponível na maioria dos softwares

estatísticos, é a ferramenta mais utilizada na busca por padrões de relação entre variáveis. Esse modelo utiliza a média condicional afim de obter a relação entre a(s) variável(is) preditor(a)s e variável resposta. Porém, cabe nesse momento salientar algumas premissas do teste, assim como características do modelo gerado.

A Regressão Linear Simples, por ser um teste paramétrico, deve atender a algumas premissas que, se não respeitadas, faz com que os resultados obtidos não reflitam a realidade da relação e o modelo pode não apresentar um bom desempenho (*goodness off fit*). As principais premissas para a utilização da Regressão Linear Simples são: a linearidade dos dados (visualizada, por exemplo graficamente, na Correlação de Pearson) e distribuição normal, e resíduos sem correlação e variância constante (homoscedasticidade). A análise dos resíduos pode ser feita por meio de testes estatísticos, por exemplo Shapiro-Wilk (normalidade), Teste de Barlett (homoscedasticidade) e Durbin-Watson (auto-correlação), ou ainda por análise gráfica, resultante da aplicação do teste (Cook, 1998; Harrell, 2015).

Dentre essas suposições, a mais problemática é a homocedastidade dos resíduos. Um modelo com resíduos heterogêneos, comum em estudos ecológicos, indica que não há uma única taxa de mudança da variável preditor(a) que caracteriza mudanças na propriedade de distribuição da variável resposta, o que pode gerar modelos sub ou superestimados sobre os valores médios encontrados, ou ainda ausência de relação.

Um método no qual são gerados vários modelos para diferentes níveis de distribuição, contornando a questão da heterocedastidade dos resíduos citada acima, é a Regressão Quantílica (Koenker; Bassett, 1978). A regressão quantílica linear difere da regressão linear simples por estimar partes da variável resposta (quantis condicionais) relacionados à variável preditor(a). Como vários quantis podem ser modelados, é possível detalhar e compreender como a variável resposta (em todas as classes de distribuição) é afetada pela variável preditor(a). Além disso, a regressão quantílica não requer a introdução de uma suposição sobre a forma funcional da distribuição de erros: a especificação da função quantílica linear condicional é uma suposição muito mais forte que o erro associado e desempenha um papel importante para fins inferenciais (Koenker; Bassett, 1978).

Inicialmente aplicada a estudos econométricos (Koenker; Basset, 1979), a regressão quantílica foi introduzida em estudos ecológicos a partir do trabalho de Cade e colaboradores (1999) como uma alternativa à regressão linear simples para quantificar melhor as relações de causa e efeito entre variáveis ecológicas.

A regressão quantílica apresenta algumas propriedades que justificam sua aplicação em modelos ecológicos (Cade; Noon, 2003). Por exemplo: os modelos quantílicos são invariantes sob transformações monótonas (a transformação dos dados, i.e., logarítmica, exponencial etc., é recorrente em estudos onde procura-se diminuir a variância tornando os dados os mais próximos da normalidade). Como consequência, na regressão linear simples há comprometimento na interpretação dos resultados após transformação e na regressão quantílica a interpretação dos parâmetros é dada diretamente. Além disso, o modelo é robusto na presença de *outliers* (influenciam altamente os modelos baseados na média condicional), além de poder ser utilizados em análises de dados heterocedásticos (Hao; Naiman, 2007).

Como na regressão quantílica a medida de tendência central utilizada é a mediana, e a possibilidade de se estimar diversos modelos ao longo da distribuição (por exemplo, máximo e mínimo) ela apresenta uma boa ferramenta em análises de risco. Por exemplo: em um modelo onde o quantil estimado é a mediana (50% da distribuição,  $\tau = 0,5$ ), metade da distribuição encontra-se acima e outra metade encontra-se abaixo desse percentual; em um outro modelo onde o quantil é o 95% ( $\tau = 0,95$ ), podemos estimar que os valores da variável resposta encontram-se abaixo e acima em 95% e 5%, respectivamente. Portanto, os valores acima do quantil considerado ( $\tau = 0,5, 0,75, 0,95$ , etc.) equivale à exceção da distribuição da variável resposta no modelo proposto, assim como o valor do quantil considerado equivale ao risco associado àquela distribuição (Salmaso et al, 2014; Li et al, 2021).

Inicialmente, para avaliar a correlação entre a densidade de cianobactérias e a concentração de clorofila-a foi utilizada a Correlação de Pearson. A fim de determinar um modelo onde pudéssemos identificar valores de concentração de clorofila-a correspondentes à densidade de cianobactéria foram utilizadas análises de regressão linear (simples e quantílica). Em todos os modelos de regressão, a concentração de clorofila-a foi considerada como variável preditora (x) e a densidade de cianobactéria a variável resposta (y). Os dados foram  $\log_{10}$  transformados para todas as análises estatísticas, exceto para a estatística descritiva (medidas centrais e de dispersão). O

Programa R (R Core Team, 2022) foi utilizado em todas as análises estatísticas, sendo que para as análises de regressão quantílica os pacotes utilizados foram o Quantreg e QTools.

Para a avaliação do modelo de regressão linear foi utilizado tanto o  $r^2$  como a raiz do erro quadrático médio (RMSE). O RMSE também foi utilizado para calcular o intervalo de 95% de confiança (CI). Como os dados foram  $\log_{10}$  transformados, o CI (intervalo de confiança) foi expresso em porcentagem. O limite superior foi calculado como  $100 \times 10^{(2 \times \text{RMSE})}$  e o limite inferior como  $100 / 10^{(2 \times \text{RMSE})}$ . Para o cálculo da normalidade dos resíduos (homoscedasticidade) foi utilizado o teste de Shapiro-Wilk assim como a análise gráfica (Q-Q plot) dos resíduos gerados.

Para a avaliação dos modelos de regressão quantílica foram utilizados tanto o valor de T (*T value*) como o teste de *Goodness off Fit* (GOF test) (He e Zu, 2003).

#### 4.6 Valores-referência para concentração de clorofila-a e densidade de cianobactérias

Os valores da densidade de cianobactérias utilizados como referência neste trabalho (*thresholds*) são baseados em Chorus e Welker (2021) e na Portaria GM/MS nº888/2021 (MS, 2021).

Em Chorus e Welker (2021), os autores utilizam o biovolume ( $\text{mm}^3$ ) como medida da concentração de cianobactérias. Como no presente trabalho a determinação da concentração de cianobactéria é feita em  $\text{cel/mL}$ , utilizou-se os valores correlacionados entre as duas medidas (biovolume e células por mL) citadas na edição anterior (Chorus; Bartram 1999):

- a) Nível de Alerta I (OMS): concentração de clorofila  $\geq 1 \mu\text{g/L}$  ou  $\geq 5.000 \text{ cel/mL}$  de cianobactéria.
- b) Nível de Alerta II (OMS): concentração de clorofila  $\geq 12 \mu\text{g/L}$  ou  $\geq 60.000 \text{ cel/mL}$  de cianobactéria.

De acordo com a Portaria GM/MS nº888/2021 (MS, 2021) os níveis de alerta são:

a) Nível de Alerta I (MS): concentração de clorofila  $\geq 10 \mu\text{g/L}$  ou  $\geq 10.000 \text{ cel/mL}$  de cianobactéria.

b) Nível de Alerta II (MS): concentração de clorofila  $\geq 20 \mu\text{g/L}$  ou  $\geq 20.000 \text{ cel/mL}$  de cianobactéria.

#### 4.7 Verificação da adequação do modelo

Para verificar a adequação do modelo (s) construídos (s), os dados referentes aos pontos amostrados foram inicialmente categorizados em ambientes lóticos e lênticos. Verificou-se então a ocorrência de florações de cianobactérias em cada ponto, de acordo com os níveis de alerta propostos pelo Ministério da Saúde (MS). O percentual de ocorrência anual de florações em cada ponto foi utilizado como parâmetro para definir qual o nível de risco aceitável para cada ambiente. Posteriormente os dados referentes à cada categoria de risco foram testados para os modelos construídos.

#### 4.8 Construção do Procedimento Operacional Padrão (POP) e material orientativo (cartilha)

O material orientativo foi elaborado com o objetivo de contribuir e dar suporte para a tomada de decisões pelos profissionais das empresas de saneamento, aprimorando os valores já determinados pelo Ministério da Saúde para o monitoramento de cianobactérias em água para abastecimento público.

Foram desenvolvidos fluxogramas referentes à cada categoria de risco de manancial (modelos quantílicos), indicando os valores de concentração de clorofila-a que podem ser utilizados, a nível de vigilância e com uma probabilidade de risco associada, como ferramenta para o monitoramento de cianobactérias, de acordo com os níveis de alerta propostos pelo Ministério da Saúde (MS, 2021).

## 5 RESULTADOS

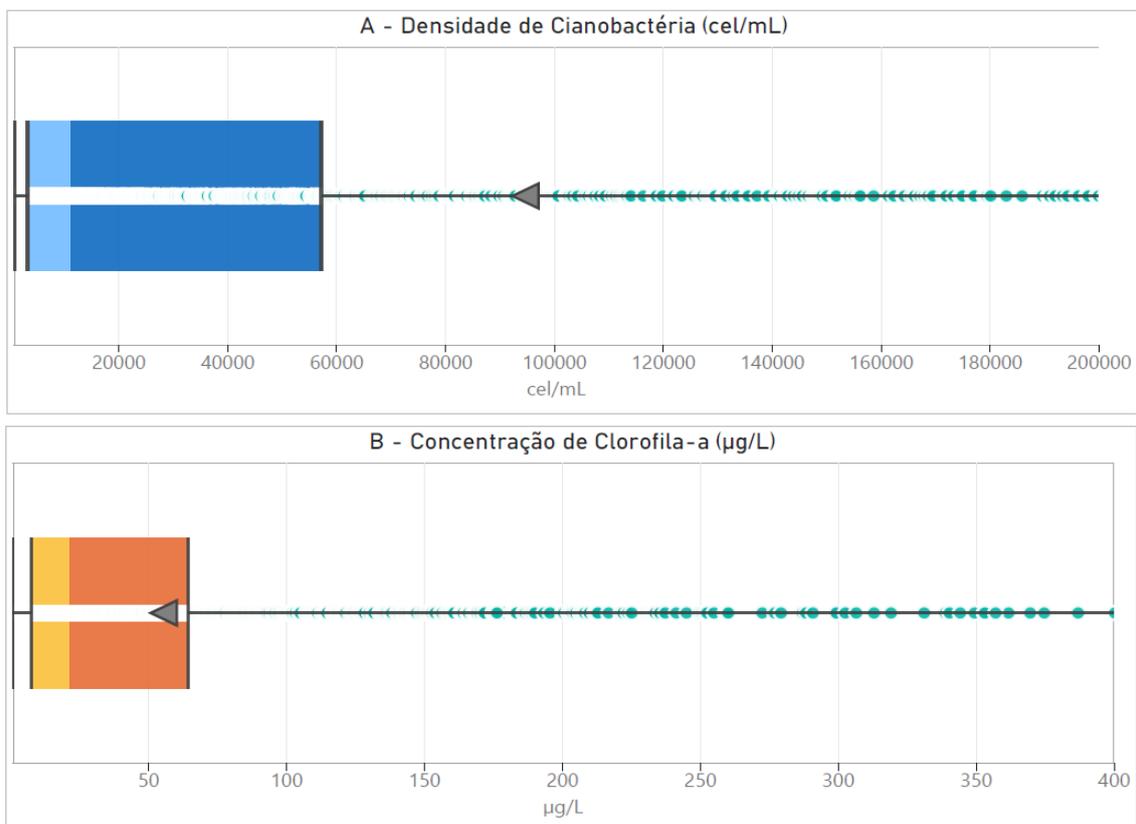
### 5.1 Construção do modelo

Foram utilizadas 2.194 amostras correspondentes ao período de 2000 a 2020. Essas amostras são representativas de Bacias Hidrográficas do Estado de Minas Gerais. A Tabela 2 apresenta a Estatística Descritiva para os dados utilizados e a Figura 5 apresenta o boxplot (valor mínimo, primeiro quartil, mediana, terceiro quartil, média, desvio padrão e máximo) para os mesmos dados.

Tabela 2: Estatística descritiva das variáveis Densidade de Cianobactéria, em cel/mL, e Concentração de Clorofila-a, em µg/L, das amostras de água do Estado de Minas Gerais (n=2.194) para o período de 2.000 a .2020.

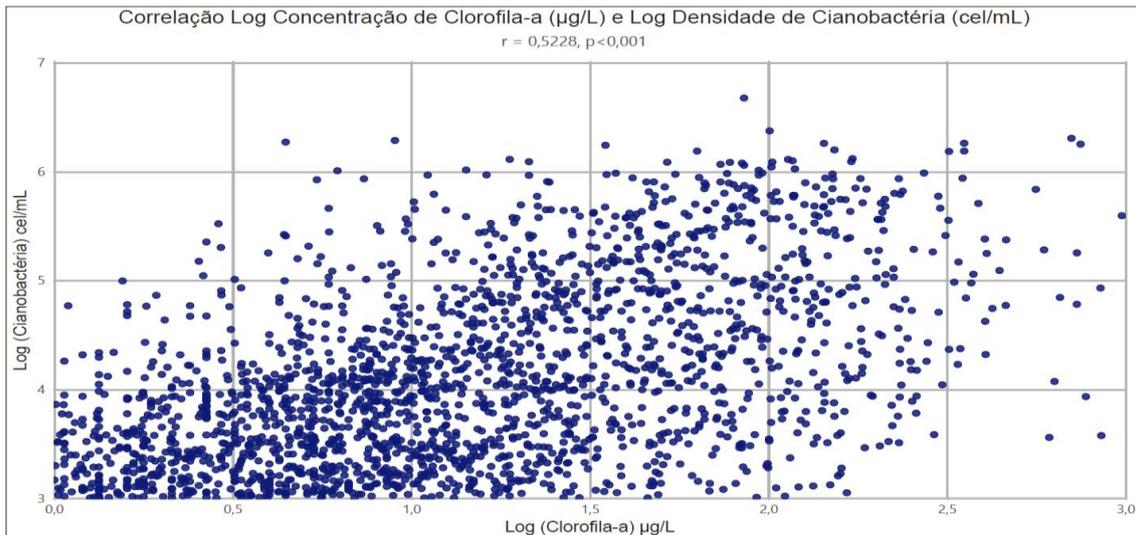
	Mínimo	Q25	Média	DP	Mediana	Q75	Máximo
<b>Cianobactéria</b>	1.002	3.382	94,781	243.128	11.371	57.311	4.741.753
<b>Clorofila-a</b>	1,00	7,66	55,67	81,02	21,72	64,63	976,22

Figura 5: Boxplot para os valores de densidade de cianobactérias (A) e concentração de clorofila-a (B).



A análise de correlação de Pearson entre as variáveis resultou em um valor de  $r = 0,5228$ ,  $p < 0,001$ , indicando uma relação positiva e estatisticamente significativa entre as variáveis (Figura 6).

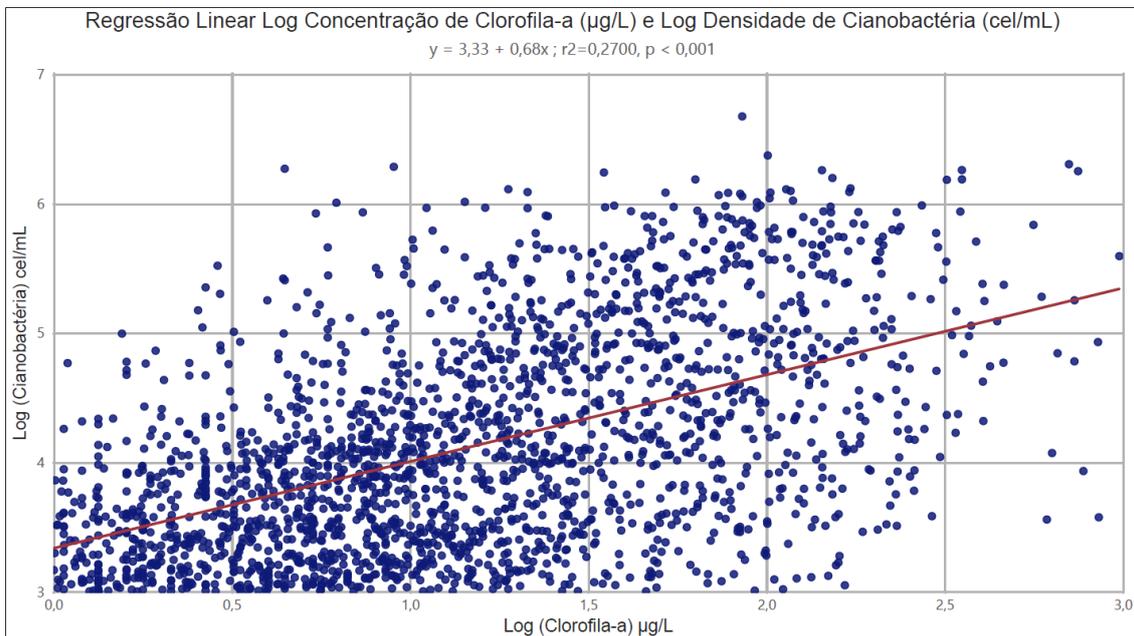
Figura 6: Correlação entre log da densidade de cianobactéria (cel/mL) e log da concentração de Clorofila-a ( $\mu\text{g/L}$ ) (n=2.194).



Uma das questões a serem respondidas é como a concentração de clorofila-a pode prever valores de densidade de cianobactéria. Para começar a responder essa questão foi utilizada a análise de regressão linear simples.

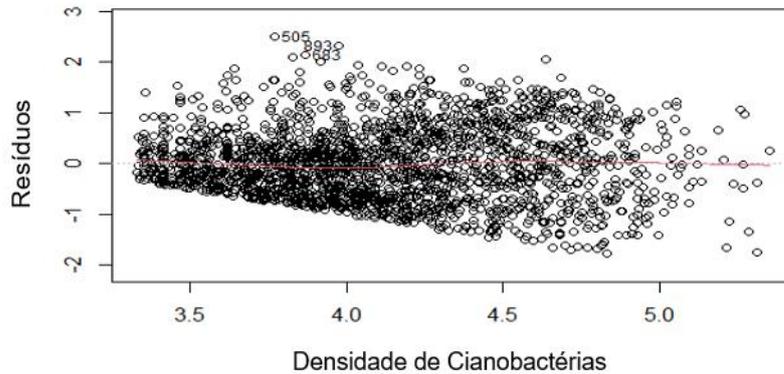
A análise de regressão linear simples identificou uma relação positiva e estatisticamente significativa ( $p < 0,001$ ) para as amostras analisadas, porém com um  $r^2$  de 0,27 (Figura 7) e RMSE de 0,69. Para esse valor de RMSE, os valores preditos de densidade de cianobactéria poderiam variar entre 4% e 2.300%. Esse intervalo de predição acarreta o questionamento de quanto o modelo analisado, apesar de estatisticamente significativo, é preciso. A precisão, nesse caso, indica que um determinado valor medido de clorofila-a correlaciona-se a uma alta amplitude de valores de densidade de cianobactérias, não sendo, portanto, um modelo útil para ser usado como ferramenta de monitoramento da densidade de cianobactérias.

Figura 7: Regressão linear Simples, onde densidade de cianobactéria (cel/mL) como variável resposta e concentração de Clorofila-a ( $\mu\text{g/L}$ ) como variável preditora ( $n=2.194$ ).



De acordo com os resultados do teste de Shapiro-Wilk, os resíduos não apresentaram distribuição normal ( $W = 0,9910, p < 0,001$ ). Além desse fato, conforme pode ser observado na Figura 8, os resíduos gerados pela análise de regressão linear apresentaram heterocedasticidade, principalmente para valores de densidade de cianobactérias inferiores a  $10.000 \text{ cel/mL}$  ( $4 \log_{10}$ ), indicando que o modelo de Regressão Linear não é adequado à análise dos dados (homoscedasticidade é uma das premissas a ser respeitada na utilização do modelo gerado pela regressão linear simples).

Figura 8: Gráfico dos Resíduos gerados pelo modelo de Regressão Linear Simples (n=2.194).



Tendo em vista os resultados obtidos na Regressão Linear Simples, aplicou-se ao conjunto de dados o modelo de regressão quantílica linear.

Para a análise de Regressão Quantílica, foram utilizados os quantis de 0,25, 0,50, 0,60, 0,75, 0,80, 0,85, 0,90, 0,95 (Figura 9). Todos os modelos foram significativos ( $p < 0,001$ ), assim como houve diferença significativa entre eles ( $F = 824,7$ ,  $p < 0,001$ ).

Analisando a Figura 10, identificou-se uma alteração crescente nos valores de  $B_0$  e  $B_1$  das curvas de regressão para cada quantil, o que justificou a utilização da regressão quantílica, visto que a contribuição de clorofila-a para a densidade de cianobactérias ocorreu de maneira diferente (e crescente) em cada quantil analisado.

Figura 9: Regressão Quantílica onde densidade de cianobactéria (log cel/mL) como variável resposta e concentração de clorofila-a (log µg/L) como variável preditora (n=2.194) para os Quantis estimados (0,25, 0,50, 0,60, 0,75, 0,80, 0,85, 0,90, 0,95).

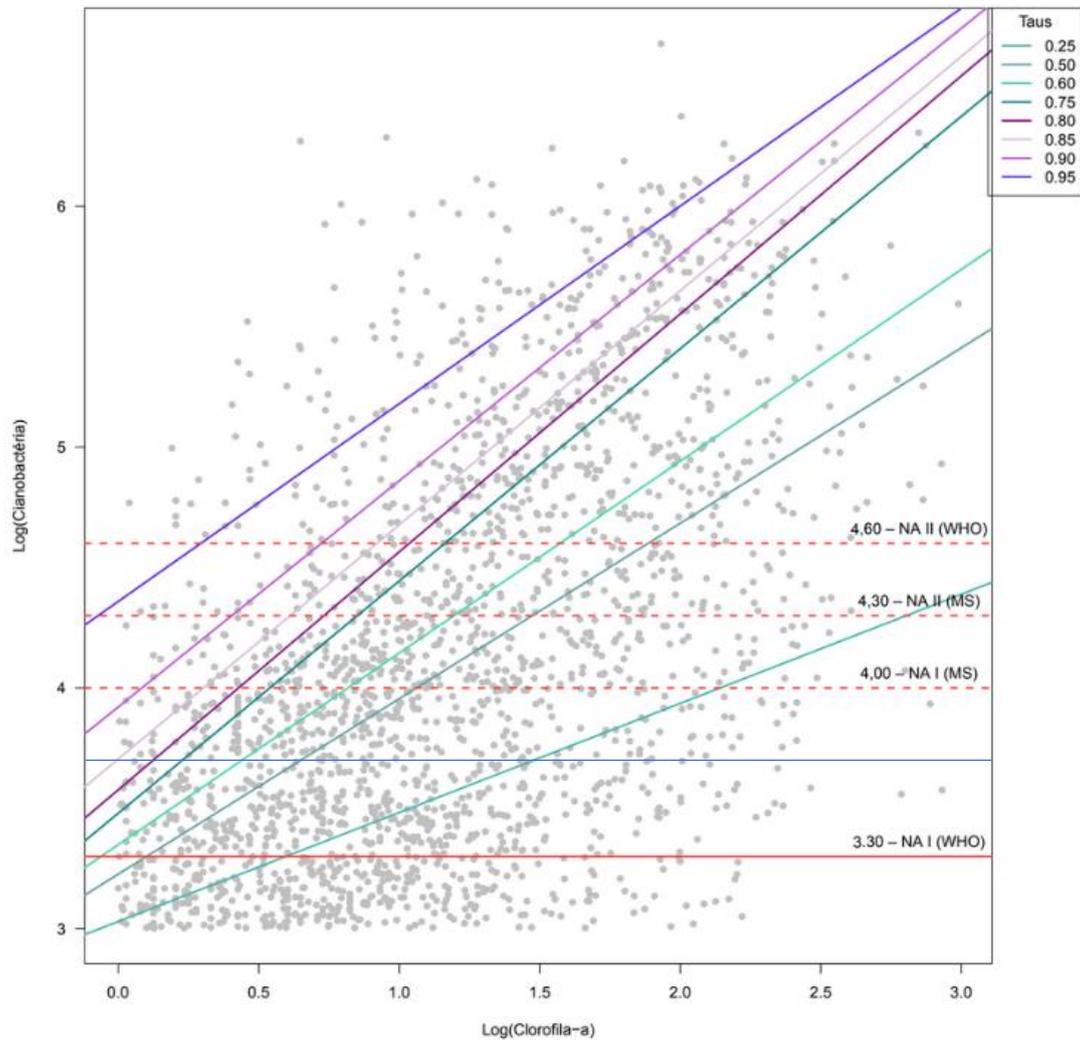
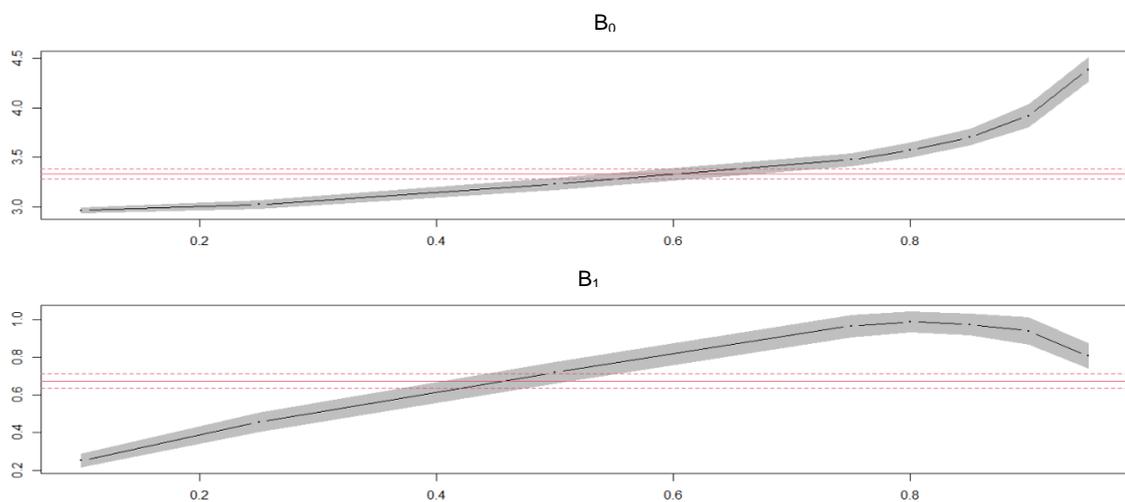


Figura 10: Coeficientes estimados ( $B_0$  e  $B_1$ ) no modelo de Regressão Quantílica (n=2.194).



A Tabela 3 apresenta os parâmetros estimados ( $B_0$  e  $B_1$ ) assim como os valores de *GOF test* (e probabilidade associada) para os quantis estimados (Q). As equações podem ser utilizadas, portanto, para determinar a probabilidade de amostras que excederam os níveis de alerta propostos.

Tabela 3: Parâmetros estimados para os Quantis (Q) pela Regressão Quantílica Linear.

	<b>Q25</b>	<b>Q50</b>	<b>Q60</b>	<b>Q75</b>	<b>Q80</b>	<b>Q85</b>	<b>Q90</b>	<b>Q95</b>
<b>B<sub>0</sub></b>	3,03	3,23	3,35	3,48	3,58	3,70	3,92	4,35
<b>B<sub>1</sub></b>	0,45	0,73	0,80	0,96	0,98	0,97	0,93	0,81
<b>GOF test</b>	0,30	0,068	0,064	0,113	0,048	0,041	0,051	0,024
<b>p</b>	<0,001	0,10*	0,11*	0,02	0,05*	0,06*	0,03	0,01

(\*) Modelos com melhores ajustes

Apesar de todos os modelos gerados terem sido significativos, os melhores ajustes foram para os Quantis Q50, Q60, Q80 e Q85. Conforme pode ser verificado, nos quantis 80 e 85, o coeficiente linear ( $B_1$ ) foi de aproximadamente 1,0, indicando que a contribuição para concentrações de clorofila-a é quase totalmente de cianobactérias. Porém, o quantil 85 e os acima deste não serão usados pois a linha de regressão quantílica desses quantis não interceptam a linha para o nível de alerta I da OMS (Figura 9).

As equações geradas a partir dos coeficientes de cada quantil forneceram informações a respeito de como a concentração de clorofila-a relacionou-se com os valores de densidades de cianobactéria (Tabela 4).

Tabela 4: Valores ajustados de quantil mostrando a mudança da concentração de cianobactérias (cel/mL) com mudança na concentração de clorofila-a ( $\mu\text{g/L}$ ).

<b>Clorofila-a</b>	<b>Densidade de cianobactérias</b>			
	<b>Q50</b>	<b>Q60</b>	<b>Q80</b>	<b>Q85</b>
1	1.698	2.239	3.802	5.012
5	5.499	8.113	18.407	23.878
10	9.120	14.125	36.308	46.774
15	12.262	19.538	54.022	69.312
20	15.127	24.594	71.616	91.622
30	20.338	34.017	106.556	135.771
40	25.090	42.820	141.260	179.473
50	29.529	51.189	175.789	222.844
60	33.733	59.227	210.178	265.954

Do ponto de prático, a concentração de clorofila-a, ajustada para cada quantil, pode ser usada para prever a densidade de cianobactéria. Por exemplo no quantil 50 (ou seja, taxa excedente de 50%), em concentrações acima de 10 µg/L de clorofila-a, praticamente 50% das amostras excederiam o nível de alerta I (MS) – 10.000 cel/mL.

A tabela 5 indica o percentual de amostras excedidas, considerando os valores para densidade de cianobactérias definidos em Chorus e Welker (2021). Pelo menos 15% das amostras excederam o nível de alerta I (5.000 cel/mL) quando o valor da concentração de clorofila-a foi de aproximadamente 1µg/L, e 15% excederam o nível de alerta II (60.000 cel/mL) quando a concentração de clorofila-a foi aproximadamente 12µg/L. Se a concentração de clorofila-a aumentar para aproximadamente 23 µg/L, 25% das amostras excedem o nível de alerta II.

Tabela 5: Concentração de Clorofila-a para uma dada probabilidade (Quantil) de estar dentro dos limites estabelecidos para os Níveis de Alerta I e II definidos em Chorus e Welker (2021).

<b>Quantil</b>		<b>50</b>	<b>60</b>	<b>75</b>	<b>80</b>	<b>85</b>	<b>90</b>	<b>95</b>
<b>%Excedido</b>		<b>50%</b>	<b>40%</b>	<b>25%</b>	<b>20%</b>	<b>15%</b>	<b>10%</b>	<b>5%</b>
<b>Nível de alerta I</b> (≥5.000 cel/mL)	CH (µg/L)	4,4	2,7	1,7	1,3	1,0	0,6	0,2
<b>Nível de alerta II</b> (≥ 60.000 cel/mL)	CH(µg/L)	132,1	61,0	22,5	16,7	12,9	8,4	3,4

A tabela 6 indica o percentual de amostras excedidas, considerando os valores para densidade de cianobactérias definidos pelo Ministério da Saúde (2021). Pelo menos 50% das amostras excederam o nível de alerta I (10.000 cel/mL) quando o valor da concentração de clorofila-a foi de aproximadamente 10 µg/L, e 40% excedem o nível de alerta II quando a concentração de clorofila-a foi de aproximadamente 15µg/L. Se a concentração de clorofila-a aumentar para aproximadamente 30 µg/L, 50% das amostras excedem o nível de alerta II.

Tabela 6: Concentração de Clorofila-a para uma dada probabilidade de estar dentro dos limites estabelecidos (Quantil) para os Níveis de Alerta I e II definidos em Ministério da Saúde (2021).

<b>Quantil</b>		<b>50</b>	<b>60</b>	<b>75</b>	<b>80</b>	<b>85</b>	<b>90</b>	<b>95</b>
<b>%Excedido</b>		<b>50%</b>	<b>40%</b>	<b>25%</b>	<b>20%</b>	<b>15%</b>	<b>10%</b>	<b>5%</b>
<b>Nível de alerta I</b> (≥10.000 cel/mL)	CH (µg/L)	11,35	6,5	3,5	2,7	2,0	1,2	0,4
<b>Nível de alerta II</b> (≥20.000 cel/mL)	CH(µg/L)	29,3	15,5	7,1	5,5	4,2	2,5	0,9

Além disso, os modelos quantílicos podem contribuir para definir limites locais de concentração de clorofila-a em relação aos níveis de alerta (MS e OMS). Para verificar como os valores de densidades crescentes de cianobactérias relacionaram-se a concentrações de clorofila-a, para esses níveis de risco, consideramos as equações geradas nos quantis Q50 (baixo risco), Q60 (médio risco), Q80 (alto risco), conforme verificado na Tabela 7 abaixo.

Tabela 7: Concentração de clorofila-a ( $\mu\text{g/L}$ ) considerando as equações geradas nos quantis Q50, Q60 e Q85 correspondente a densidades de cianobactérias ( $\text{cel/mL}$ ) referentes aos níveis de alerta (MS e OMS).

<b>Cianobactéria (MS)</b>	<b>Quantil</b>	<b>Clorofila-a</b>
Nível de Alerta I	50	11,3
	60	6,5
	80	2,7
Nível de Alerta II	50	23,9
	60	15,4
	80	5,5
<b>Cianobactéria (OMS)</b>	<b>Quantil</b>	<b>Clorofila-a</b>
Nível de Alerta I	50	4,4
	60	2,7
	80	1,3
Nível de Alerta II	50	132,1
	60	61,0
	<b>80</b>	<b>16,7</b>

Conforme pode ser verificado, para que uma determinada densidade de cianobactéria não extrapole o valor do nível de alerta determinado, menor deve ser a concentração de clorofila-a da amostra.

Para o valor definido no nível de alerta I MS para cianobactérias (10.000  $\text{cel/mL}$ ), em mananciais onde o risco assumido pode ser baixo (Q50, pouca ou nenhuma ocorrência de florações de cianobactéria) o valor máximo para concentração de clorofila-a a ser considerado é de 11,3  $\mu\text{g/L}$ . Para mananciais onde existe relato de florações, porém em baixa frequência de ocorrência o risco assumido pode ser médio (Q60) e o valor máximo para concentração de clorofila-a a ser considerado é de 6,5  $\mu\text{g/L}$ . Em mananciais onde há histórico de florações constantes o risco assumido é

alto (Q80) e o valor máximo para concentração de clorofila-a a ser considerado é de 2,7 µg/L.

Para o valor definido no nível de alerta II MS para cianobactérias (20.000 cel/mL), em mananciais onde o risco assumido pode ser baixo (Q50, pouca ou nenhuma ocorrência de florações de cianobactéria) o valor máximo para concentração de clorofila-a a ser considerado é de 29,3 µg/L. Para mananciais onde existe relato de florações, porém sem periodicidade definida o risco assumido pode ser médio (Q60) e o valor máximo para concentração de clorofila-a a ser considerado é de 15,4 µg/L. Em mananciais onde há histórico de florações constantes e o risco assumido é alto (Q80), o valor máximo para concentração de clorofila-a a ser considerado é de 5,5 µg/L.

Para o valor definido no nível de alerta I OMS para cianobactérias (5.000 cel/mL), em mananciais onde o risco assumido pode ser baixo (Q50, pouca ou nenhuma ocorrência de florações de cianobactéria) o valor máximo para concentração de clorofila-a a ser considerado é de 4,4 µg/L. Para mananciais onde existe relato de florações, porém sem periodicidade definida o risco assumido pode ser médio (Q60) e o valor máximo para concentração de clorofila-a a ser considerado é de 2,7 µg/L. Em mananciais do tipo lântico (represas) ou onde há histórico de florações constantes o risco assumido é alto (Q80) e o valor máximo para concentração de clorofila-a a ser considerado é de 1,3 µg/L.

Para o valor definido no nível de alerta II OMS para cianobactérias (60.000 cel/mL), em mananciais onde o risco assumido pode ser baixo (Q50, pouca ou nenhuma ocorrência de florações de cianobactéria) o valor máximo para concentração de clorofila-a a ser considerado é de 132,1 µg/L. Para mananciais onde existe relato de florações, porém sem periodicidade definida o risco assumido pode ser médio (Q60) e o valor máximo para concentração de clorofila-a a ser considerado é de 61,0 µg/L. Em mananciais onde há histórico de florações constantes e o risco assumido é alto (Q80) e o valor máximo para concentração de clorofila-a a ser considerado é de 16,7 µg/L.

## 5.2 Verificação do modelo

Para verificar a adequação dos modelos quantílicos determinados anteriormente, foram utilizadas 416 amostras correspondentes ao período de 2021 a 2023, referentes ao monitoramento realizado pelo IGAM nas bacias hidrográficas de Minas Gerais. A Figura 11 apresenta o Boxplot para os dados utilizados e a Tabela 8 apresenta a Estatística Descritiva para os mesmos dados.

Figura 11: Boxplot das variáveis Densidade de Cianobactéria, em cel/mL, e Concentração de Clorofila-a, em  $\mu\text{g/L}$ , das amostras de água do Estado de Minas Gerais (n=416) para o período de 2021 a 2023.

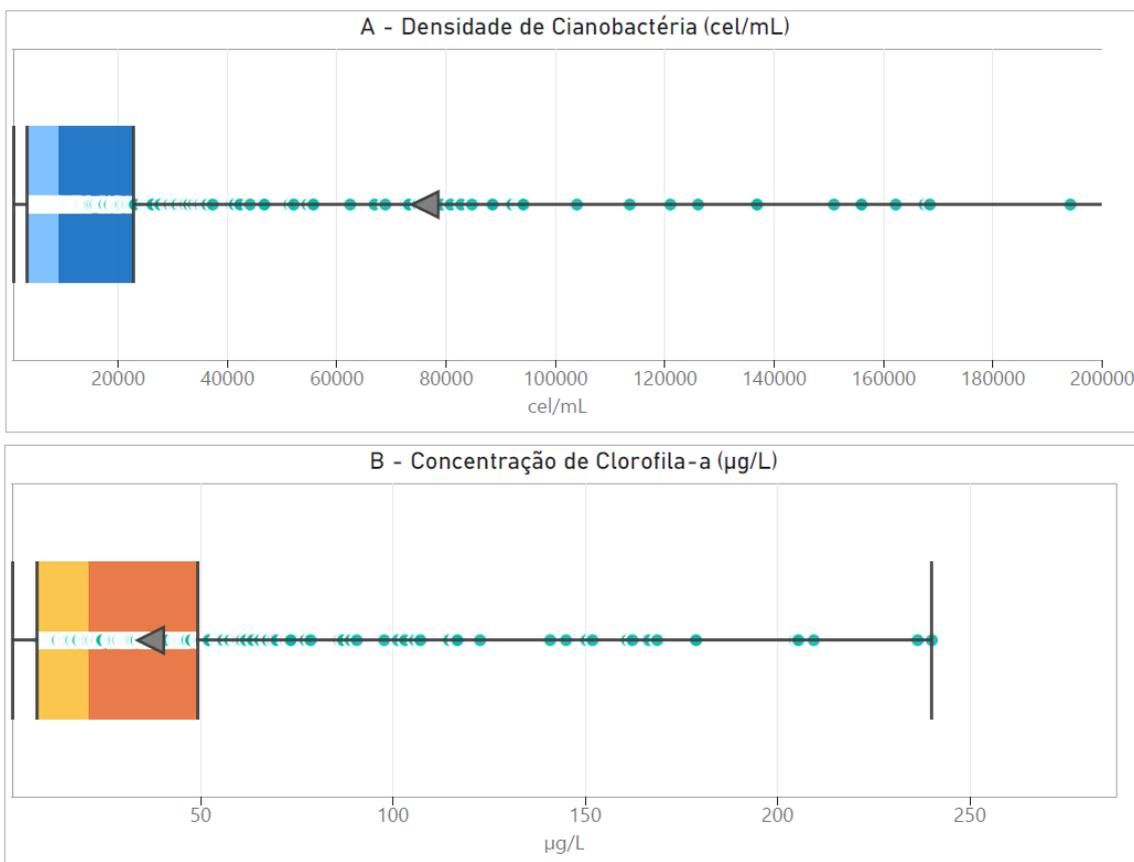
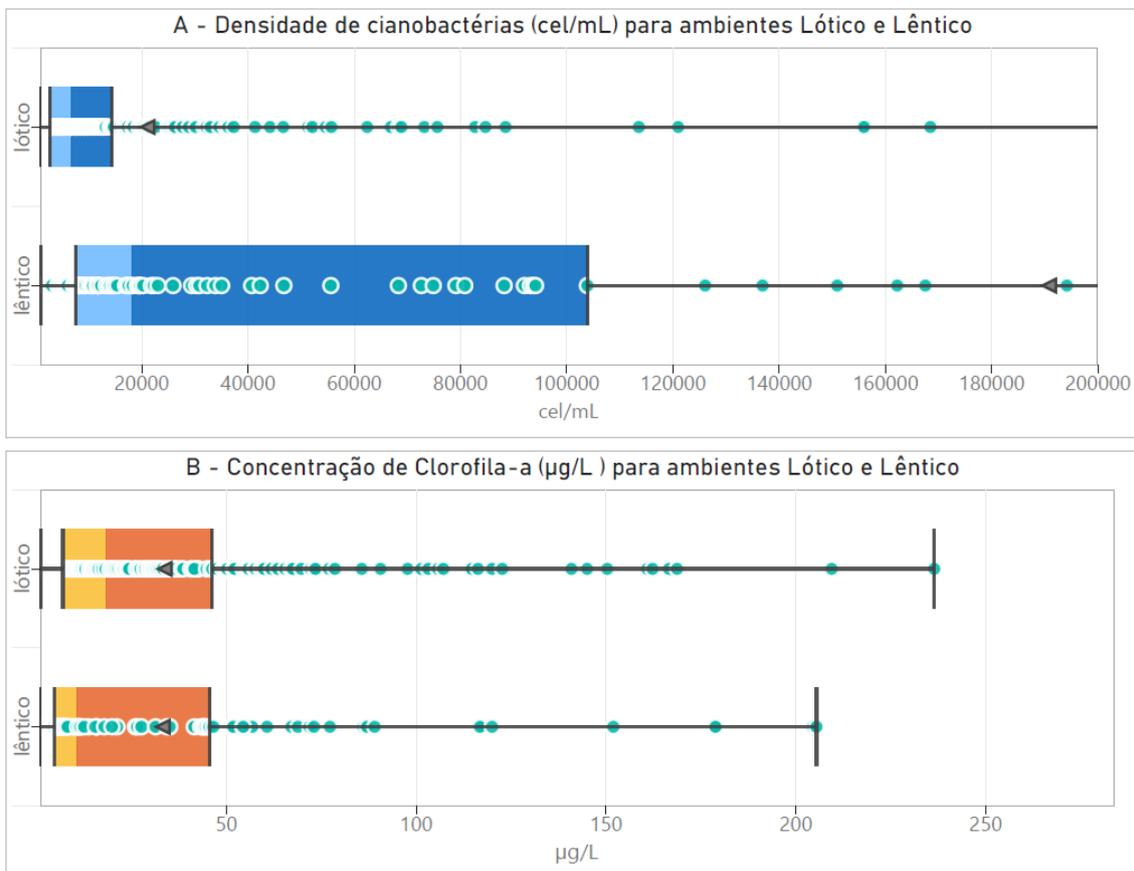


Tabela 8: Estatística descritiva das variáveis Densidade de Cianobactéria, em cel/mL, e Concentração de Clorofila-a, em  $\mu\text{g/L}$ , das amostras de água do Estado de Minas Gerais (n=416) para o período de 2021 a 2023.

	Mínimo	Q25	Média	DP	Mediana	Q75	Máximo
<b>Cianobactéria</b>	1.005	3.445	76.295	458.791	9.412	22.943	8.997.350
<b>Clorofila-a</b>	1,2	7,7	37,2	38,44	21,2	49,5	240,3

As amostras também foram separadas em ambientes lânticos e lóticos, sendo essa classificação realizada pelo responsável pela coleta e análise (IGAM) e informada no banco de dados utilizado. Ambientes lóticos e lânticos apresentam características intrínsecas que fazem com que apresentem probabilidades de ocorrência de floração diferenciada (risco associado), sendo menor nos ambientes lóticos e maior nos lânticos (Figura 12).

Figura 12: Boxplot das variáveis Densidade de Cianobactéria, em cel/mL, e Concentração de Clorofila-a, em  $\mu\text{g/L}$ , em ambientes lótico e lântico.

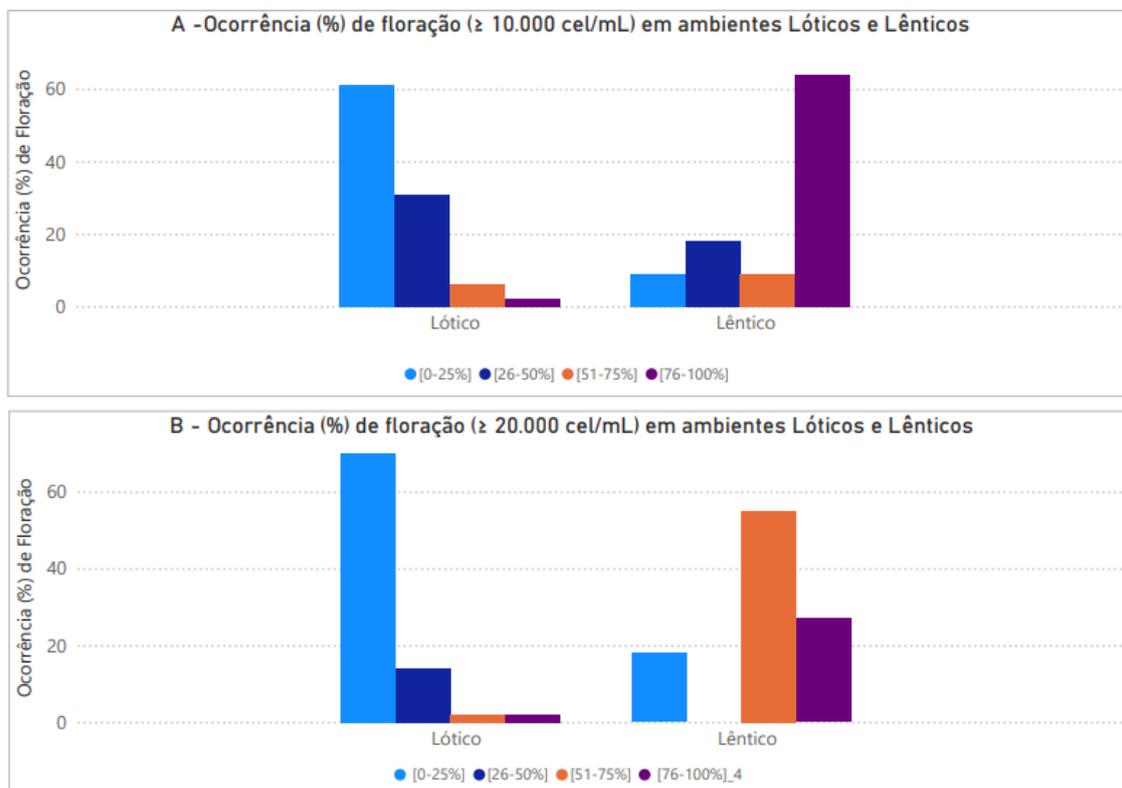


Conforme pode ser observado, os ambientes lânticos apresentaram maior valor médio de densidade de cianobactéria comparados aos ambientes lóticos, apesar de a média observada para clorofila-a ser semelhante ( $34,9 \mu\text{g/L}$  para ambientes lânticos e  $34,4 \mu\text{g/L}$  para ambientes lóticos). Nos ambientes lânticos, 50% das amostras apresentaram valor de até  $18.345 \text{ cel/mL}$  de cianobactérias e até  $10,9 \mu\text{g/L}$  de clorofila-a. Para ambientes lóticos, apesar de 50% das amostras apresentarem

concentração de clorofila-a de até 18,39 $\mu$ g/L (quase o dobro, comparado à ambientes lênticos), a densidade de cianobactérias foi de 6.832 cel/mL, um terço do que verificado em ambientes lênticos. Tal resultado é importante pois evidencia que nos ambientes lóticos estudados a maior contribuição para a concentração de clorofila-a não é oriunda de cianobactérias e sim de outros grupos fitoplanctônicos.

Para verificar a ocorrência de eventos anuais de floração de cianobactérias calculou-se o percentual anual desses eventos para cada ponto amostral, nos anos de 2021 a 2023 e para ambientes lênticos e lóticos, separadamente. Para esse cálculo, utilizou-se somente os valores de densidade de cianobactérias definidos pelo Ministério da Saúde (10.000 e 20.000 cel/mL). Os resultados podem ser verificados na figura 13 abaixo.

Figura 13: Ocorrência de floração anual igual ou superior a 10.000 cel/mL (A) e ocorrência de floração anual igual ou superior a 20.000 cel/mL (B) em ambientes lótico e lêntico.



Considerando o nível de alerta I (MS) – 10.000 cel/mL de cianobactéria – os eventos menos constantes de floração anual (até 25% das amostras anuais) foram

verificados nos ambientes lóticos, enquanto os eventos mais constantes foram verificados nos ambientes lênticos (acima de 76% de ocorrência anual).

Para o nível de alerta II (MS) – 20.000 cel/mL de cianobactéria – os resultados são semelhantes aos descritos para o nível de alerta I: os eventos menos constantes de floração anual (até 25% das amostras anuais) foram verificados nos ambientes lóticos, enquanto os eventos mais constantes foram verificados nos ambientes lênticos (acima de 50% de ocorrência anual). Vale destacar o aumento no número de ocorrência de florações até 25% das amostras anuais em mananciais lóticos, o que indica que florações acima de 20.000 cel/mL são menos frequentes nesses ambientes.

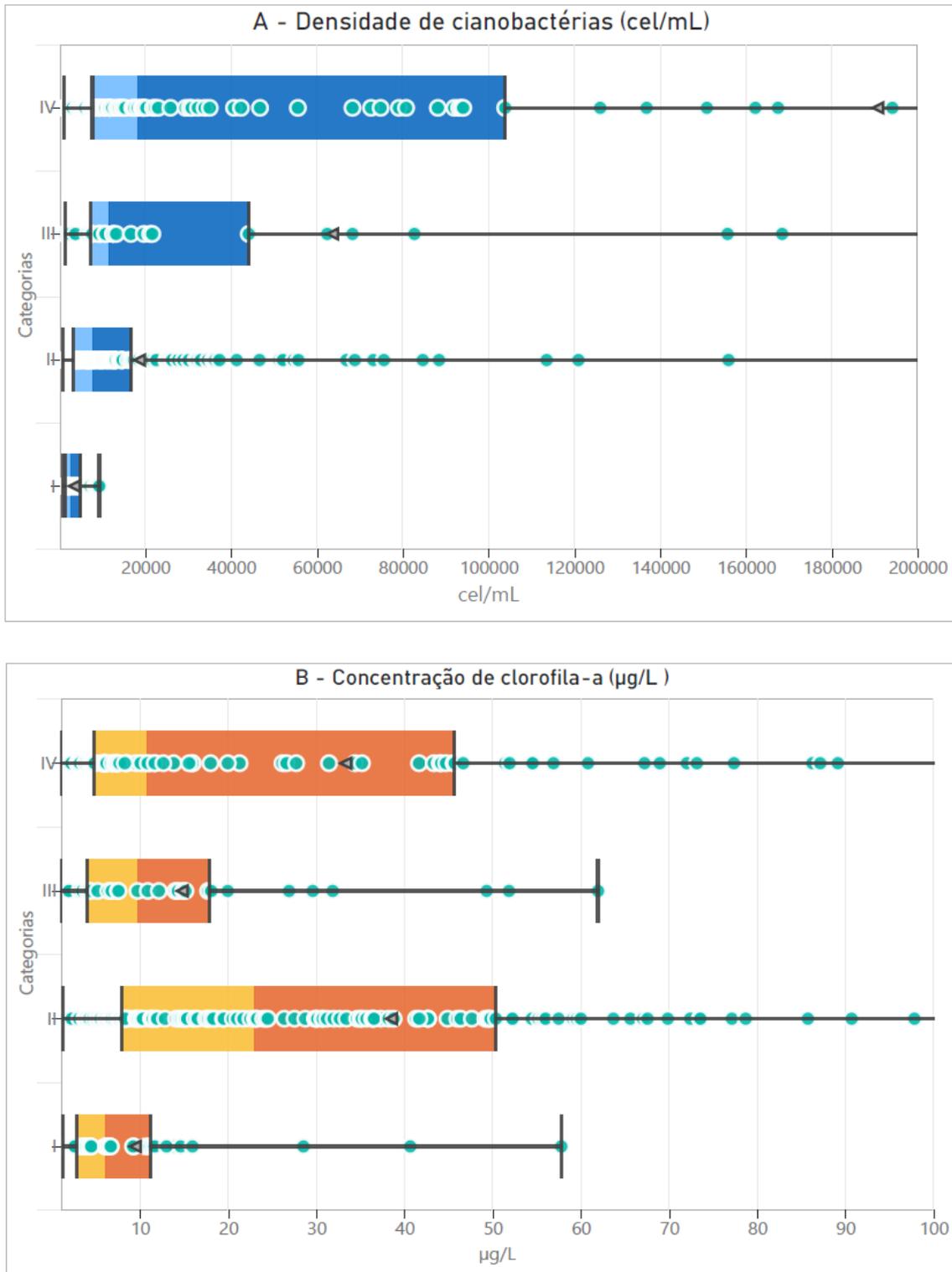
Tendo em vista os resultados descritos acima e para verificar o percentual de amostras que extrapolavam os níveis de alerta propostos utilizando os valores de clorofila-a determinados nos quantis Q50, Q60 e Q80, os pontos amostrais foram categorizados em:

- a) Categoria I: Mananciais lóticos sem ocorrência anual de florações de cianobactérias.
- b) Categoria II: Mananciais lóticos com ocorrência anual de florações em até 50% das amostras.
- c) Categoria III: Mananciais lóticos com ocorrência anual de florações igual e acima de 51% das amostras.
- d) Categoria IV: Mananciais lênticos independentes da ocorrência anual de florações de cianobactérias.

Caso um ponto amostral tenha apresentado variação na frequência de ocorrência de florações em anos distintos, por exemplo em um ano apresentou 25% de ocorrência de floração e no outro 75%, o mesmo foi categorizado no ambiente com maior frequência de ocorrência de floração.

A Figura 14 indica o Boxplot para a densidade de cianobactérias e concentração de clorofila-a para as amostras dessa categoria.

Figura 14: Boxplot das variáveis Densidade de Cianobactéria, em cel/mL, e Concentração de Clorofila-a, em  $\mu\text{g/L}$ , para as categorias I, II e III.



Conforme pode ser verificado, nos ambientes lóticos sem ocorrência de florações (Categoria I), 50% das amostras apresentaram densidade de cianobactéria

e concentração de clorofila-a de até 2.689 cel/mL e 6,23 µg/L, respectivamente, o que pode indicar ambientes que além apresentarem baixa densidade de cianobactéria, apresentam também baixa densidade de outros organismos fitoplanctônicos.

Em ambientes lóticos com ocorrência anual de florações em até 50% (Categoria II), 50% das amostras apresentaram densidade de cianobactéria e concentração de clorofila-a de até 7.823 cel/mL e 23,11 µg/L, respectivamente. Comparado à Categoria I, observa-se um aumento para mediana principalmente nos valores da concentração de clorofila-a, o que se relaciona não somente um maior incremento de cianobactérias nesses ambientes, mas principalmente de outros organismos fitoplanctônicos, que pelo que parece, são os responsáveis pelo aumento na concentração de clorofila-a.

Em ambientes lóticos com ocorrência anual de florações acima de 51% (Categoria III), 50% das amostras apresentaram densidade de cianobactéria e concentração de clorofila-a de até 11.753 cel/mL e 9,79 µg/L, respectivamente. Comparado à Categoria II, observa-se um aumento expressivo para mediana dos valores de densidade de cianobactéria e ao mesmo tempo uma diminuição para mediana dos valores de concentração de clorofila-a. Esses resultados indicam que, para esses ambientes, a maior contribuição para produção de clorofila-a é de cianobactérias.

Em ambientes lênticos (Categoria IV), 50% das amostras apresentaram densidade de cianobactéria e concentração de clorofila-a de até 18.345 cel/mL e 10,94 µg/L, respectivamente. Importante destacar que, apesar da mediana para clorofila-a dessa categoria ser semelhante à categoria III, a mediana para densidade de cianobactéria praticamente dobra e que a diferença entre quartil nessa categoria (diferença entre 1° e 3° quartil) é maior que a observada na categoria III, o que indica uma maior variabilidade (tanto para cianobactéria quanto para clorofila) na Categoria IV. Além disso, altas densidades de cianobactérias associadas a baixas concentrações de clorofila-a podem indicar uma baixa relação clorofila-a/células (quota celular) indicando a presença de cianobactérias muito pequenas (picoplanctônicas < 2 µm) que contribuem em número, mas não em concentração de clorofila-a.

### 5.2.1 Verificação do percentual de amostras que excedem os níveis de alerta.

Conforme os resultados descritos acima, para os dados referentes aos pontos de ambientes lóticos sem ocorrência de florações – Categoria I, em decorrência do baixo risco associado a esses eventos, foi utilizado o quantil 50 (Q50) para verificar o percentual de amostras que extrapolaram os níveis de alerta I e II (MS e OMS).

Para os dados referentes aos pontos de ambientes lóticos com ocorrência de florações em até 50% das amostras anuais – Categoria II (risco médio associado a esses eventos) foi utilizado o quantil 60 (Q60) para verificar o percentual de amostras que extrapolaram os níveis de alerta I e II (MS e OMS).

Para os dados referentes aos pontos de ambientes lóticos com ocorrência de florações acima de 51% das amostras anuais e ambientes lênticos – Categoria III e IV, respectivamente (risco alto associado a esses eventos), foi utilizado o quantil 80 (Q80) para verificar o percentual de amostras que extrapolaram os níveis de alerta I e II (MS e OMS).

A Tabela 9, indica, para a Categoria I, o percentual de amostras que excederam os níveis de alerta propostos (MS e OMS).

Tabela 9: Percentual de amostras que excederam os níveis de alerta propostos (MS e OMS) de acordo a concentração de clorofila-a determinada para o quantil 50 (Q50).

<b>MS</b>	<b>Quantil</b>	<b>Clorofila-a</b>	<b>Amostras (n) exceção</b>	<b>Amostras (%) exceção</b>
Nível de Alerta I	50	11,3	0	0
Nível de Alerta II	50	23,9	0	0
<b>OMS</b>	<b>Quantil</b>	<b>Clorofila-a</b>	<b>Amostras (n) exceção</b>	<b>Amostras (%) exceção</b>
Nível de Alerta I	50	4,4	9	28
Nível de Alerta II	50	132,0	0	0

Como foi utilizado os valores para densidade de cianobactérias definidos pelo MS para categorizar os pontos amostrais, nenhuma amostra excedeu os níveis de alerta propostos pelo MS. Para os níveis de alerta propostos pela OMS, as amostras

que excederam esses limites estavam dentro do percentual previsto pelo modelo (50% de exceção).

A Tabela 10 indica para a Categoria II o percentual de amostras que excederam os níveis de alerta propostos (MS e OMS). Considerando os níveis de alerta do MS, o percentual de amostras que excederam esses limites estava abaixo do percentual de exceção previsto pelo modelo (40%). Para o nível de alerta I da OMS, o percentual de amostras que excederam esse limite foi de 48%, acima do percentual de exceção previsto pelo modelo.

Tabela 10: Percentual de amostras que excederam os níveis de alerta propostos (MS e OMS) de acordo a concentração de clorofila-a determinada para o quantil 60 (Q60).

<b>MS</b>	<b>Quantil</b>	<b>Clorofila-a</b>	<b>Amostras (n) exceção</b>	<b>Amostras (%) exceção</b>
Nível de Alerta I	60	6,5	21	30
Nível de Alerta II	60	15,4	12	11
<b>OMS</b>	<b>Quantil</b>	<b>Clorofila-a</b>	<b>Amostras (n) exceção</b>	<b>Amostras (%) exceção</b>
Nível de Alerta I	60	4,4	23	48
Nível de Alerta II	60	61,0	9	5%

A Tabela 11 indica, para a Categoria III, o percentual de amostras que excederam os níveis de alerta propostos (MS e OMS). Considerando os níveis de alerta do MS, o percentual de amostras que excederam esses limites estava dentro do percentual de exceção previsto pelo modelo (15%). Considerando os níveis de alerta da OMS, o percentual excedente no nível de alerta I ficou acima do esperado pelo modelo. Tal resultado relaciona-se ao baixo número de amostras dentro da categoria com concentração de clorofila-a até 1,3µg/L (n=2) o que fez com que apenas uma amostra acima de 5.000cel/mL acarretasse o percentual excedido esperado.

Tabela 11: Percentual de amostras que excederam os níveis de alerta propostos (MS e OMS) de acordo a concentração de clorofila-a determinada para o quantil 80 (Q80).

<b>MS</b>	<b>Quantil</b>	<b>Clorofila-a</b>	<b>Amostras (n) exceção</b>	<b>Amostras (%) exceção</b>
Nível de Alerta I	80	2,7	1	14
Nível de Alerta II	80	5,5	2	13
<b>OMS</b>	<b>Quantil</b>	<b>Clorofila-a</b>		
Nível de Alerta I	80	1,3	1	50
Nível de Alerta II	80	16,7	0	0

A Tabela 12 indica, para a Categoria IV, o percentual de amostras que excederam os níveis de alerta propostos (MS e OMS). Considerando os níveis de alerta do MS, o percentual de amostras que excederam esses limites estava acima do percentual de exceção previsto pelo modelo (15%), com exceção do nível de alerta II (OMS) que apresentou 12% de amostras excedentes.

Tabela 12: Percentual de amostras que excederam os níveis de alerta propostos (MS e OMS) de acordo a concentração de clorofila-a determinada para o quantil 50 (Q50).

<b>MS</b>	<b>Quantil</b>	<b>Clorofila-a</b>	<b>Amostras (n) exceção</b>	<b>Amostras (%) exceção</b>
Nível de Alerta I	80	2,7	6	20
Nível de Alerta II	80	5,5	11	17
<b>OMS</b>	<b>Quantil</b>	<b>Clorofila-a</b>	<b>Amostras (n) exceção</b>	<b>Amostras (%) exceção</b>
Nível de Alerta I	80	1,3	3	50
Nível de Alerta II	80	16,7	9	10

Nossos resultados indicam que os percentuais de exceção determinados pelos modelos quantílicos para cada categoria de risco foram atendidos de maneira satisfatória.

Pequenas variações foram encontradas para a categoria IV considerando os níveis de alerta propostos pelo MS. Porém, conforme relatado anteriormente, tal fato pode estar relacionado à baixa contribuição de clorofila-a por célula (quota celular) nos ambientes lênticos, o que ocasionou o fato de que mais amostras apresentassem altos valores para densidade de cianobactéria com baixa concentração de clorofila-a.

Portanto, consideramos o percentual de exceção satisfatório e está de acordo com risco assumido para esses ambientes.

Para o nível de alerta I proposto pela OMS, somente a Categoria I apresentou percentuais de exceção dentro do limite esperado. Para todas as outras o percentual de amostras excedente extrapolou os percentuais determinados. Esses resultados ficam mais evidentes para as Categorias III e IV e pode ser devido à baixa concentração de clorofila-a determinada para essas categorias por meio dos modelos quantílicos (1,3 µg/L), muito próxima à concentração mínima de clorofila-a utilizada na construção dos modelos (1,0 µg/L). Para o nível de alerta II da OMS todas as categorias apresentaram percentual de exceção dentro do determinado pelos modelos.

### 5. 3 Proposta para utilização das concentrações de clorofila-a determinadas pelos modelos quantílicos no monitoramento de cianobactérias

Em decorrências dos potenciais efeitos à saúde humana ocasionados pela exposição à cianotoxinas por meio da água de abastecimento a Organização Mundial da Saúde (OMS) propõe o monitoramento de cianobactérias escalonado em diversos níveis de alerta. Os níveis de alerta propostos são baseados na contagem de células de cianobactérias (ou seu biovolume) e na concentração de clorofila-a.

No Brasil, o Ministério da Saúde incorpora os valores propostos pela OMS na Portaria de Potabilidade (Portaria GM/MS nº888/2021) para o monitoramento de mananciais superficiais utilizados para abastecimento público. Essa Portaria permite que o monitoramento seja realizado, a nível de vigilância, tanto por meio da densidade de cianobactérias como da concentração de clorofila-a. Porém, somente uma concentração limite de clorofila-a é definida (10,0 µg/L), independentemente dos resultados da série histórica ou da probabilidade de ocorrência de florações (densidade de cianobactéria igual ou superior a 10.000 ou 20.000 cel/mL).

A presente proposta de monitoramento baseia-se nos níveis de alerta preconizados pelo Ministério da Saúde (Portaria GM/MS 888/2021), incorporando valores para concentração de clorofila-a que se relacionam com o risco associado

(probabilidade) à ocorrência de florações de cianobactérias. Quanto maior a probabilidade de ocorrência desses eventos, maior o risco e, portanto, menor a concentração de clorofila-a a ser considerada para efeitos de tomada de decisão (confirmação por microscopia da presença de cianobactérias, ensaios para quantificação de cianotoxinas, medidas operacionais como a remoção de células nas estações de tratamento).

### 5.3.1 Mananciais lóticos sem histórico de ocorrência de florações

O fluxograma para monitoramento de mananciais lóticos sem histórico de ocorrência de florações está descrito na Figura 15.

#### Nível de vigilância:

A amostragem para determinação da concentração de clorofila-a no manancial deverá ser realizada mensalmente. Caso a concentração determinada seja igual ou inferior a 10 µg/L, o monitoramento poderá continuar a ser realizado através desse parâmetro e nessa frequência. Caso a concentração de clorofila-a seja superior a 10 µg/L e inferior a 24 µg/L, deve-se realizar análise para identificação e quantificação de cianobactérias. Se a concentração de clorofila-a extrapolar o valor de 24 µg/L, além da identificação e quantificação de cianobactérias deve-se realizar a análise para quantificação de cianotoxinas da água bruta.

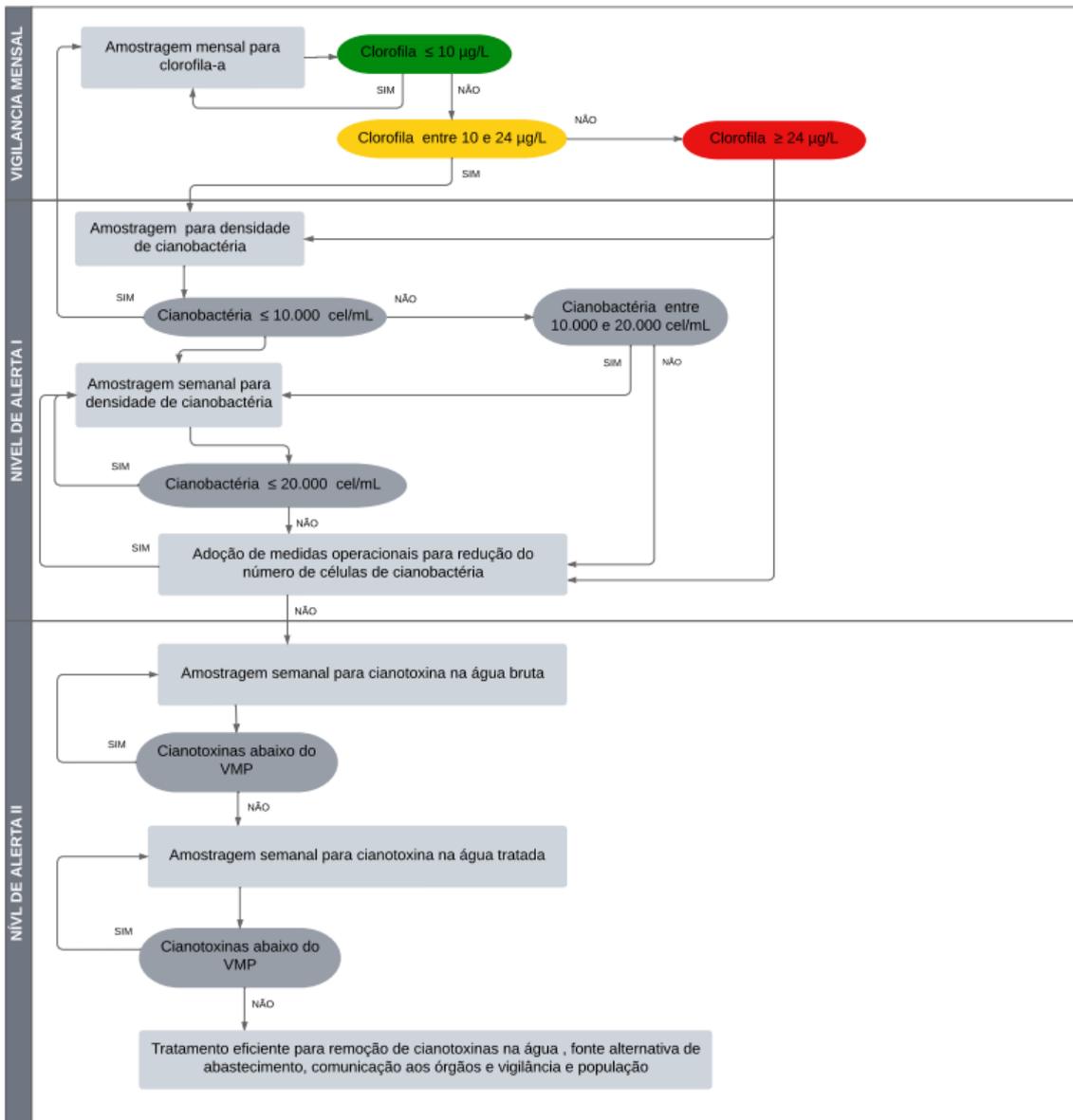
#### Nível de alerta 1:

Se a análise de cianobactérias identificar uma concentração inferior a 10.000 cel/mL, o monitoramento por concentração de clorofila-a pode ser recommçado. Caso indique uma concentração de cianobactérias igual ou superior a 10.000 cel/mL e inferior a 20.000 cel/mL, a frequência de monitoramento deverá ser alterada para semanal.

#### Nível de alerta 2:

Se a concentração for superior ou igual a 20.000 cel/mL, o monitoramento de cianotoxinas na água bruta deverá ser iniciado. Caso ultrapasse os valores máximos permitidos, o monitoramento deverá se estender à água tratada, também em frequência semanal.

Figura 15: Fluxograma para proposta de monitoramento de cianobactérias em sistema de abastecimento de água potável – Mananciais lóticos sem histórico de ocorrência de cianobactérias.



### 5.3.2 Mananciais lóticos com ocorrência anual de florações de até 50% das amostras.

O fluxograma para monitoramento de mananciais lóticos com ocorrência anual de florações de até 50% das amostras está descrito na Figura 16.

#### Nível de vigilância:

A amostragem para determinação da concentração de clorofila-a no manancial deverá ser realizada mensalmente. Caso a concentração determinada seja igual ou inferior a 6,5 µg/L, o monitoramento poderá continuar a ser realizado através desse parâmetro e na frequência determinada. Caso a concentração de clorofila-a seja superior a 6,5 µg/L e inferior a 10,0 µg/L, deve-se alterar a frequência de amostragem para semanal e se estiver entre 10,0 e 15,0 µg/L deverá ser realizada a identificação e contagem de cianobactérias. Se a concentração de clorofila-a extrapolar o valor de 15,5 µg/L, além da identificação e quantificação de cianobactérias deve-se realizar a análise para quantificação de cianotoxinas da água bruta.

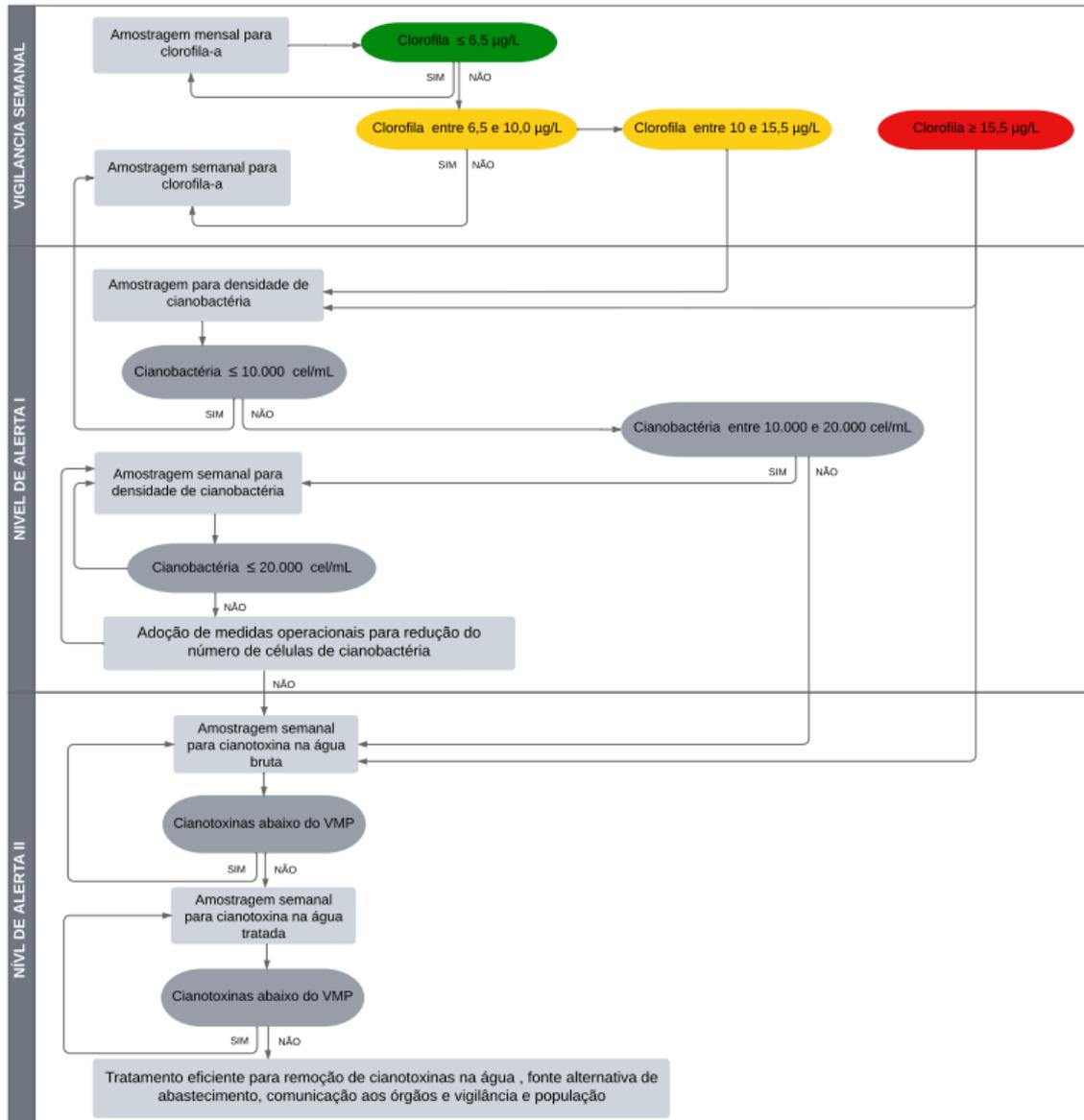
#### Nível de alerta 1:

Se a análise de cianobactérias identificar uma concentração inferior a 10.000 cel/mL, o monitoramento por concentração de clorofila-a pode ser recommçado. Caso indique uma concentração de cianobactérias igual ou superior a 10.000 cel/mL e inferior a 20.000 cel/mL, a frequência de monitoramento deverá ser alterada para semanal.

#### Nível de alerta 2:

Se a concentração for superior ou igual a 20.000 cel/mL, o monitoramento de cianotoxinas na água bruta deverá ser iniciado. Caso ultrapasse os valores máximos permitidos, o monitoramento deverá se estender à água tratada, também em frequência semanal.

Figura 16: Fluxograma para proposta de monitoramento de cianobactérias em sistema de abastecimento de água potável – Ambientes lóticos com ocorrência anual de florações em até 50% das amostras.



5.3.3 Mananciais lóticos com ocorrência anual de florações acima de 50% das amostras e mananciais lênticos.

O fluxograma para monitoramento de mananciais com ocorrência anual acima de 50% das amostras está descrito na Figura 17.

#### Nível de vigilância:

A amostragem para determinação da concentração de clorofila-a no manancial deverá ser realizada semanalmente. Caso a concentração determinada seja igual ou inferior a 2,7 µg/L, o monitoramento poderá continuar a ser realizado através desse parâmetro e na frequência definida. Caso a concentração de clorofila-a seja superior a 2,7 µg/L e inferior a 5,5 µg/L, deverá ser realizada a identificação em contagem de cianobactérias. Se a concentração de clorofila-a estiver entre de 5,5 e 16,7 µg/L, além da identificação e quantificação de cianobactérias deverá ser realizada a análise para quantificação de cianotoxinas da água bruta. Caso a concentração de clorofila-a ultrapasse a concentração de 16,7 µg/L, além da identificação e quantificação de cianobactérias deverá ser realizada a análise para quantificação de cianotoxinas da água tratada.

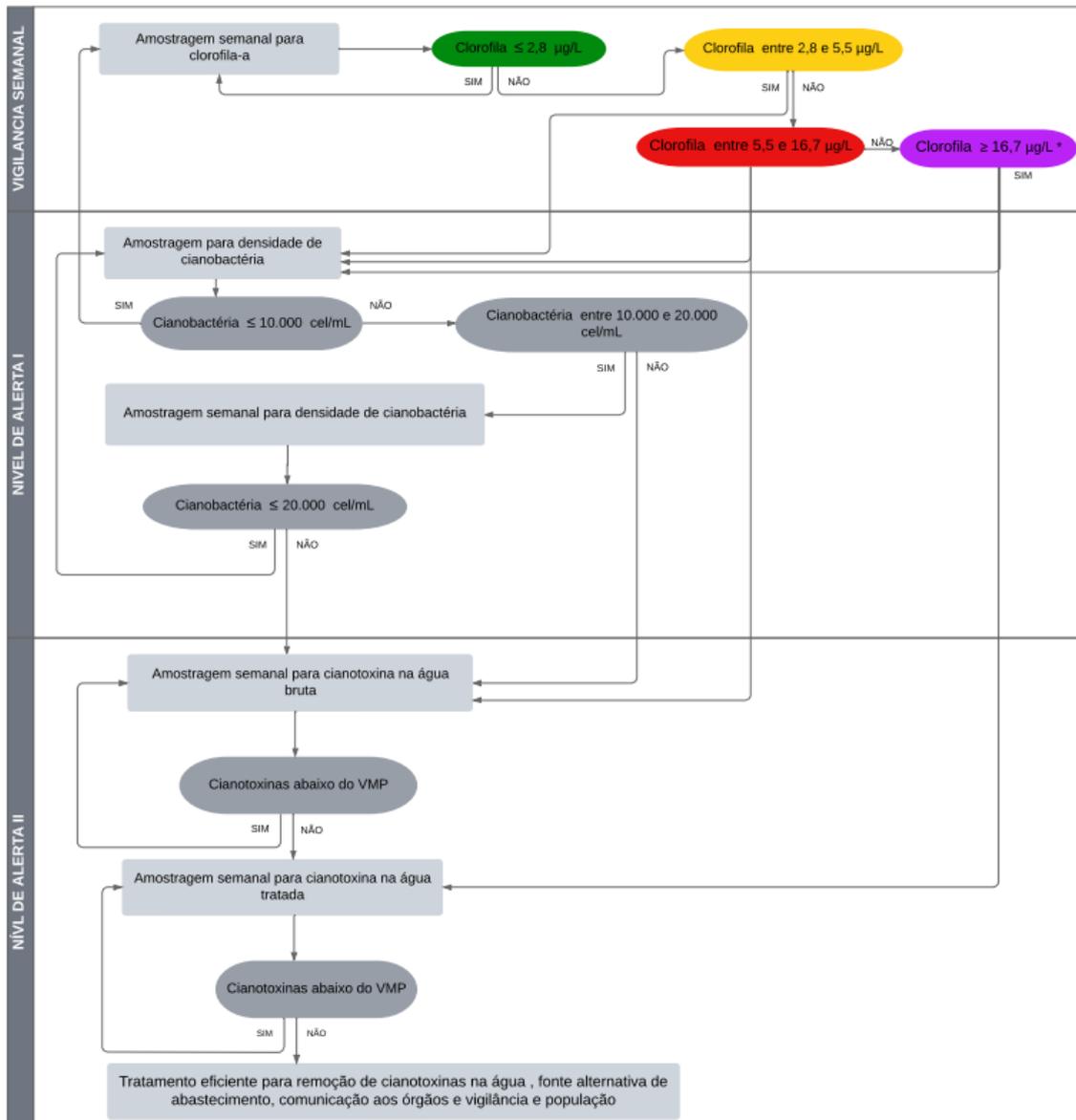
#### Nível de alerta 1:

Se a análise de cianobactérias identificar uma concentração inferior a 10.000 cel/mL, o monitoramento por concentração de clorofila-a pode ser recomeçado. Caso indique uma concentração de cianobactérias igual ou superior a 10.000 cel/mL e inferior a 20.000 cel/mL, a frequência de monitoramento deverá ser alterada para semanal.

#### Nível de alerta 2:

Se a concentração for superior ou igual a 20.000 cel/mL, o monitoramento de cianotoxinas na água bruta deverá ser iniciado. Caso ultrapasse os valores máximos permitidos, o monitoramento deverá se estender à água tratada, também em frequência semanal.

Figura 17: Fluxograma para proposta de monitoramento de cianobactérias em sistema de abastecimento de água potável – Ambientes lóticos com ocorrência anual de florações acima de 51% das amostras e ambientes lênticos.



Através dos resultados apresentados, fica evidente a importância de se determinar valores para concentração de clorofila-a que podem ser utilizados, principalmente em nível de vigilância, como indicadores de florações de cianobactérias em água para abastecimento público. Nesse contexto, a escolha da ferramenta metodológica utilizada para o monitoramento de cianobactérias deve levar em consideração a sensibilidade do método (limites de quantificação), assim como tempo de análise e custo.

Foi realizada uma pesquisa com laboratórios que realizam análise da concentração de clorofila-a e densidade de cianobactérias, afim de que pudéssemos verificar o tempo necessário para a emissão do relatório de ensaio (resultado), contado a partir do recebimento da amostra. Foi solicitado, além do prazo analítico, o limite de quantificação (LQ) e o valor da análise. Os resultados estão na Tabela 13.

Tabela 13: Limite de quantificação (LQ), valor do ensaio e prazo para emissão de resultado para as análises de concentração de clorofila-a e densidade de cianobactérias

	LAB A	LAB B	LAB C
<b>Densidade de cianobactérias</b>			
Limite de quantificação (LQ)	-	1,0 cel/mL	1,0 cel/mL
Valor (R\$)	60,00	460,00	250,00
Prazo	7 dias	21 dias	8 dias
<b>Concentração de clorofila-a</b>			
Limite de quantificação (LQ)	-	0,01 µg/L	0,6 µg/L
Valor (R\$)	85,00	120,00	73,00
Prazo	7 dias	21 dias	8 dias
<b>Concentração de cianotoxinas</b>			
Limite de quantificação (LQ)	-	0,1 µg/L	0,1 µg/L
Valor (R\$)	-	460,00	1.050,00
Prazo	7 dias	21 dias	8 dias

\* Valor referente à determinação da concentração individual das três cianotoxinas preconizadas pelo MS (microcistina, saxitoxina e cilindrospermopsina).

Como pode ser verificado, o prazo para emissão do Relatório de Ensaio variou de 7 a 21 dias (LAB A e LAB B, respectivamente). Apesar de apresentar o menor prazo analítico, o Laboratório A não informa o LQ o que pode deixar dúvidas quanto aos critérios de aceitação e controle de qualidade definidos pelo laboratório. Para a determinação da concentração de cianotoxinas, o LAB B apresenta o menor valor para a análise comparado ao LAB C, porém o prazo para emissão do Relatório de Ensaio é mais longo (3 semanas). Todos esses critérios devem ser levados em consideração no momento de se contratar um laboratório para a realização das análises.

De acordo com o monitoramento preconizado pelo Ministério da Saúde (MS, 2021), caso a concentração de clorofila-a seja superior à 10µg/L, o responsável deve confirmar a presença de cianobactérias na amostra por microscopia (densidade).

Somente após essa confirmação, a frequência de monitoramento é alterada e outras medidas operacionais são tomadas.

Considerando os prazos enviados pelos laboratórios, o tempo decorrido entre o resultado para concentração de clorofila-a e a posterior confirmação da densidade de cianobactérias, sem contar o tempo de transporte da amostra até o laboratório, seria de 14 dias (LAB A), podendo chegar a 42 dias (LAB B). Caso a densidade de cianobactéria determinada esteja acima de 20.000 cel/mL, seriam necessários mais 21 dias (LAB B) para o resultado da concentração de cianotoxinas.

Com relação aos valores cobrados para a realização das análises, o LAB A apresentou os menores orçamentos. Porém, esse é o único que não apresenta os parâmetros acreditados junto à CGCRE na norma ISO 17025. A ISO 17025 é uma norma internacional que estabelece os requisitos gerais para a competência de laboratórios de ensaio e calibração. Ela define os critérios que um laboratório deve atender para demonstrar sua capacidade de produzir resultados técnicos válidos e confiáveis.

## 6. DISCUSSÃO

Para avaliar a relação entre a densidade de cianobactérias e a concentração de clorofila-a, inicialmente realizou-se a regressão linear simples. Apesar de significativamente relacionadas, essa relação mostrou-se muito fraca ( $r^2=0,2700$ ), ou seja, somente 7,3% da variabilidade da densidade de cianobactérias pode ser atribuída à concentração de clorofila-a e 92,7% pode ser atribuída a qualquer outro fator. Como os dados foram log transformados anteriormente à aplicação do teste estatístico, o intervalo de confiança determinado variou entre 4% e 2.300%, acarretando em pouca precisão do modelo e inviabilizando-o para a predição de valores para densidade de cianobactéria a partir de concentrações estimadas de clorofila-a.

Alguns trabalhos aplicaram a regressão linear para estimar valores para concentração ou biomassa de cianobactérias a partir da concentração de clorofila-a e encontraram também uma fraca relação entre essas variáveis (Marino, 2017; Søndergaard et al, 2016). Trabalhos onde a relação encontrada foi forte, na maioria

das vezes, foram realizados com monocultura e em ambiente controlado (Malhota; Örmeci 2023; Oliveira; Örmeci 2020; Quevedo-Castro et al 2019; Hotos et al 2020).

A partir dessas constatações, aplicou-se o modelo de regressão quantílica que, diferentemente da regressão linear simples, que tem seus estimadores concentrados na média condicional, apresenta uma visão mais abrangente, permitindo uma análise a partir da distribuição dos dados e suas partes (quantis) e desta forma avalia o impacto de uma covariável em toda a distribuição da variável resposta, e não apenas na sua média.

Essa característica da regressão quantílica é muito interessante, e permite que seja usada em análises de risco: os valores acima do quantil considerado é equivalente à exceção da distribuição da variável resposta no modelo proposto, assim como o valor do quantil equivale ao risco associado àquela distribuição. Para os nossos dados, podemos estimar qual o risco associado ao nosso conjunto amostral de apresentar valores para densidade de cianobactérias quando uma concentração de clorofila-a é determinada.

Todos os modelos extraídos dos nossos dados utilizando-se a regressão quantílica foram significativos, com os de melhores ajustes nos quantis Q50 (mediana), Q60, Q80 e Q85. Esses modelos indicaram concentrações limites de concentração de clorofila-a, abaixo das quais as probabilidades de ocorrência de florações de cianobactérias podem ser reduzidas. Nossos resultados indicaram que, em ambientes lênticos ou ambientes lóticos com ocorrência de floração anual acima de 50%, amostras com concentrações de clorofila-a de até 2,7 µg/L existe 20% de probabilidade de ocorrer densidades de cianobactérias acima de 10.000 cel/mL e se essa concentração se elevar para 6,5 µg/L a probabilidade desse evento ocorrer é de 40%.

Gau e colaboradores (2020) utilizaram a regressão quantílica para verificar a relação entre a concentração de clorofila-a e a alteração temporal de biomassa algal no rio Pearl (Pearl River – China), importante para a pesca local. Os autores encontraram uma tendência na diminuição do fitoplâncton em relação ao tempo, sugerindo uma diminuição na produtividade primária local.

Sutula e colaboradores (2018) utilizaram a regressão quantílica para relacionar a abundância de cianobactérias e a concentração de oxigênio dissolvido com a

concentração de clorofila-a. Os resultados encontrados indicaram que houve um aumento do risco de ocorrência de florações de cianobactérias e também da diminuição do oxigênio dissolvido, caso ocorresse um aumento na concentração de clorofila-a e que o valor limite que ultrapassaria os padrões de balneabilidade seria de  $13 \text{ mg/m}^3$  ( $13 \text{ } \mu\text{g/L}$ ).

Conforme descrito acima, quanto maior o quantil utilizado para estimar valores limites para a variável preditora, menor o risco de ocorrência de um evento. Sendo assim, consideramos a concentração de clorofila-a determinada no Q50 como indicadora de baixo risco para exceção dos níveis de alerta, assim como o Q60 e Q80 para médio e alto risco de exceção, respectivamente. Para os nossos dados, as concentrações de clorofila-a definidas para esses quantis foram de 11,3, 6,5 e 2,7  $\mu\text{g/L}$  (Q50, Q60 e Q80, respectivamente), considerando o nível de alerta 1 (MS) e 23,9, 15,4 e 5,5  $\mu\text{g/L}$  (Q50, Q60 e Q80, respectivamente), considerando o nível de alerta 2 (MS).

A maioria dos países utilizam somente a densidade/biovolume de cianobactérias presentes na água bruta utilizada para abastecimento ou as concentrações de cianotoxinas, principalmente microcistina, para avaliação da qualidade da água potável. É o caso da Austrália (NHMRC; NRMCC 2022), Canadá (Health Canada, 2024), Nova Zelândia (Taumata Arowai, 2023) e África do Sul (SABS/TC, 2024). A concentração de clorofila-a, quando utilizada, é para avaliar o risco associado à qualidade da água para fins recreacionais, como Alemanha, Hungria, Escócia, Singapura, Turquia (Ibelings et al, 2014).

Os países que utilizam a concentração de clorofila-a em nível inicial de monitoramento juntamente com a avaliação da presença de cianobactérias na água bruta são, além do Brasil, a República Tcheca e a Turquia. Na República Tcheca, o nível de alerta 1 é caracterizado por densidade de cianobactéria maior ou igual a 2.000 cel/mL ou concentração de clorofila-a maior ou igual a 1  $\mu\text{g/L}$  e o nível de alerta 2 é caracterizado por densidade de cianobactéria maior ou igual a 100.000 cel/mL ou concentração de clorofila-a maior ou igual a 10  $\mu\text{g/L}$ . A Turquia apresenta somente um nível de alerta, caracterizado por densidade de cianobactérias igual ou superior a 5.000 cel/mL ou concentração de clorofila-a igual ou superior a 1  $\mu\text{g/L}$  (Ibelings et al, 2014).

Para Ibelings e colaboradores (2014), o monitoramento de mananciais utilizados para abastecimento quando realizado em níveis de alerta crescente e baseados na ocorrência (número de células de cianobactérias ou biovolume) é mais seguro comparado à quantificação direta da concentração de cianotoxinas na água tratada e seus limites máximos permitidos. Segundo os autores, tal fato decorre, principalmente pela possibilidade de prever, com certo grau de segurança, a ocorrência de florações e conseqüentemente o aumento da concentração de cianotoxinas presentes e ao fato de que as cianotoxinas são predominantemente intracelulares, principalmente a microcistina, o que poderia subestimar a concentração desses compostos presentes na água.

Ainda segundo esses autores e Chorus e Welker (2021), muito além das abordagens utilizadas para o monitoramento de cianobactérias e conseqüentemente cianotoxinas na água de abastecimento, o que deve direcionar as ações e protocolos locais para garantir a qualidade da água distribuída é a avaliação de risco, onde deve-se levar em consideração a probabilidade de ocorrência do perigo (presença de cianotoxinas) em relação à gravidade do seu impacto na saúde humana.

Neste trabalho, o risco avaliado levou em consideração a ocorrência dos eventos de floração de cianobactérias e não a quantificação das concentrações de cianotoxinas (perigo), já que esses dados não estavam disponíveis. Como as concentrações de clorofila-a determinadas nos modelos quantílicos deveriam ser relacionadas ao risco de ocorrência de floração, os dados utilizados foram categorizados em mananciais lóticos e lênticos. Como esperado, a maioria dos mananciais lóticos apresentou baixa frequência de ocorrência de florações, ocorrendo o contrário para ambientes lênticos. Nossos resultados também indicaram uma elevada concentração de clorofila-a em mananciais lóticos, apesar da baixa ocorrência de florações de cianobactérias nesses ambientes, sugerindo que a produção de clorofila-a nesses ambientes relaciona-se a outros organismos fitoplanctônicos que não cianobactérias. Esses resultados, portanto, justificaram a classificação dos dados em categorias de risco distintas: a de mais baixo risco para ambientes lóticos sem ocorrência de floração de cianobactérias e mais alto risco para ambientes lênticos e lóticos com alta frequência de ocorrência de floração de cianobactérias.

Nossos resultados são semelhantes aos reportados por Aguilera e colaboradores (2018) em um trabalho sobre ocorrência de florações de cianobactérias

na Argentina. Os autores reportam que para os rios (mananciais lóticos), 44% das florações estão dentro do nível 1 de orientação da OMS, enquanto 30% excederam o nível 2 de alerta. Em mananciais lênticos, a ocorrência de florações acima do nível de alerta 2 atingiu 50%, o que implica em um alto risco de exposição em lagos e represas usados para fins de abastecimento e recreação.

Quando as concentrações de clorofila-a determinadas pelos modelos quantílicos foram aplicadas ao grupo pertencente a cada categoria, o percentual de amostras que extrapolaram os limites de alerta apresentou-se dentro do esperado (50%, 40% e 20%) para os níveis de alerta MS, com exceção para ambientes lênticos. Tal resultado pode estar relacionado à possível presença de picocianobactérias nesses ambientes como as do gênero *Aphanocapsa*, *Aphanothece* e *Microcystis* (Lenora et al, 2011; Campos et al, 2024; Figueiredo et al, 2016). Considerando-se que o volume celular tem implicações significativas na produção de clorofila-a pelas células, indivíduos com volumes maiores contribuem mais significativamente com a concentração de clorofila-a comparados à indivíduos com volumes menores. Por exemplo, Dias et al (2021) descrevem uma célula de *Microcystis aeruginosa* com  $1,8 \mu\text{m}^3$  enquanto uma célula de *Dolichospermum crassum* com  $412 \mu\text{m}^3$ .

Para o nível de alerta I (OMS) e para todos os modelos quantílicos testados, o percentual de amostras que extrapolou os limites definidos ficou acima do esperado. Tal fato pode estar relacionado à baixa densidade de cianobactérias considerada como limite nesse nível de alerta (5.000 cel/mL) assim como as baixas concentrações de clorofila-a determinadas para cada modelo. Para o Q80, a concentração limite de clorofila-a foi de  $1,3 \mu\text{g/L}$ , muito próxima do limite inferior dos dados utilizados na construção do modelo ( $1,0 \mu\text{g/L}$ ), o que fez com que poucas amostras fossem testadas nesse grupo e qualquer uma que apresentasse densidade de cianobactéria acima do 5.000 cel/mL elevaria significativamente o percentual excedido.

Izydorczyk e colaboradores (2009) procuraram determinar níveis de alerta local (Polônia) a partir da concentração de clorofila-a para eventos de florações de cianobactérias. A concentração de clorofila-a determinada pelos autores para o nível de alerta da OMS (5.000 cel/mL) foi de  $4,9 \mu\text{g/L}$  de clorofila-a. Porém, para a quantificação da concentração de clorofila-a foi utilizado um fluorímetro que permite, a partir de uma amostra ambiental, quantificar a concentração de clorofila-a oriunda somente de cianobactérias.

Portanto, de acordo com nossos resultados, a concentração de clorofila-a determinada pelo Ministério da Saúde para o monitoramento de cianobactérias ( $\leq 10\mu\text{g/L}$ ) aplica-se de maneira eficaz somente a mananciais lóticos sem ocorrência de florações, no Estado de Minas Gerais. Para mananciais onde a ocorrência de floração é mais frequente, principalmente os do tipo lântico, a concentração de clorofila-a como ferramenta para antever esses eventos deve ser menor, além de ter sua frequência de monitoramento aumentada.

A OMS recomenda uma concentração de clorofila-a de  $1\mu\text{g/L}$  para o nível de vigilância. De acordo com os modelos desenvolvidos, uma amostra com essa concentração apresentaria uma baixa probabilidade de exceder o nível de alerta ( $5.000\text{ cel/mL}$ ). Quando os parâmetros utilizados como níveis de alerta (para este trabalho, concentração de clorofila-a e densidade de cianobactérias) apresentam valores muito baixos (como a concentração de  $1\mu\text{g/L}$  para clorofila-a citada anteriormente), esbarramos na questão crucial que é a sensibilidade do método e confiabilidade do resultado analítico.

De maneira geral, para implantação de métodos mais sensíveis e específicos há necessidade de maior investimento, treinamento de pessoal qualificado e custos operacionais, acarretando muitas vezes em um longo tempo para emissão do resultado. De outra forma, métodos menos sensíveis e seletivos podem fornecer resultados em um curto intervalo de tempo, variável essencial em situações em o resultado analítico desencadeia ações imediatas para o gerenciamento do risco.

Caso a análise de clorofila-a seja realizada pela empresa de saneamento em laboratório próprio e próximo aos mananciais de abastecimento (laboratório local ou núcleos distritais), o tempo entre recepção de amostra e emissão do resultado pode ser muito reduzido. A determinação de clorofila-a pelo método espectrofotométrico (ISO, 1992) pode ser realizada em equipamentos com capacidade analítica de até 6 amostras simultâneas e todo o processo (filtração, extração à quente do pigmento, leitura das absorvâncias e cálculo da concentração de clorofila-a) pode ser realizado em até 1 hora.

Para a análise da determinação da densidade de cianobactérias (APHA, 2021), caso a empresa de saneamento possua laboratório próprio, o tempo necessário para a emissão do relatório de ensaio é menor, comparado à laboratórios terceirizados, mas não tão expressivo quanto verificado para a determinação de clorofila-a. Pela complexidade analítica, esses laboratórios, mesmo próprios, estão localizados nas

grandes cidades atendidas, o que amplia o tempo entre a amostragem e o início do processo analítico. Após a recepção da amostra, a mesma precisa ser submetida ao processo de sedimentação por no mínimo 20 horas, para só depois ser realizada a contagem e identificação dos organismos ali presentes. A identificação e contagem de cianobactérias é um processo demorado, mesmo quando realizado por analistas experientes, e que pode levar aproximadamente 2 horas, dependendo da complexidade da amostra.

Chorus e Welker (2021) enfatizam que, independentemente do parâmetro utilizado para avaliar a presença de cianotoxinas na água, os resultados devem ser confiáveis o bastante para orientar as tomadas de decisão e que todas as metodologias devem ser acompanhadas por um controle de qualidade e desempenhados por profissional treinado e qualificado.

De acordo com a Portaria GM/MS nº888/2021 (Brasil, 2021), as análises laboratoriais para controle de qualidade da água para abastecimento devem ser realizadas em laboratórios onde se comprove a existência de um programa de gestão da qualidade, conforme especificado na NBR ISO/IEC 17025.

A ISO 17025 é uma norma internacional que define os requisitos para a competência de laboratórios de ensaio e calibração. Ela é elaborada pela Organização Internacional de Normalização (ISO) e é reconhecida globalmente como um padrão para assegurar a qualidade e a consistência dos resultados laboratoriais (ISO, 2017).

Quando comparamos o limite de quantificação (sensibilidade do método), tempo para emissão do resultado e valor cobrado por laboratórios que executam as análises de densidade de cianobactérias e concentração de clorofila-a, percebemos uma grande variabilidade desses fatores. O laboratório A foi o que apresentou menor tempo e valor para análise, porém, sequer forneceu o limite de quantificação dos métodos e não possui acreditação NBR ISO/IEC 17025. O Laboratório C, acreditado na NBR ISO/IEC 17025, é o que apresenta menor limite de quantificação para concentração de clorofila-a, indicando uma maior sensibilidade analítica, porém o tempo para emissão do resultado é excessivamente longo, o que compromete as decisões para gestão do risco orientadas por esses resultados.

Portanto, não somente a escolha dos parâmetros utilizados, mas também a qualidade do resultado e o tempo analítico devem ser considerados para a implantação do programa de monitoramento.

Para efeitos da aplicabilidade dos modelos de monitoramento propostos nesse trabalho e o tempo para emissão dos resultados informado pelos laboratórios consultados, sugerimos uma situação fictícia: um manancial lótico com baixa frequência de ocorrência de florações de cianobactérias (Categoria II) é monitorado mensalmente pela concentração de clorofila-a, sendo as análises realizadas por laboratório terceirizado e localizado a uma distância de 200km (Laboratório B). Apesar do histórico de ocorrência de florações de cianobactérias, o programa de monitoramento segue o determinado pela Portaria GM/MS nº888/2021 para concentração de clorofila-a, onde somente resultado igual ou superior a 10µg/L determina a confirmação da presença de cianobactérias para densidade igual ou superior a 10.000 cel/mL nesse manancial.

Uma sequência de monitoramento indicou concentrações mensais crescentes para clorofila-a: 5,1 µg/L, 5,8 µg/L, 6,7 µg/L, 8,9 µg/L e 16 µg/L. O último resultado analítico emitido por esse laboratório indicou a concentração de 16 µg/L na amostra, acima, portanto, do limite de vigilância proposto. A coleta dessa amostra ocorreu 9 dias antes da emissão do resultado (1 dia para transporte e 8 para análise). A empresa responsável pelo abastecimento coletou uma segunda amostra para confirmação da presença de cianobactérias e o resultado analítico ficou disponível após outros 9 dias (1 dia para transporte e 8 para análise). O resultado indicou a presença de 37.000 cel/mL nessa amostra. De acordo com o preconizado pelo Ministério da Saúde, uma nova amostragem deve ser realizada para quantificação da concentração de cianotoxinas na água bruta. Uma outra amostra foi enviada e após outros 9 dias o resultado indicou uma concentração de 1,5 µg/L de microcistina na água bruta. A estação de tratamento abastecida por esse manancial não apresenta equipamento/solução para remoção eficiente de células de cianobactérias e cianotoxinas na água. Desde a identificação do risco (concentração de clorofila-a acima de 10µg/L) e a confirmação da presença de cianotoxinas acima dos limites permitidos, passou-se 27 dias. Tempo suficiente para colocar a saúde da população abastecida por esse manancial em risco, além do fato de a amostra não ser mais representativa do manancial (ela já foi captada, tratada e liberada para consumo).

Caso esse manancial fosse monitorado de acordo com concentrações de clorofila-a propostas nesse trabalho para a categoria de risco determinada (Categoria II), quando o resultado emitido pelo laboratório indicasse uma concentração de 6,7 µg/L na amostra, a frequência de amostragem seria alterada para semanal e com um

resultado de 16 µg/L de clorofila-a, juntamente com a amostra para confirmação da densidade de cianobactéria já seria coletada uma segunda amostra para quantificação de cianotoxinas. Considerando a alteração para monitoramento semanal, esse evento poderia ter sido identificado com pelo menos com 3 semanas de antecedência. Com o envio concomitante da amostra para análise da densidade de cianobactérias e concentração de cianotoxinas, a redução do tempo analítico de 18 para 9 dias. A previsão do aumento da densidade de cianobactérias através do monitoramento com concentrações mais baixas de clorofila-a e em maior frequência nesse tipo de manancial, poderia proporcionar mais tempo aos gestores para que medidas de mitigação e controle do risco pudessem ser implementadas, diminuindo o risco associado à presença de cianotoxinas na água destinada ao abastecimento.

## 7 CONCLUSÃO

O monitoramento é um componente primordial na avaliação e quantificação dos riscos. Como não é possível monitorar todo o manancial o tempo todo, o programa de monitoramento para um sistema de abastecimento de água deve ser estruturado de uma maneira que os dados gerados sejam interpretados e utilizados de forma a identificar os riscos associados a esses resultados e que façam parte dos processos de tomada de decisão. O monitoramento da qualidade não pode evitar que água fora dos padrões estabelecidos seja fornecida aos consumidores. Um monitoramento adequado e eficiente diminui o risco associado ao consumo de água fora dos padrões de qualidade.

Nossos resultados indicaram uma correlação positiva e estatisticamente significativa entre a concentração de clorofila-a e densidade de cianobactérias para o conjunto de dados utilizados.

Os resultados obtidos na Regressão linear simples indicaram uma alta amplitude para valores preditos de cianobactérias a partir de uma única concentração de clorofila-a (variação de 4 a 2.300%), não sendo, portanto, um modelo útil para determinação da densidade de cianobactérias a partir da concentração de clorofila-a.

As concentrações de clorofila-a determinadas por meio da regressão quantílica e que se relacionam aos níveis de risco de ocorrência de florações de cianobactérias,

considerando os níveis de alerta preconizados pelo Ministério da Saúde (MS, 2021) e Organização Mundial da Saúde (OMS, 2021) foram:

a) Ministério da Saúde:

- Nível de alerta I ( $\geq 10.000$  cel/mL): 11,3  $\mu\text{g/L}$ , 6,5  $\mu\text{g/L}$  e 2,7  $\mu\text{g/L}$  de clorofila-a para mananciais com baixo, médio e alto risco de ocorrência de floração de cianobactérias, respectivamente.

- Nível de alerta II ( $\geq 20.000$  cel/mL): 23,9  $\mu\text{g/L}$ , 15,4  $\mu\text{g/L}$  e 5,5  $\mu\text{g/L}$  de clorofila-a para mananciais com baixo, médio e alto risco de ocorrência de floração de cianobactérias, respectivamente.

b) Organização Mundial da Saúde:

- Nível de alerta I ( $\geq 5.000$  cel/mL): 4,4  $\mu\text{g/L}$ , 2,7  $\mu\text{g/L}$  e 1,3  $\mu\text{g/L}$  de clorofila-a para mananciais com baixo, médio e alto risco de ocorrência de floração de cianobactérias, respectivamente.

- Nível de alerta II ( $\geq 60.000$  cel/mL): 132,1  $\mu\text{g/L}$ , 61,0  $\mu\text{g/L}$  e 16,7  $\mu\text{g/L}$  de clorofila-a para mananciais com baixo, médio e alto risco de ocorrência de floração de cianobactérias, respectivamente.

De acordo com nossos resultados, a concentração de clorofila-a determinada pelo Ministério da Saúde para o monitoramento de cianobactérias ( $\leq 10\mu\text{g/L}$ ) aplica-se de maneira segura somente a mananciais lóticos sem ocorrência de florações, no Estado de Minas Gerais (baixo risco associado a eventos de florações de cianobactérias). Para mananciais onde a ocorrência de floração é mais frequente, principalmente os do tipo lêntico (alto risco associado a esses eventos), a concentração de clorofila-a como ferramenta para antever esses eventos deve ser menor.

Os modelos construídos utilizando-se as concentrações de clorofila-a determinadas para os níveis de alerta I e II do Ministério da Saúde (MS, 2021) foram agrupados em 4 (quatro) categorias de manancial, considerando-se o risco associado à ocorrência de florações de cianobactérias nesses ambientes:

a) Categoria I (Mananciais lóticos sem ocorrência anual de florações de cianobactérias): concentrações de clorofila-a de 11,3  $\mu\text{g/L}$  e 23,9  $\mu\text{g/L}$  para os níveis de alerta I e II (MS), respectivamente.

- b) Categoria II (Mananciais lóticos com ocorrência anual de florações em até 50% das amostras: concentrações de clorofila-a de 6,5 µg/L e 15,4 µg/L para os níveis de alerta I e II (MS), respectivamente.
- c) Categoria III (Mananciais lóticos com ocorrência anual de florações igual e acima de 51% das amostras): concentrações de clorofila-a de 2,7 µg/L e 5,5 µg/L para os níveis de alerta I e II (MS), respectivamente.
- d) Categoria IV (Mananciais lênticos independentes da ocorrência anual de florações de cianobactérias): concentrações de clorofila-a de 2,7 µg/L e 5,5 µg/L para os níveis de alerta I e II (MS), respectivamente.

Os resultados analíticos do monitoramento tornam-se disponíveis em tempos variados (horas, dias ou semanas, dependendo do método analítico ou distância entre o local e o laboratório apto), portanto, após a água ter sido fornecida e depois que qualquer ação corretiva possa ser realizada. Nesse sentido, é crítico que a coleta da amostra, a realização do ensaio analítico, disponibilização dos resultados e a interpretação dos mesmos seja realizada em tempo mínimo adequado para que as ações operacionais possam ser realizadas e o risco do consumo de água inadequada seja diminuído.

Reconhecemos que as relações preditivas entre densidade de cianobactérias e concentração de clorofila-a não são exatas, sendo afetadas por fatores fundamentais como a dinâmica do fitoplâncton (tempo de residência da água, disponibilidade de nutrientes e temperatura). Portanto, as concentrações limites de clorofila-a apresentadas nesse trabalho devem ser considerados como um ponto de partida e reavaliadas regularmente, considerando os mananciais superficiais do Estado de Minas Gerais.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACUÑA-ALONSO, C. et al. Assessment of water quality in eutrophized water bodies through the application of indexes and toxicity. **Science of The Total Environment**, v. 728, p. 138775, ago. 2020.

AGUILERA, A. et al. Bloom-forming cyanobacteria and cyanotoxins in Argentina: A growing health and environmental concern. **Limnologia**, v. 69, p. 103–114, mar. 2018.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA). **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 23. ed. Washington DC: APHA Press, 2017. p. 874

ANDRADE, D. (ED.). Crise hídrica no estado do Rio de Janeiro: riscos e efeitos da presença de geosmina e 2-metilisoborneol no manancial de abastecimento do Rio Guandu. In: **Saneamento, Saúde e Ambiente - Volume 1**. [s.l.] Editora Poisson, 2024. p. 116–124.

AUTEUR: A K MISHRA et al. Chlorophyll a Fluorescence in Cyanobacteria: Relation to Photosynthesis. In: MISHRA, A.; TIWARI, D.; RAI, A. (Eds.). **Cyanobacteria : from basic science to applications** . Londres: Academic Press, 2019.

AZEVEDO, S. M. F. O. et al. Human intoxication by microcystins during renal dialysis treatment in Caruaru—Brazil. **Toxicology**, v. 181-182, p. 441–446, dez. 2002.

BARROS, M. U. G. et al. Environmental factors associated with toxic cyanobacterial blooms across 20 drinking water reservoirs in a semi-arid region of Brazil. **Harmful Algae**, v. 86, p. 128–137, jun. 2019.

BGLIOMINI, F. N. et al. Machine learning for cyanobacteria mapping on tropical urban reservoirs using PRISMA hyperspectral data. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 204, p. 378–396, 27 set. 2023.

BOGDAN DRUGĂ et al. Long-term acclimation might enhance the growth and competitive ability of *Microcystis aeruginosa* in warm environments. **Freshwater biology**, v. 67, n. 4, p. 589–602, 13 dez. 2021.

BONILLA, S. et al. What drives the distribution of the bloom-forming cyanobacteria *Planktothrix agardhii* and *Cylindrospermopsis raciborskii*? **FEMS Microbiology Ecology**, v. 79, n. 3, p. 594–607, 28 nov. 2011.

BRASIL. **RESOLUÇÃO CONAMA N° 357, DE 17 DE MARÇO DE 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências.** , 2005. Disponível em:  
<[www2.mma.gov.br/port/conama/res/res05/res35705.pdf](http://www2.mma.gov.br/port/conama/res/res05/res35705.pdf)>

BRASIL. **VIGILÂNCIA E CONTROLE DA QUALIDADE DA ÁGUA PARA CONSUMO HUMANO**. Ministério da Saúde ed. [s.l: s.n.]. p. 212

BRASIL; MINISTÉRIO DA SAÚDE. **PORTARIA GM/MS Nº 888, DE 4 DE MAIO DE 2021 - DOU - Imprensa Nacional**. Disponível em: <<https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-gm/ms-n-888-de-4-de-maio-de-2021-318461562>>.

CADE, B. S.; NOON, B. R. A gentle introduction to quantile regression for ecologists. **Frontiers in Ecology and the Environment**, v. 1, n. 8, p. 412–420, out. 2003.

CAMPOS, R. F.; BARCAROLLI, I. F. Análise da interação antrópica na qualidade da água de um sistema lótico, Rio do Peixe, Santa Catarina, Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 16, n. 1, p. 542–556, 5 jan. 2023.

CAMPOS, T. G. V. et al. New records on toxic cyanobacteria from Brazil: Exploring their occurrence and geography. **Science of The Total Environment**, v. 931, p. 172689, jun. 2024.

CARMICHAEL, W. W. et al. Human fatalities from cyanobacteria: chemical and biological evidence for cyanotoxins. **Environmental Health Perspectives**, v. 109, n. 7, p. 663–668, jul. 2001.

CARVALHO, M. C. et al. **Manual de cianobactérias planctônicas: legislação, orientações para o monitoramento e aspectos ambientais**. CETESB ed. [s.l: s.n.]. p. 56

CEPOI, L. Secondary metabolites in cyanobacteria. In: MISHRA, A. K.; SHILA, S. (Eds.). **Progress in Biochemistry and Biotechnology - Cyanobacteria**. [s.l.] Academic Press, 2024. p. 283–311.

CETESB. **Programa de Monitoramento» Águas Interiores**. [s.l: s.n.].

CHORUS, I.; BARTRAM, J. **Toxic Cyanobacteria in Water : a Guide to their Public Health Consequences, Monitoring and Management**. 1. ed. London: CRC Press, 1999.

CHORUS, I.; WELKER, M. **Toxic cyanobacteria in water : a guide to their public health consequences, monitoring and management**. 2. ed. Boca Raton: Crc Press / Tayldor & Francis Group, 2021.

COOK, R. D. **Regression Graphics**. 1. ed. New York: John Wiley & Sons, 2009.

DESCY, J.-P. et al. Identifying the factors determining blooms of cyanobacteria in a set of shallow lakes. **Ecological Informatics**, v. 34, p. 129–138, 1 jul. 2016.

DIAS, E.; ROSADO, T.; MENEZES, C. Novos valores-guia da Organização Mundial de Saúde para cianotoxinas em águas para consumo humano e balneares. **Boletim Epidemiológico Observações**, v. 30, n. 10, p. 5–14, 1 set. 2021.

DIXIT, A. et al. MILITARY POTENTIAL OF BIOLOGICAL NEUROTOXINS. **Toxin Reviews**, v. 24, n. 2, p. 175–207, jan. 2005.

DU, S. et al. Monitoring algal bloom through relationships between chlorophyll and phytoplankton. **Environmental Engineering and Management Journal**, v. 13, n. 4, p. 805–815, 2014.

ERGUN, E. et al. Simultaneous determination of chlorophyll a and chlorophyll b by derivative spectrophotometry. **Analytical and Bioanalytical Chemistry**, v. 379, n. 5-6, 26

maio 2004.

FIGUEREDO, C. C. et al. From intermittent to persistent cyanobacterial blooms: identifying the main drivers in an urban tropical reservoir. **Journal of Limnology**, v. 75, n. 3, 15 abr. 2016.

FIORE, M. et al. Living near waterbodies as a proxy of cyanobacteria exposure and risk of amyotrophic lateral sclerosis: a population based case-control study. **Environmental Research**, v. 186, p. 109530, 1 jul. 2020.

FRAU, D. Towards a quantitative definition of Cyanobacteria blooms. **Environmental Reviews**, v. 31, n. 4, p. 643–651, 1 dez. 2023.

FUCICH, D.; CHEN, F. Presence of toxin-antitoxin systems in picocyanobacteria and their ecological implications. **The ISME Journal**, v. 14, n. 11, p. 2843–2850, 19 ago. 2020.

GIANI, A. et al. Comparing key drivers of cyanobacteria biomass in temperate and tropical systems. **Harmful Algae**, v. 97, p. 101859, jul. 2020.

GODOY, R. F. B. et al. Does water temperature influence in microcystin production? A case study of Billings Reservoir, São Paulo, Brazil. **Journal of Contaminant Hydrology**, v. 255, p. 104164, abr. 2023.

GOMES, L. N. L. et al. Association between biotic and abiotic parameters and the occurrence of cyanobacteria in a Brazilian reservoir. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 184, n. 8, p. 4635–4645, 3 set. 2011.

GREENSTEIN, K. E.; WERT, E. C. Using rapid quantification of adenosine triphosphate (ATP) as an indicator for early detection and treatment of cyanobacterial blooms. **Water Research**, v. 154, p. 171–179, maio 2019.

GUO, L. et al. Environmental factors associated with the filamentous green algae *Cladophora* blooms: A mesocosm experiment in a shallow eutrophic lake. **Journal of Environmental Management**, v. 313, p. 114977, jul. 2022.

HANSEN, C. B. et al. Monitoring of drinking water quality using automated ATP quantification. **Journal of Microbiological Methods**, v. 165, p. 105713, out. 2019.

HAO, L.; NAIMAN, D. **Quantile Regression**. Londres: Scientific Research Publishing, 2007. p. 149

HARRELL, F. **Regression Modeling Strategies With Applications to Linear Models, Logistic and Ordinal Regression, and Survival Analysis**. 2. ed. [s.l.] Springer Series in Statistics, 2015.

HE, X. et al. Toxic cyanobacteria and drinking water: Impacts, detection, and treatment. **Harmful Algae**, v. 54, p. 174–193, abr. 2016.

HE, X.; ZHU, L. A Lack-of-Fit Test for Quantile Regression. v. 98, n. 464, p. 1013–1022, 1 dez. 2003.

HEALTH CANADA. **Guidelines for Canadian Drinking Water Quality - Summary**

**Table - Canada.ca.** Disponível em: <<https://www.canada.ca/en/health-canada/services/environmental-workplace-health/reports-publications/water-quality/guidelines-canadian-drinking-water-quality-summary-table.html>>.

HEISLER, J. et al. Eutrophication and harmful algal blooms: A scientific consensus. **Harmful Algae**, v. 8, n. 1, p. 3–13, dez. 2008.

HOFFMAN, L. Marine cyanobacteria in tropical regions: diversity and ecology. **European Journal of Phycology**, v. 34, n. 4, p. 371–379, out. 1999.

HOFFMANN, L. Algae of terrestrial habitats. **The Botanical Review**, v. 55, n. 2, p. 77–105, abr. 1989.

HOTOS, G. N.; AVRAMIDOU, D.; BEKIARI, V. Calibration Curves of Culture Density Assessed by Spectrophotometer for Three Microalgae (*Nephroselmis* sp., *Amphidinium carterae* and *Phormidium* sp.). **European Journal of Biology and Biotechnology**, v. 1, n. 6, 10 dez. 2020.

HSU, T.-T.; CARABALLO, Y.; WU, M. An Investigation of Cyanobacteria, Cyanotoxins and Environmental Variables in Selected Drinking Water Treatment Plants in New Jersey. **Heliyon**, v. 10, n. 11, p. e31350–e31350, 18 maio 2024.

HUANG, W. et al. Iron acquisition and mineral transformation by cyanobacteria living in extreme environments. **Materials Today Bio**, v. 17, p. 100493, dez. 2022.

IBELINGS, B. W. et al. Current approaches to cyanotoxin risk assessment and risk management around the globe. **Harmful Algae**, v. 40, p. 63–74, dez. 2014.

INTERNATIONAL STANDART ORGANIZATION (ISO). **ISO 10260:1992, Water quality - Measurement of biochemical parameters - Spectrometric determination of the chlorophyll-a concentration**. [s.l.: s.n.].

IRIT, N. et al. *Trichocoleus desertorum* isolated from Negev desert petroglyphs: Characterization, adaptation and bioerosion potential. **The Science of The Total Environment**, v. 904, p. 166739–166739, 8 set. 2023.

JARDIM, F. A. et al. Fatores determinantes das florações de cianobactérias na água do Rio Doce, Minas Gerais, Brasil. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 19, n. 3, p. 207–218, set. 2014.

KOMÁREK J; JOHANSEN J.R. Chapter 4 - Filamentous Cyanobacteria. In: *Aquatic Ecology, Freshwater Algae of North America (Segunda Edição)*, p. 135-235, 2015.

KIBUYE, F. A. et al. Using Total Adenosine Triphosphate (tATP) Measurements for Cyanobacterial Bloom Monitoring and Response Assessment for Algaecide Treatments. **Water Research**, v. 255, p. 121517–121517, 1 maio 2024.

KULASOORIYA, S. A. Toxin producing freshwater cyanobacteria of Sri Lanka. **Ceylon Journal of Science**, v. 46, n. 1, p. 3, 22 mar. 2017.

LI, H. et al. Picocyanobacterial-Bacterial Interactions Sustain Cyanobacterial Blooms in Nutrient-Limited Aquatic Environments. **Environmental research**, v. 260, p. 119508–

119508, 1 nov. 2024.

LI, J. et al. Evaluation of indicators for cyanobacterial risk in 108 temperate lakes using 23 years of environmental monitoring data. **Environmental Sciences Europe**, v. 33, n. 1, 23 abr. 2021.

LI, N. et al. The unprecedented 2022 extreme summer heatwaves increased harmful cyanobacteria blooms. **Science of The Total Environment**, v. 896, p. 165312, 20 out. 2023.

LÜRLING, M. et al. Response of Natural Cyanobacteria and Algae Assemblages to a Nutrient Pulse and Elevated Temperature. **Frontiers in Microbiology**, v. 9, 13 ago. 2018.

MA, J. et al. Mutual feedback between algal blooming and global warming. **Journal of Oceanology and Limnology**, v. 42, n. 3, p. 787–801, 29 abr. 2024.

MALHOTRA, A.; ÖRMECI, B. Detection and identification of a mixed cyanobacteria and microalgae culture using derivative spectrophotometry. **Journal of Photochemistry and Photobiology B-biology**, v. 238, p. 112616–112616, 1 jan. 2023.

MARINO, L. Relação entre clorofila-a e cianobactérias no estado de São Paulo. **Revista DAE**, v. 65, n. 206, p. 32–43, 2017.

MENEZES, M. et al. Update of the Brazilian floristic list of Algae and Cyanobacteria. **Rodriguesia**, v. 66, n. 4, p. 1047–1062, 1 jan. 2015.

MEREL, S. et al. State of knowledge and concerns on cyanobacterial blooms and cyanotoxins. **Environment International**, v. 59, p. 303–327, set. 2013.

METCALF, J.; CODD, G. Co-Occurrence of Cyanobacteria and Cyanotoxins with Other Environmental Health Hazards: Impacts and Implications. **Toxins**, v. 12, n. 10, p. 629, 1 out. 2020.

MOLICA, R.; AZEVEDO, S. ECOFISIOLOGIA DE CIANOACTÉRIAS PRODUTORAS DE CIANOTOXINAS. **Oecologia Australis**, v. 13, n. 02, p. 229–246, jun. 2009.

MUZZOPAPPA, F.; KIRILOVSKY, D. Photosynthesis | The Orange Carotenoid Protein and the Regulation of Energy Transfer in Cyanobacteria. In: JEZ, J. (Ed.). **Encyclopedia of biological chemistry**. Amsterdam: Elsevier, 2021. p. 375–383.

O'NEIL, J. M. et al. The rise of harmful cyanobacteria blooms: The potential roles of eutrophication and climate change. **Harmful Algae**, v. 14, p. 313–334, fev. 2012.

PACHECO, A.; GUEDES, I.; AZEVEDO, S. Is qPCR a Reliable Indicator of Cyanotoxin Risk in Freshwater? **Toxins**, v. 8, n. 6, p. 172, 7 jun. 2016.

PAERL, H. W.; HUISMAN, J. Climate: Blooms Like It Hot. **Science**, v. 320, n. 5872, p. 57–58, 4 abr. 2008.

PALOMA, N. et al. Exploring the biodiversity of Antarctic cyanobacteria: A review of secondary metabolites and their applications. **Algal Research**, v. 82, p. 103617–103617, 15 jul. 2024.

- PEREIRA, A. et al. Tendências temporais e espaciais da qualidade das águas superficiais da bacia hidrográfica do rio Piranga, Minas Gerais. **Revista Mineira de Recursos Hídricos**, v. 2, n. 1, 20 set. 2021.
- QUEVEDO-CASTRO, A. et al. Temporal and Spatial Study of Water Quality and Trophic Evaluation of a Large Tropical Reservoir. **Environments**, v. 6, n. 6, p. 61, 4 jun. 2019.
- ROCHA, M. et al. Cyanobacteria and cyanotoxins in the environment and water intakes: Reports, diversity of congeners, detection by mass spectrometry and their impact on health. **Toxicon**, v. 238:107589, 1 fev. 2024.
- RODGERS, K. J.; MAIN, B. J.; SAMARDZIC, K. Cyanobacterial Neurotoxins: Their Occurrence and Mechanisms of Toxicity. **Neurotoxicity Research**, v. 33, n. 1, p. 168–177, 5 jun. 2017.
- ROUSSO, B. Z. et al. Chlorophyll and phycocyanin in-situ fluorescence in mixed cyanobacterial species assemblages: Effects of morphology, cell size and growth phase. **Water Research**, v. 212, p. 118127, 1 abr. 2022.
- SAINI, D. K.; PABBI, S.; SHUKLA, P. Cyanobacterial pigments: Perspectives and biotechnological approaches. **Food and Chemical Toxicology**, v. 120, p. 616–624, out. 2018.
- SALMASO, N. et al. Variability of microcystin cell quota in metapopulations of *Planktothrix rubescens*: Causes and implications for water management. **Toxicon**, v. 90, p. 82–96, 1 nov. 2014.
- SILVA, C. O. et al. Baixa riqueza zooplancônica indicando condições adversas de seca e eutrofização em um reservatório no Nordeste do Brasil. **Iheringia. Série Zoologia**, v. 110, 2020.
- SINGH, P.; KUMAR, N.; PAL, S. Cyanobacteria in the polar regions: diversity, adaptation, and taxonomic problems. In: KHARE, N. (Ed.). **Understanding Present and Past Arctic Environments**. [s.l.] Elsevier, 2021. p. 189–212.
- SØNDERGAARD, M. et al. Using chlorophyll a and cyanobacteria in the ecological classification of lakes. **Ecological Indicators**, v. 11, n. 5, p. 1403–1412, set. 2011.
- SONOBE, H. G.; LAMPARELLI, M. C.; CUNHA, D. G. F. Avaliação espacial e temporal de aspectos sanitários de reservatórios com captação de água para abastecimento em SP com ênfase em cianobactérias e cianotoxinas. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 24, n. 5, p. 909–918, out. 2019.
- STIRBET, A. et al. Chlorophyll a Fluorescence in Cyanobacteria: Relation to Photosynthesis. In: MISHRA, A. K.; TIWARI, D. N.; RAI, A. N. (Eds.). **Cyanobacteria**. [s.l.] Academic Press, 2019. p. 79–130.
- SUURNÄKKI, S. et al. Identification of geosmin and 2-methylisoborneol in cyanobacteria and molecular detection methods for the producers of these compounds. **Water Research**, v. 68, p. 56–66, jan. 2015.
- TANTAMA, M.; YELLEN, G. Imaging Changes in the Cytosolic ATP-to-ADP Ratio. In: MURPHY, A. N.; CHAN, D. C. (Eds.). **Methods in Enzymology**. [s.l.] Academic Press,

2014. p. 355–371.

TATON, A.; HOFFMANN, L.; WILMOTTE, A. Cyanobacteria in microbial mats of Antarctic lakes (East Antarctica) A microscopical approach. **Algological Studies**, v. 126, p. 173–208, 1 abr. 2008.

TRINDADE, A. L. C. et al. Tendências temporais e espaciais da qualidade das águas superficiais da sub-bacia do Rio das Velhas, estado de Minas Gerais. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 22, n. 1, p. 13–24, 13 out. 2016.

UNESCO. **UN World Water Development Report 2022**[www.unesco.org](http://www.unesco.org). Paris: UNESCO, 2022. Disponível em: <<https://www.unesco.org/reports/wwdr/2022/en>>.

VEERMAN, J. et al. Environmental drivers behind the exceptional increase in cyanobacterial blooms in Okavango Delta, Botswana. **Harmful Algae**, v. 137, p. 102677–102677, 1 ago. 2024.

WEHR, J. D. Introduction to the Freshwater Algae. In: SHEATH, R. G.; KOCIOLEK, P. J. (Eds.). **ResearchGate**. [s.l.] unknown, 2015. p. 1–11.

WELLS, M. L. et al. Harmful algal blooms and climate change: Learning from the past and present to forecast the future. **Harmful Algae**, v. 49, p. 68–93, nov. 2015.

WORLD HEALTH ORGANIZATION; NATIONS, U.; BANK, W. State of the world's drinking water: an urgent call to action to accelerate progress on ensuring safe drinking water for all. **Who.int**, p. 113, 2022.

YEMA, L.; LITCHMAN, E.; PINTO, P. T. The role of heterocysts in the physiology and ecology of bloom-forming harmful cyanobacteria. **Harmful Algae**, v. 60, p. 131–138, dez. 2016.

ZHANG, C. et al. Using cyanobacteria and other phytoplankton to assess trophic conditions: A qPCR-based, multi-year study in twelve large rivers across the United States. **Water research**, v. 235, 2023.

ZHANG, C. et al. qPCR-based phytoplankton abundance and chlorophyll a: A multi-year study in twelve large freshwater rivers across the United States. **The Science of The Total Environment**, p. 175067–175067, 1 ago. 2024.

## **APÊNDICE A – Procedimento Operacional Padrão (POP)**

Monitoramento de florações de cianobactérias por meio da concentração de clorofila-a



Universidade Federal do Rio de Janeiro  
Procedimento Operacional Padrão (POP)

<b>Nome do Processo:</b>		
Monitoramento de florações de cianobactérias por meio da concentração de clorofila-a		
<b>Objetivo Estratégico:</b>		
Orientar a avaliação de ocorrência de florações de cianobactéria auxiliando no gerenciamento de riscos e implementação de medidas de proteção à saúde pública.		
<b>Campo de aplicação:</b>		
Saneamento básico – Estações de Tratamento de água e Laboratórios de Controle de Qualidade		
<b>Unidade responsável:</b>	<b>Versão:</b>	<b>Número de páginas:</b>
Laboratório de Ecofisiologia e Toxicologia de Cianobactérias - LETC	1	Página 1 de 12

## Sumário

### Sumário

I. Palavras-chave .....	2
II. Dicionário de termos e siglas .....	2
III. Resultado final do processo .....	3
IV. Documentos de referência.....	4
V. Parâmetros para medição do desempenho do processo .....	4
VI. Outras observações .....	5
VII. Procedimentos .....	5
VIII. Condições de biossegurança.....	12
IX. Fluxograma .....	12
X. Controle das alterações.....	12
XI. Controle de aprovações para uso.....	12



Universidade Federal do Rio de Janeiro  
Procedimento Operacional Padrão (POP)

Nome do Processo:		
Monitoramento de florações de cianobactérias por meio da concentração de clorofila-a		
Unidade responsável:	Versão:	Número de páginas:
Laboratório de Ecofisiologia e Toxicologia de Cianobactérias - LETC	1	Página 2 de 12

I. Palavras-chave

Cianobactéria, Clorofila-a, monitoramento.

II. Dicionário de termos e siglas

Termo/Sigla	Significado
Cianobactérias	Cianobactérias são organismos procariontes, autotróficos e fotossintetizantes, ocorrendo como células individuais, filamentos ou colônias. São encontradas em todas as águas superficiais e se tornam um problema apenas quando presentes em números excessivos de células (comumente conhecidos como “floração”). Algumas cianobactérias podem produzir toxinas (cianotoxinas) que são prejudiciais para a saúde ambiental humana.
Floração	Fenômeno de crescimento acelerado de cianobactérias e espécies fitoplanctônicas eucariontes. Não há um consenso sobre a partir de qual a densidade fitoplanctônica pode ser denominada de floração e nesse trabalho consideramos floração eventos com densidade de cianobactérias igual ou superior a 10.000 cel/mL (densidades consideradas pelo Ministério da Saúde para os níveis de alerta do monitoramento).
Cianotoxinas	As cianotoxinas são metabólitos secundários produzidos pelas cianobactérias. Essas toxinas são moléculas orgânicas de diferentes classes químicas, com diferentes mecanismos de ação e características e podem ser hepatotóxicas, neurotóxicas, citotóxicas e dermatotóxicas.
Clorofila-a	A clorofila é um componente essencial dos sistemas autotróficos, sendo a responsável pela absorção da luz durante os processos fotossintéticos. Por estar presente em todos os organismos fitoplanctônicos e ser a principal molécula captadora de luz na fotossíntese, tem sido utilizada para estimar a biomassa do fitoplâncton e inferir sobre a qualidade da água.



Universidade Federal do Rio de Janeiro  
Procedimento Operacional Padrão (POP)

Nome do Processo:		
Monitoramento de florações de cianobactérias por meio da concentração de clorofila-a		
Unidade responsável:	Versão:	Número de páginas:
Laboratório de Ecofisiologia e Toxicologia de Cianobactérias - LETC	1	Página 3 de 12

Monitoramento da qualidade da água	Monitoramento da qualidade da água bruta é um processo contínuo e sistemático de coleta e análise de um conjunto de parâmetros (incluindo cianobactérias e clorofila-a) que permite aos gestores das companhias de saneamento conhecer e avaliar a qualidade da água e verificar se atende aos padrões de potabilidade.
Manancial lótico	Os mananciais lóticos são definidos pela presença de água em movimento, nos quais a correnteza permanentemente desloca a água de montante (nascente) a jusante (foz de desague). São classificados como lóticos os rios, riachos, arroios, córregos.
Manancial lântico	Os mananciais lânticos são definidos pela presença de água parada ou com pouco movimento, nos quais o tempo de residência (tempo que a água permanece no sistema) costuma ser alto pois o seu fluxo é baixo. Eles são representados por lagos, lagoas, reservatórios ou charcos.
Padrão de potabilidade da água	É um conjunto de características que qualquer água destinada ao consumo humano precisa atender para ser considerada segura.
Ministério da Saúde (MS)	Setor governamental responsável pela administração e manutenção da Saúde Pública no Brasil. Está entre suas responsabilidades o estabelecimento de normas e padrões de potabilidade da água tratada a serem seguidos a fim de minimizar os riscos à saúde pública associados ao consumo de água.
Nível de alerta	Densidade de cianobactéria ou concentração de clorofila-a, que se alcançados, desencadeiam outras ações a fim de minimizar os riscos associados à presença de cianobactérias possivelmente tóxicas.
Valor máximo permitido (VMP)	São os valores máximos definidos para determinado analito em uma legislação.

### III. Resultado final do processo

Determinação da concentração de clorofila-a que se relaciona com o risco associado (probabilidade) à ocorrência de florações de cianobactérias. Quanto maior a probabilidade de ocorrência desses



Universidade Federal do Rio de Janeiro  
Procedimento Operacional Padrão (POP)

Nome do Processo:		
Monitoramento de florações de cianobactérias por meio da concentração de clorofila-a		
Unidade responsável:	Versão:	Número de páginas:
Laboratório de Ecofisiologia e Toxicologia de Cianobactérias - LETC	1	Página 4 de 12

eventos, maior o risco e, portanto, menor a concentração de clorofila-a a ser considerada para efeitos de tomada de decisão (confirmação, por microscopia, da presença de cianobactérias, ensaios para quantificação de cianotoxinas, medidas operacionais como a remoção de células nas estações de tratamento).

#### IV. Documentos de referência

Referência	Descrição
BRASIL. Ministério da <a href="#">Saúde</a> . Portaria MS/GM nº888/2021. Disponível em: <a href="https://bvsmms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2021/prt0888_07_05_2021.html">https://bvsmms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2021/prt0888_07_05_2021.html</a> .	Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade.
CHORUS, I.; WELKER, M. Toxic cyanobacteria in water: a guide to their public health consequences, monitoring and management. 2. ed. Boca Raton: Crc Press / Tayldor & Francis Group, 2021. Disponível em: <a href="https://www.who.int/publications/m/item/toxic-cyanobacteria-in-water---second-edition">https://www.who.int/publications/m/item/toxic-cyanobacteria-in-water---second-edition</a> .	Guia orientativo elaborado pela Organização Mundial da Saúde (OMS) onde estabelece valores de referência para cianotoxinas na água de abastecimento, assim como parâmetros para o monitoramento de uma sua ocorrência (cianobactérias).

#### V. Parâmetros para medição do desempenho do processo

Diminuição do tempo entre a identificação da iminência de eventos de floração de cianobactérias e a tomada de ações operacionais afim de minimizar o risco associado a esses eventos, como quantificação de cianotoxinas na água (bruta ou tratada), interrupção do tratamento ou utilização de outra fonte de abastecimento.



Universidade Federal do Rio de Janeiro  
Procedimento Operacional Padrão (POP)

Nome do Processo:		
Monitoramento de florações de cianobactérias por meio da concentração de clorofila-a		
Unidade responsável:	Versão:	Número de páginas:
Laboratório de Ecofisiologia e Toxicologia de Cianobactérias - LETC	1	Página 5 de 12

## VI. Outras observações

O meio mais eficaz de garantir a qualidade da água potável e conseqüentemente a proteção da saúde pública é através da adoção de uma abordagem preventiva que inclua todas as etapas, desde a captação da água até a distribuição ao consumidor. A primeira etapa, portanto, é a identificação dos perigos potenciais e a análise de qual o nível de risco aceitável para que a qualidade

da água seja garantida. O nível de risco para cada perigo (no caso de cianobactérias, os eventos de floração) pode ser estimado identificando a probabilidade de ocorrência (raro, pouco ou muito frequente) e avaliando a gravidade das conseqüências. Essa avaliação tem o objetivo de identificar riscos baixos, médios ou altos. Uma vez que os perigos e os níveis de risco associados são identificados e quantificados, um programa de monitoramento deve ser implementado de maneira a fornecer informações necessárias para o gerenciamento eficaz do sistema de tratamento de água e tomada de decisões.

VMP definido pela Portaria GM/MS nº888/2021 para concentração de cianotoxinas em água bruta e tratada: Microcistina: 1,0 µg/L; Saxitoxina: 3,0 µg/L; Cilindrospermopsina: 1,0 µg/L.

## VII. Procedimentos

1. Identificar se o manancial utilizado para abastecimento é do tipo lóxico ou lântico.
2. Verificar, a partir de dados históricos para o monitoramento de cianobactérias, qual a frequência de ocorrência de florações em um dado manancial.
3. Para mananciais lóxicos sem histórico de floração de cianobactérias o fluxograma de monitoramento a ser seguido é o Categoria 1.
4. Para mananciais lóxicos com ocorrência anual de florações em até até 50% das amostras, o fluxograma de monitoramento a ser seguido é o Categoria 2.
5. Para mananciais lóxicos com ocorrência anual de florações acima de 50% nas amostras, o fluxograma de monitoramento a ser seguido é o Categoria 3.
6. Para mananciais lânticos, independente da ocorrência de floração, o fluxograma de monitoramento a ser seguido é o Categoria 3.



Universidade Federal do Rio de Janeiro  
Procedimento Operacional Padrão (POP)

Nome do Processo:		
Monitoramento de florações de cianobactérias por meio da concentração de clorofila-a		
Unidade responsável:	Versão:	Número de páginas:
Laboratório de Ecofisiologia e Toxicologia de Cianobactérias - LETC	1	Página 6 de 12

6.1 Categoria 1: Baixo risco associado a eventos de florações de cianobactérias (Figura 1).

Nível de vigilância: A amostragem para determinação da concentração de clorofila-a no manancial deverá ser realizada mensalmente. Caso a concentração determinada seja igual ou inferior a 10 µg/L, o monitoramento poderá continuar a ser realizado através desse parâmetro. Caso a concentração de clorofila-a seja superior a 10 µg/L e inferior a 24 µg/L, deve-se realizar análise para identificação e quantificação de cianobactérias. Se a concentração de clorofila-a for superior a 24 µg/L, além da identificação e quantificação de cianobactérias, deve-se realizar a análise para quantificação de cianotoxinas da água bruta.

Nível de alerta 1: Se a análise de cianobactérias identificar uma concentração inferior a 10.000 cel/mL, o monitoramento por concentração de clorofila-a pode ser retomado. Caso indique uma densidade de cianobactérias igual ou superior a 10.000 cel/mL e inferior a 20.000 cel/mL, a frequência de monitoramento deverá ser alterada para semanal.

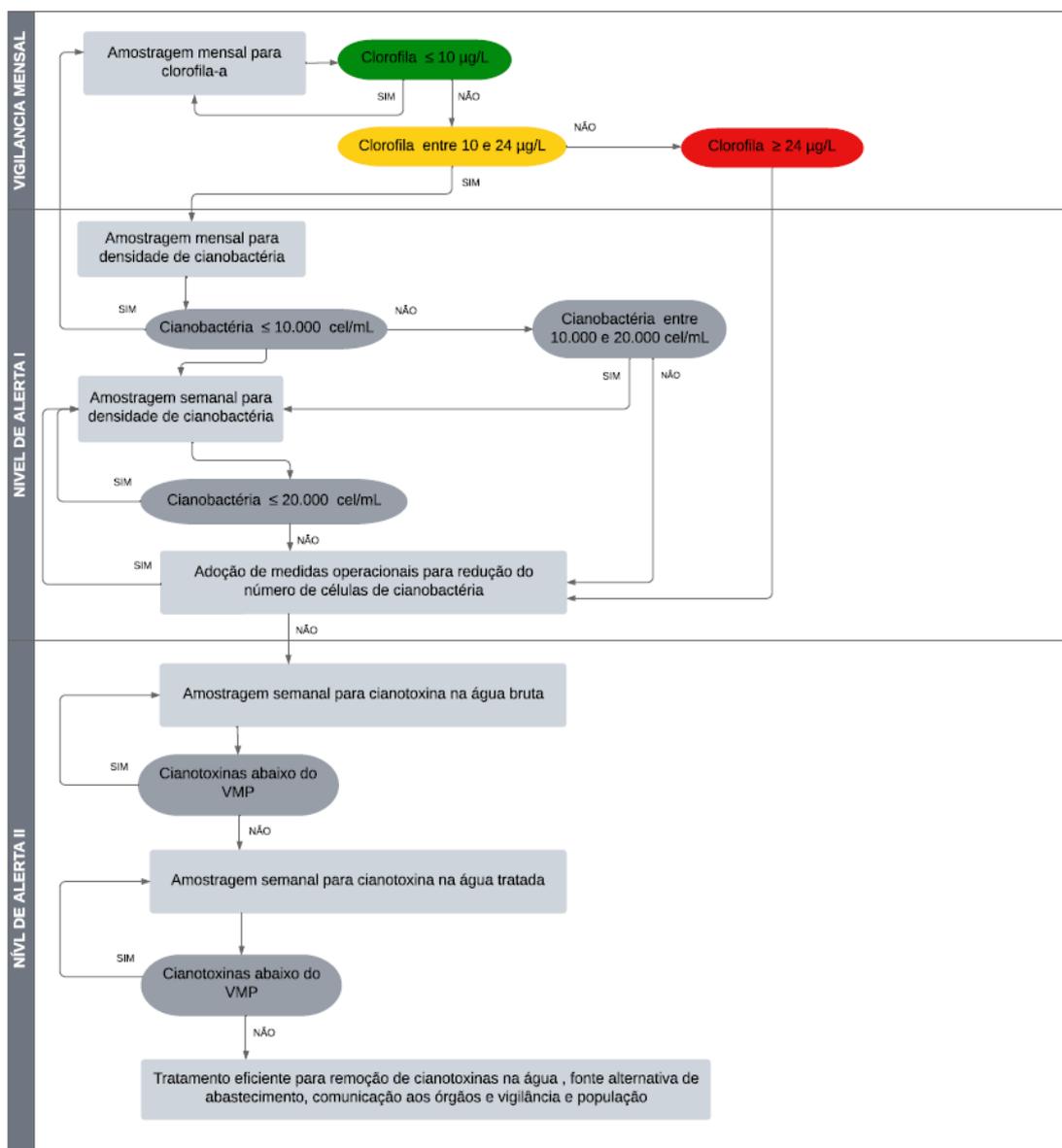
Nível de alerta 2: Se a densidade de células de cianobactérias for superior ou igual a 20.000 cel/mL, o monitoramento de cianotoxinas na água bruta deverá ser iniciado. Caso ultrapasse os valores máximos permitidos (VMP), o monitoramento deverá se estender à água tratada, também em frequência semanal.



# Universidade Federal do Rio de Janeiro Procedimento Operacional Padrão (POP)

Nome do Processo:		
Monitoramento de florações de cianobactérias por meio da concentração de clorofila-a		
Unidade responsável:	Versão:	Número de páginas:
Laboratório de Ecofisiologia e Toxicologia de Cianobactérias - LETC	1	Página 7 de 12

Figura 1 - Fluxograma para proposta de monitoramento de cianobactérias em sistema de abastecimento de água potável – Mananciais lóticos sem histórico de ocorrência de cianobactérias.





Universidade Federal do Rio de Janeiro  
Procedimento Operacional Padrão (POP)

Nome do Processo:		
Monitoramento de florações de cianobactérias por meio da concentração de clorofila-a		
Unidade responsável:	Versão:	Número de páginas:
Laboratório de Ecofisiologia e Toxicologia de Cianobactérias - LETC	1	Página 8 de 12

6.2 Categoria 2: Risco médio associado a eventos de floração de cianobactérias (Figura 2).

Nível de vigilância: A amostragem para determinação da concentração de clorofila-a no manancial deverá ser realizada mensalmente. Caso a concentração determinada seja igual ou inferior a 6,5 µg/L, o monitoramento poderá continuar a ser realizado através desse parâmetro. Caso a concentração de clorofila-a seja superior a 6,5 µg/L e inferior a 10 µg/L, deve-se alterar a frequência de amostragem para semanal e se estiver entre 10 e 15 µg/L deverá ser realizada a identificação e contagem de cianobactérias. Se a concentração de clorofila-a for superior a 15,5 µg/L, além da identificação e quantificação de cianobactérias deve-se realizar a análise para quantificação de cianotoxinas da água bruta.

Nível de alerta 1: Se a análise de cianobactérias identificar uma densidade inferior a 10.000 cel/mL, o monitoramento por concentração de clorofila-a pode ser retomado. Caso indique uma densidade de cianobactérias igual ou superior a 10.000 cel/mL e inferior a 20.000 cel/mL, a frequência de monitoramento deverá ser alterada para semanal.

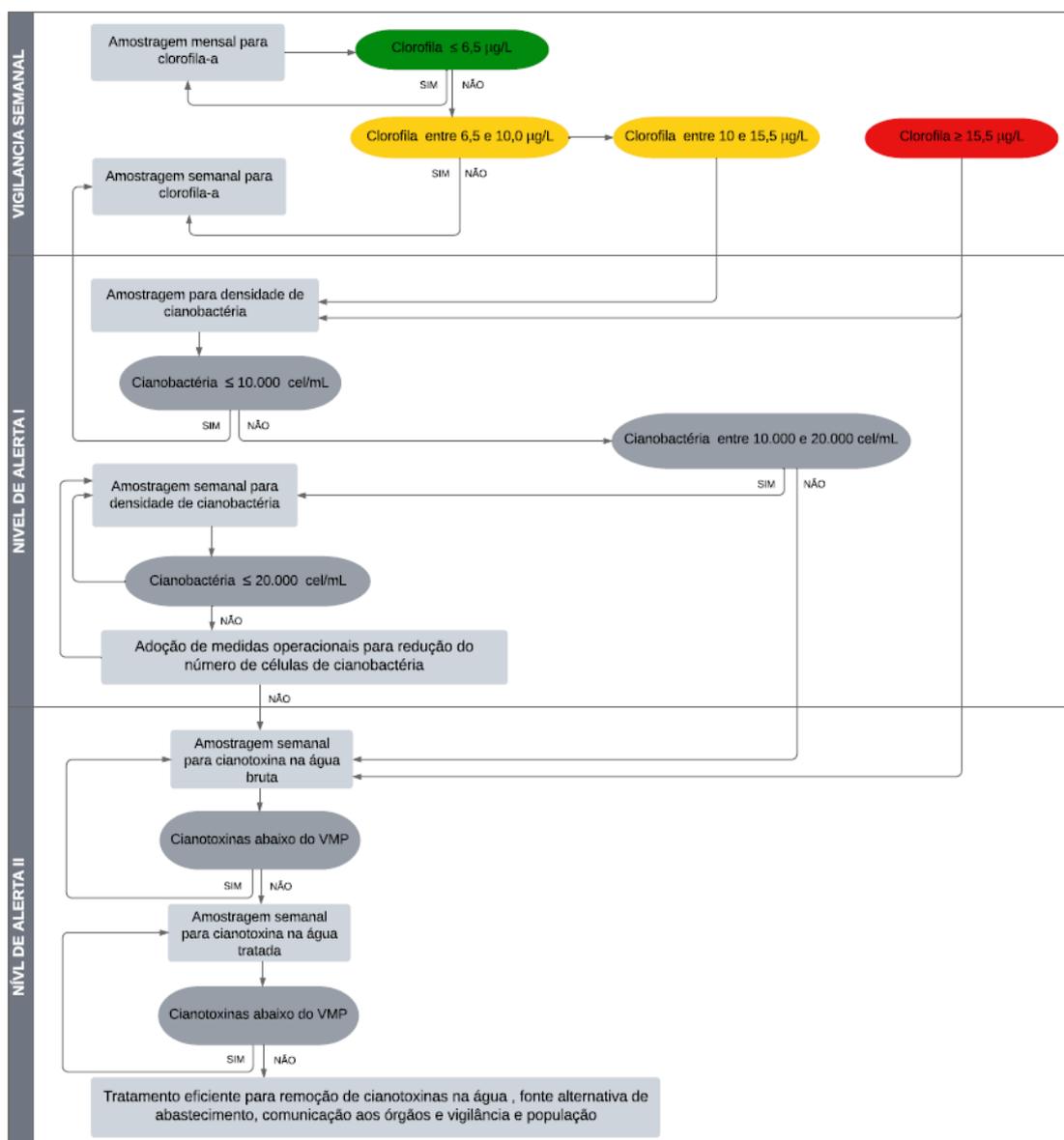
Nível de alerta 2: Se a densidade de cianobactérias for superior ou igual a 20.000 cel/mL, o monitoramento de cianotoxinas na água bruta deverá ser iniciado. Caso ultrapasse os valores máximos permitidos (VMP), o monitoramento deverá se estender à água tratada, também em frequência semanal.



Universidade Federal do Rio de Janeiro  
Procedimento Operacional Padrão (POP)

Nome do Processo:		
Monitoramento de florações de cianobactérias por meio da concentração de clorofila-a		
Unidade responsável:	Versão:	Número de páginas:
Laboratório de Ecofisiologia e Toxicologia de Cianobactérias - LETC	1	Página 9 de 12

Figura 2 - Fluxograma para proposta de monitoramento de cianobactérias em sistema de abastecimento de água potável – Ambientes lóticos com ocorrência anual de florações em até 50% das amostras.





Universidade Federal do Rio de Janeiro  
Procedimento Operacional Padrão (POP)

Nome do Processo:		
Monitoramento de florações de cianobactérias por meio da concentração de clorofila-a		
Unidade responsável:	Versão:	Número de páginas:
Laboratório de Ecofisiologia e Toxicologia de Cianobactérias - LETC	1	Página <b>10</b> de 12

6.3 Categorias 3 e 4: Risco alto associado a eventos de floração de cianobactérias (Figura 3).

Nível de vigilância: A amostragem para determinação da concentração de clorofila-a no manancial deverá ser realizada semanalmente. Caso a concentração determinada seja igual ou inferior a 2,7 µg/L, o monitoramento poderá continuar a ser realizado através desse parâmetro. Caso a concentração de clorofila-a seja superior a 2,7 µg/L e inferior a 5,5 µg/L, deverá ser realizada a identificação em contagem de cianobactérias. Se a concentração de clorofila-a estiver entre de 5,5 e 16,7 µg/L, além da identificação e quantificação de cianobactérias deverá ser realizada a análise para quantificação de cianotoxinas da água bruta. Caso a concentração de clorofila-a seja superior a concentração de 16,7 µg/L, além da identificação e quantificação de cianobactérias deverá ser realizada a análise para quantificação de cianotoxinas da água tratada.

Nível de alerta 1: Se a análise de cianobactérias identificar uma densidade inferior a 10.000 cel/mL, o monitoramento por concentração de clorofila-a pode ser recommçado. Caso indique uma densidade de cianobactérias igual ou superior a 10.000 cel/mL e inferior a 20.000 cel/mL, a frequência de monitoramento deverá ser semanal para contagem de cianobactérias.

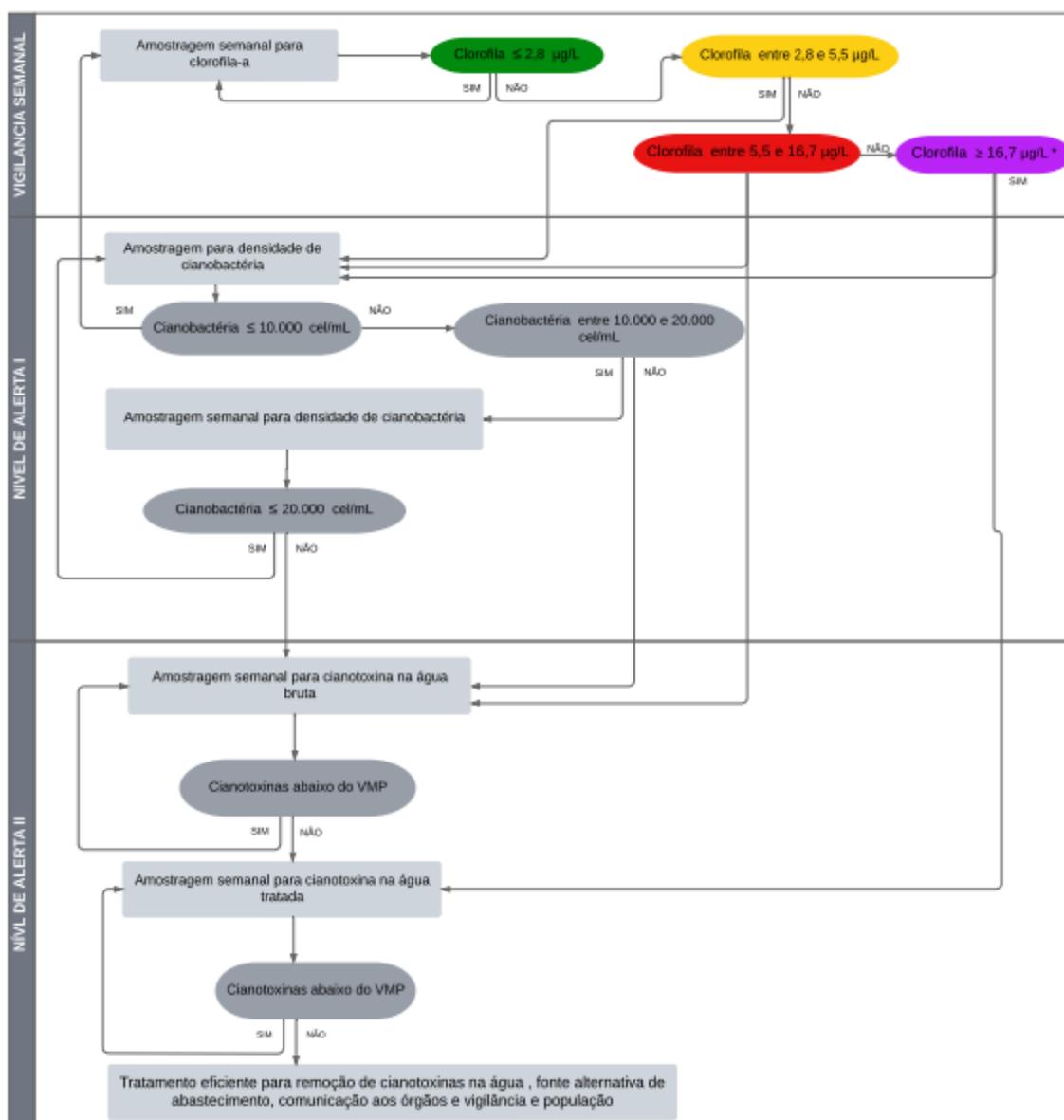
Nível de alerta 2: Se a densidade de cianobactéria for superior ou igual a 20.000 cel/mL, o monitoramento de cianotoxinas na água bruta deverá ser iniciado. Caso ultrapasse os valores máximos permitidos (VMP), o monitoramento deverá se estender à água tratada, também em frequência semanal.



Universidade Federal do Rio de Janeiro  
Procedimento Operacional Padrão (POP)

Nome do Processo:		
Monitoramento de florações de cianobactérias por meio da concentração de clorofila-a		
Unidade responsável:	Versão:	Número de páginas:
Laboratório de Ecofisiologia e Toxicologia de Cianobactérias - LETC	1	Página 11 de 12

Figura 3 - Fluxograma para proposta de monitoramento de cianobactérias em sistema de abastecimento de água potável – Ambientes lóticos com ocorrência anual de florações acima de 51% das amostras e ambientes lênticos.





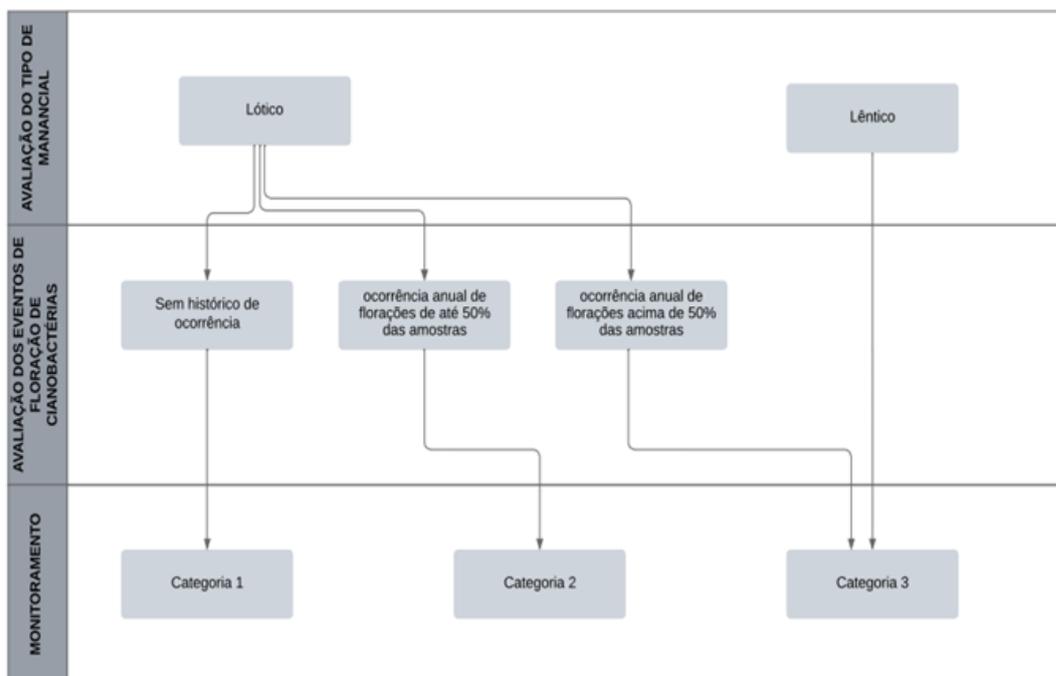
Universidade Federal do Rio de Janeiro  
Procedimento Operacional Padrão (POP)

Nome do Processo:		
Monitoramento de florações de cianobactérias por meio da concentração de clorofila-a		
Unidade responsável:	Versão:	Número de páginas:
Laboratório de Ecofisiologia e Toxicologia de Cianobactérias - LETC	1	Página <b>12</b> de 12

VIII. Condições de biossegurança

Não se aplica.

IX. Fluxograma



X. Controle das alterações

Nº da versão	Data	Tipo de alteração	Itens revisados	Responsável pela revisão
1	13/10/2024	Elaboração inicial	Todos os itens	Raphaela R. S.Araujo

XI. Controle de aprovações para uso

Data da aprovação	Nome do responsável pela aprovação	Unidade/subunidade aprovadora:
13/10/2024	Sandra M.F.O.Azevedo	LETC/IBCCF/coordenação MPB

## **APÊNDICE B – Cartilha**

**Monitoramento de florações de cianobactérias por meio da concentração de clorofila-a em mananciais de água para abastecimento público**

# Monitoramento de florações de cianobactérias por meio da concentração de clorofila-a em mananciais de água para abastecimento público



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO  
Instituto de Biofísica Carlos Chagas Filho - IBCCF  
Laboratório de Ecofisiologia e Toxicologia de Cianobactérias



# Monitoramento de florações de cianobactérias por meio da concentração de clorofila-a em mananciais de água para abastecimento público

# SUMÁRIO

SUMÁRIO.....	3
CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	4
INTRODUÇÃO.....	5
<b>Cianobactérias</b> .....	6
<b>Monitoramento de Cianobactérias</b> .....	9
OBJETIVOS .....	14
METODOLOGIA.....	15
Identificação do tipo de manancial utilizado para captação de água destinada ao abastecimento público .....	16
Verificação, a partir de dados históricos para o monitoramento de cianobactérias, da frequência de ocorrência de florações. ....	17
CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	26
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	28

## CONSIDERAÇÕES INICIAIS

---

Essa cartilha é parte integrante da dissertação intitulada “ Avaliação da comparação entre as concentrações de clorofila-a e a densidade de cianobactérias, visando a utilização de um indicador de florações para fins de monitoramento da qualidade da água para abastecimento público” apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Pesquisa Biomédica (Mestrado Profissional) do Instituto de Biofísica Carlos Chagas Filho – Universidade Federal do Rio de Janeiro, como requisito à obtenção do título de mestre. Ano 2024.

Orientadores: Profa Dra Sandra Maria Feliciano de Oliveira e Azevedo (UFRJ) e Dr. Fernando Antônio Jardim (Copasa).

# INTRODUÇÃO

---

O meio mais eficaz de garantir a qualidade da água potável e consequentemente a proteção da saúde pública é através da adoção de uma abordagem preventiva que inclua todas as etapas, desde a captação da até ao consumidor. A primeira etapa, portanto, é a identificação dos perigos potenciais e a análise de qual o nível de risco aceitável para que a qualidade da água seja garantida. O nível de risco para cada perigo (no caso de cianobactérias, os eventos de floração) pode ser estimado identificando a probabilidade de ocorrência (raro, pouco ou muito frequente) e avaliando a gravidade das consequências. Essa avaliação tem o objetivo de identificar riscos baixos médios e altos.

Uma vez que os perigos e os níveis de risco associados são identificados e quantificados, um programa de monitoramento deve ser implementado de maneira a fornecer informações necessárias para o gerenciamento eficaz do sistema de tratamento de água e tomada de decisões.

Em decorrências dos potenciais efeitos à saúde humana ocasionados pela exposição à cianotoxinas por meio da água de abastecimento a Organização Mundial da Saúde (OMS) propõe o monitoramento de cianobactérias escalonado em diversos níveis de alerta (Chorus; Welker 2021). Os níveis de alerta propostos são baseados na contagem de células de cianobactérias (ou seu biovolume) e na concentração de clorofila-a. No Brasil, o Ministério da Saúde incorpora os valores propostos pela OMS na Portaria de Potabilidade (Portaria GM/MS nº888/2021) (Brasil, 2021) para o monitoramento de mananciais superficiais utilizados para abastecimento público (Tabela 1).

**Tabela 1**

**Valores para densidade de cianobactérias e concentração de clorofila-a preconizados pelo Ministério da Saúde (MS).**

<b>Níveis de alerta</b>	<b>Densidade de Cianobactérias e Concentração de Clorofila-a</b>	<b>Frequência</b>
<b>Nível de Vigilância</b>	< 10.000 cel/mL de cianobactéria < 10µg/L de clorofila-a	Mensal
<b>Nível de Alerta 1</b>	≥ 10.000 cel/mL de cianobactéria	Semanal
<b>Nível de Alerta 2</b>	≥ 20.000 cel/mL de cianobactéria	Semanal

## **Cianobactérias**

Cianobactérias são organismos procariontes, fotossintetizantes e estão presentes em ambientes de características diversas (aquático e terrestre, tropical, temperado e ártico). A presença de cianobactérias em ambientes aquáticos, de clima tropical e temperado, é bem documentada e se tornam um problema apenas quando presentes em números excessivos (comumente conhecidos como “floração”).

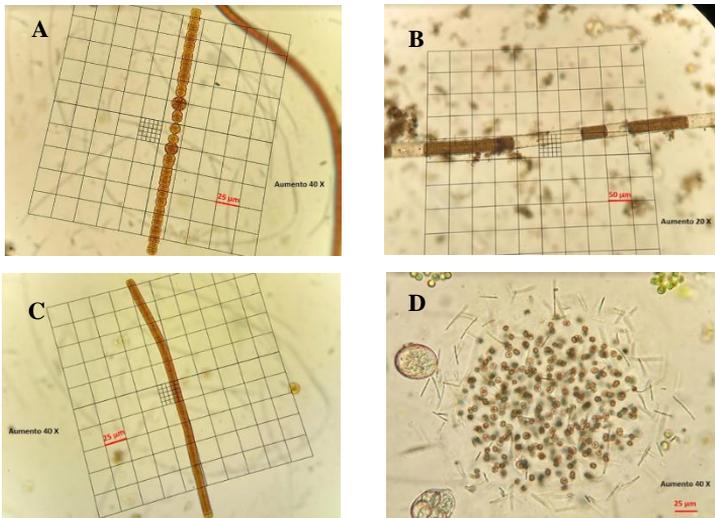
Apresentam diversas formas de vida (unicelular, filamentos, colônias) e tamanhos (<2µm a >200µm). As células das cianobactérias podem apresentar formas esféricas, elípticas, cilíndricas, cônicas ou em formato de disco. Não possuem flagelos, diferente de outros táxons fitoplanctônicos (Komárek; Johansen, 2015).

As cianobactérias são um grupo importante dentro da comunidade

fitoplânctonica, apresentando uma série de vantagens competitivas que as tornam responsáveis por grande parte da produção primária em ambientes aquáticos (Bonilla et al., 2011). Como vantagem competitiva podemos citar a presença de aerótopos, heterocitos e acinetos: células diferenciadas que são responsáveis por regular a posição na coluna de água, fixar nitrogênio atmosférico e facilitar a dispersão e permanência em condições adversas, respectivamente (Yema et al, 2016). Além disso, essas estruturas são importantes para classificação e identificação dos táxons por microscopia (Komárek; Johansen, 2015). Na Figura 1 estão representados alguns gêneros de cianobactérias identificados no Brasil.

### Figura 1

**Gêneros de cianobactérias : A – Dolichospermum ; B – Lyngbya; C – Oscillatoria; D – Microcystis.**



A proliferação excessiva de cianobactérias representa um problema global com efeitos nocivos para a saúde humana, para a economia e para os ecossistemas, principalmente quando esses eventos ocorrem em mananciais superficiais utilizados como fonte de abastecimento público.

Certas espécies de cianobactérias têm a capacidade de produzir metabólitos secundários que têm um grande efeito negativo nas células, tecidos e organismos, sendo esses compostos denominados cianotoxinas (Chorus; Welker, 2021). Outros metabólitos secundários produzidos pelas cianobactérias são a geosmina e o 2-metilisborneol (MIB). Apesar desses metabólitos não serem tóxicos, conferem gosto e odor à água comprometendo a sua qualidade, além de serem indicativos da presença de cianobactérias.

As cianotoxinas compõem várias classes, com diferentes mecanismos de ação e características e podem ser hepatotóxicas, neurotóxicas, citotóxicas e dermatotóxicas. A Tabela 2 descreve as principais classes de cianotoxinas, principais gêneros envolvidos na produção e seus mecanismos de ação.

**Tabela 2**

**Principais cianotoxinas, gêneros de cianobactérias produtores e comprometimento no corpo humano.**

<b>Toxinas</b>	<b>Gêneros produtores</b>	<b>Órgãos/Tecidos acometidos</b>
<b>Microcistinas</b>	<i>Microcystis, Dolichospermum, Planktothrix</i>	Fígado (hepatotoxina)
<b>Cilindrospermopsina</b>	<i>Raphidiopsis, Aphanizomenon, Oscillatoria</i>	Rins e Fígado (citotoxina)
<b>Saxitoxina</b>	<i>Dolichospermum, Planktothrix, Aphanizomenon, Raphidiopsis</i>	Sistema nervoso central (neurotoxina)

## **Monitoramento de Cianobactérias**

Inúmeras ferramentas de monitoramento estão disponíveis para alertar as partes interessadas sobre a ocorrência de cianobactérias: visual (presença de nata verde na superfície da água, que também pode ser indicativo da floração de outros grupos fitoplanctônicos), direta (identificando e quantificando esses organismos, seja em células/ml ou biomassa, por análise microscópica) e indireta/qualitativa (concentração de clorofila-a) .

### **Identificação e contagem de cianobactérias**

A identificação e contagem de células de cianobactérias por microscopia óptica é uma técnica convencional e difundida empregada por empresas de abastecimento e agências de monitoramento. É considerada técnica padrão ouro para o monitoramento de cianobactérias.

A principal metodologia empregada para a identificação e contagem é a descrita no Standart methods for the examination of water and wastewater (APHA, 2021), a qual inclui as etapas: coleta, sedimentação (período mínimo de 24 horas), identificação e contagem . As espécies são identificadas por sua morfologia e características sob ampliação e contadas seguindo protocolos estabelecidos de contagem de algas usando câmaras de contagem.

### **Concentração de Clorofila-a**

A clorofila é um componente essencial dos sistemas autotróficos, sendo a responsável pela absorção da luz durante os processos fotossintéticos (Stibert et al, 2019). Por estar presente em todos os organismos fitoplanctônicos e ser um dos principais responsáveis pela fotossíntese, têm sido utilizada para estimar a biomassa do fitoplâncton e inferir sobre a qualidade da água (Ergun et al, 2004). Embora a concentração de clorofila-a contida no fitoplâncton possa variar em função da disponibilidade de luz, nutrientes e grupo específico, a clorofila-a é uma medida amplamente utilizada e aceita como o total da biomassa fitoplanctônica, inclusive de cianobactérias (Chorus; Welker, 2021).

Para determinação da concentração de clorofila-a, diversas metodologias podem ser utilizadas, como análise espectrofotométrica, fluorimétrica e por cromatografia líquida de alta performance (HPLC). A mais utilizada, pelo custo e simplicidade analítica e a análise espectrofotométrica, descrita no Standart methods for the examination of water and wastewater (APHA, 2021) e também na International

Organization for Standardization (ISO 10260). Para ambas as metodologias, a análise inclui a etapa de extração do pigmento (clorofila-a), leitura das absorvâncias em espectrofotômetro e cálculo das concentrações.

A identificação e contagem microscópica de células, filamentos ou colônias de cianobactérias tem a vantagem de avaliar diretamente a abundância de gêneros/espécies potencialmente tóxicas. Apesar de precisa, a análise microscópica é bastante demorada, tendo em vista a acurácia analítica necessária para diferenciar todos os gêneros/espécies presentes na amostra (Chorus; Welkwer, 2021). Devido à especialidade técnica envolvida na contagem e identificação dos táxons, as amostras são geralmente enviadas à laboratórios distantes, aumentando o tempo entre coleta, análise e emissão do resultado. Portanto, os resultados podem não mais refletir as concentrações atuais de cianobactérias no manancial.

A determinação de clorofila-a, por outro lado, apresenta um custo operacional de implantação e operação mais reduzido e de resposta mais rápida (tempo de análise em laboratório variando de 1 a 48h, dependendo do método adotado). Porém, não é possível determinar se a concentração de clorofila-a é oriunda de cianobactérias ou de outros organismos fitoplanctônicos. Entretanto, quando já há dados históricos que comprovam a ocorrência frequente de dominância de cianobactérias num determinado manancial, para a minimização de risco, pode-se considerar a concentração de clorofila-a de uma determinada amostra como sendo oriunda principalmente de cianobactérias.

Os valores considerados (limites de alerta: baixo, médio, alto) para os parâmetros monitorados devem servir como diagnóstico, de maneira que os responsáveis pelo abastecimento público iniciem o monitoramento de cianotoxinas, com tratamento adicional, se pertinente, nas estações de tratamento de água (Chorus; Welker, 2021). A capacidade de monitorar cianobactérias com rapidez e precisão, identificando corretamente o limiar de um nível de alerta é um fator importantíssimo na implementação de estratégias para gerenciamento dos riscos associados.

A escolha da ferramenta metodológica utilizada para o monitoramento de cianobactérias deve levar em consideração a sensibilidade do método (limites de quantificação), assim como tempo de análise e custo

A Portaria GM/MS n° 888/2021 permite que o monitoramento seja realizado, a nível de vigilância, por meio da concentração de clorofila-a e densidade de cianobactérias. Porém, somente uma concentração limite de clorofila-a é definida (10 µg/L), independentemente dos resultados da série histórica ou da probabilidade de ocorrência de florações (densidade de cianobactéria igual ou superior a 10.000 cel/mL).

A presente proposta de monitoramento baseia-se nos níveis de alerta preconizados pelo Ministério da Saúde (Portaria GM/MS 888/2021), incorporando valores para concentração de clorofila-a que se relacionam com o risco associado (probabilidade) à ocorrência de florações de cianobactérias. Quanto maior a probabilidade de ocorrência desses eventos, maior o risco e, portanto, menor a concentração de clorofila-a a ser considerada para efeitos de tomada de decisão (confirmação, por

microscopia, da presença de cianobactérias, ensaios para quantificação de cianotoxinas, medidas operacionais como a remoção de células nas estações de tratamento).

## OBJETIVOS

---

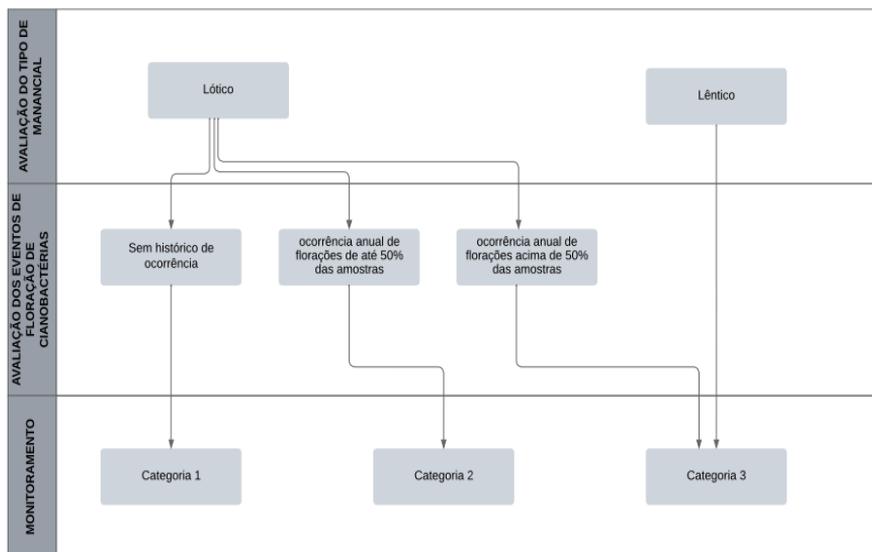
Diminuição do tempo entre a identificação da iminência de eventos de floração de cianobactérias e a tomada de ações operacionais afim de minimizar o risco associado a esses eventos, como quantificação de cianotoxinas na água (bruta ou tratada), interrupção do tratamento ou utilização de outra fonte de abastecimento.

# METODOLOGIA

A metodologia proposta é baseada primeiramente na identificação do tipo de manancial utilizado para captação de água destinada ao abastecimento público, seguida pela avaliação da ocorrência de eventos de floração de cianobactérias para posteriormente verificar qual a categoria de risco correspondente a esse manancial. O fluxograma para esse processo pode ser visualizado na Figura 3 abaixo:

**Figura 3**

**Fluxograma para categorização do manancial utilizado para abastecimento público.**



## **Identificação do tipo de manancial utilizado para captação de água destinada ao abastecimento público**

Os mananciais utilizados para captação de água para abastecimento público (água bruta), podem ser classificados em dois tipos: lóticos e lênticos.

Mananciais lóticos são aqueles com velocidade de corrente mais elevada e curto tempo de residência da água, onde as condições não são tão favoráveis a formação de florações de cianobactérias. A ocorrência de florações nesses ambientes provavelmente está correlacionada a fontes externas como represamento a montante (usinas hidrelétricas) e despejo de efluentes de lagoas de tratamento de esgoto e tanques de piscicultura. São classificados como lóticos os rios, riachos, arroios, córregos.

Mananciais lênticos são aqueles com maior probabilidade de ocorrência de cianobactérias, provavelmente por apresentarem as condições ideais para o seu desenvolvimento (alto de tempo de retenção da água, baixa velocidade de correnteza e acúmulo de nutrientes como nitrogênio e fósforo). São classificados como lênticos as represas, lagos e barragens.

Ambientes lóticos e lênticos apresentam características intrínsecas que fazem com que apresentem probabilidades de ocorrência de floração diferenciada (risco associado), sendo menor nos ambientes lóticos e maior nos lênticos.

## **Verificação, a partir de dados históricos para o monitoramento de cianobactérias, da frequência de ocorrência de florações.**

Desde o ano de 2000, as companhias de saneamento devem monitorar os mananciais utilizados para abastecimento público para a quantificação de cianobactérias. A partir desses dados de série histórica, deve-se verificar o percentual anual de ocorrência de floração de cianobactérias e inseri-lo em uma das categorias descritas abaixo:

- a) Categoria I: Ambientes lóticos sem ocorrência anual de florações de cianobactérias.
- b) Categoria II: Ambientes lóticos com ocorrência anual de florações em até 50% das amostras.
- c) Categoria III: Ambientes lóticos com ocorrência anual de florações acima de 51% das amostras e ambientes lênticos.
- d) Categoria IV: Ambientes lênticos independentes da ocorrência anual de florações de cianobactérias.

### **Categoria I: Mananciais lóticos sem ocorrência anual de florações de cianobactérias**

Em mananciais lóticos (rios, riachos, arroios) onde há dados referentes à série histórica e esses resultados não indicaram ocorrência de cianobactérias acima da concentração de 10.000 cel/mL, o risco associado a esses eventos é baixo. Sendo assim, o aumento repentino na concentração de clorofila-a pode indicar uma floração de outro grupo fitoplanctônico ou até mesmo a entrada no manancial de cianobactérias oriundas de ambientes à montante (lançamento de efluente). Caso tal fato

ocorra, o gestor terá tempo hábil de confirmar a presença de cianobactérias, ou se o aumento seja muito acentuado, concomitantemente poderá realizar análise para quantificação de cianotoxinas na água. Deve-se, portanto, seguir o fluxograma descrito no Figura 3.

### Nível de vigilância

A amostragem para determinação da concentração de clorofila-a no manancial deverá ser realizada mensalmente. Caso a concentração determinada seja igual ou inferior a 10 µg/L, o monitoramento poderá continuar a ser realizado através desse parâmetro. Caso a concentração de clorofila-a seja superior a 10 µg/L e inferior a 24 µg/L, deve-se realizar análise para identificação e quantificação de cianobactérias. Se a concentração de clorofila-a extrapolar o valor de 24 µg/L, além da identificação e quantificação de cianobactérias deve-se realizar a análise para quantificação de cianotoxinas da água bruta.

### Nível de alerta 1

Se a análise de cianobactérias identificar uma concentração inferior a 10.000 cel/mL, o monitoramento por concentração de clorofila-a pode ser recommçado. Caso indique uma concentração de cianobactérias igual ou superior a 10.000 cel/mL e inferior a 20.000 cel/mL, a frequência de monitoramento deverá ser alterada para semanal.

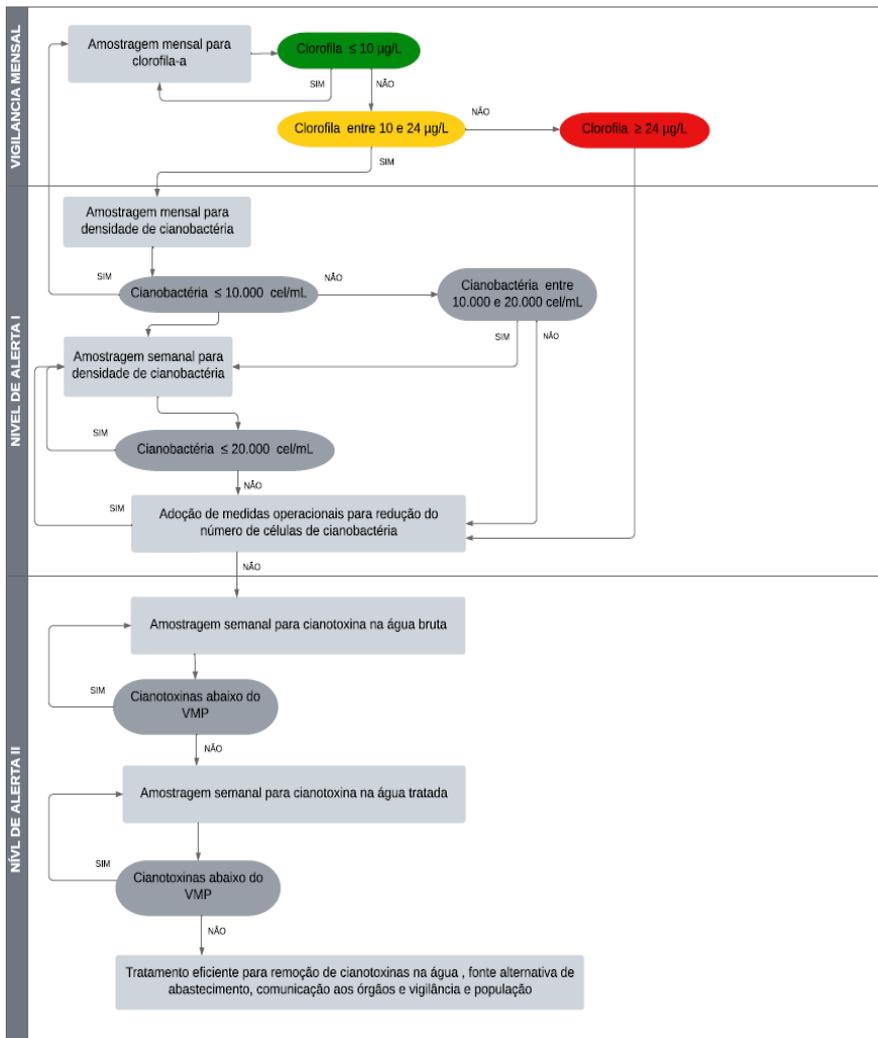
### Nível de alerta 2

Se a concentração for superior ou igual a 20.000 cel/mL, o monitoramento de cianotoxinas na água bruta deverá ser iniciado. Caso ultrapasse os valores máximos permitidos, o monitoramento deverá se estender à água

tratada, também em frequência semanal.

**Figura 3**

**Fluxograma para monitoramento de mananciais sem ocorrência de eventos de floração de cianobactérias.**



## **Categoria II: Mananciais lóticos com ocorrência anual de florações de cianobactérias em até 50% das amostras**

Em mananciais lóticos com histórico de baixa ocorrência de florações, o risco associado é médio. Nesse caso, a frequência de monitoramento não é, a princípio alterada, mas sim o valor referência para concentração de clorofila-a. Nesses casos, como os eventos de floração são menos frequentes, um aumento na concentração de clorofila-a pode indicar que está ocorrendo um aumento na densidade de cianobactérias e a floração está na iminência de ocorrer. Propõe-se, portanto, não somente uma diminuição no valor da concentração de clorofila-a, mas também um aumento na frequência do monitoramento. Caso o valor para concentração de clorofila-a continue a aumentar e ultrapasse os outros limites definidos, o gestor deverá confirmar a presença de cianobactérias e cianotoxinas na água bruta (concomitantemente). Deve-se, portanto, seguir o fluxograma descrito no Figura 4.

### Nível de vigilância

A amostragem para determinação da concentração de clorofila-a no manancial deverá ser realizada mensalmente. Caso a concentração determinada seja igual ou inferior a 6,5 µg/L, o monitoramento poderá continuar a ser realizado através desse parâmetro. Caso a concentração de clorofila-a seja superior a 6,5 µg/L e inferior a 10 µg/L, deve-se alterar a frequência de amostragem para semanal e se estiver entre 10 e 15 µg/L deverá ser realizada a identificação em contagem de cianobactérias. Se a concentração de clorofila-a extrapolar o valor de 15,5 µg/L, além da identificação e quantificação de cianobactérias deve-se realizar a análise para quantificação de cianotoxinas da água bruta.

### Nível de alerta 1

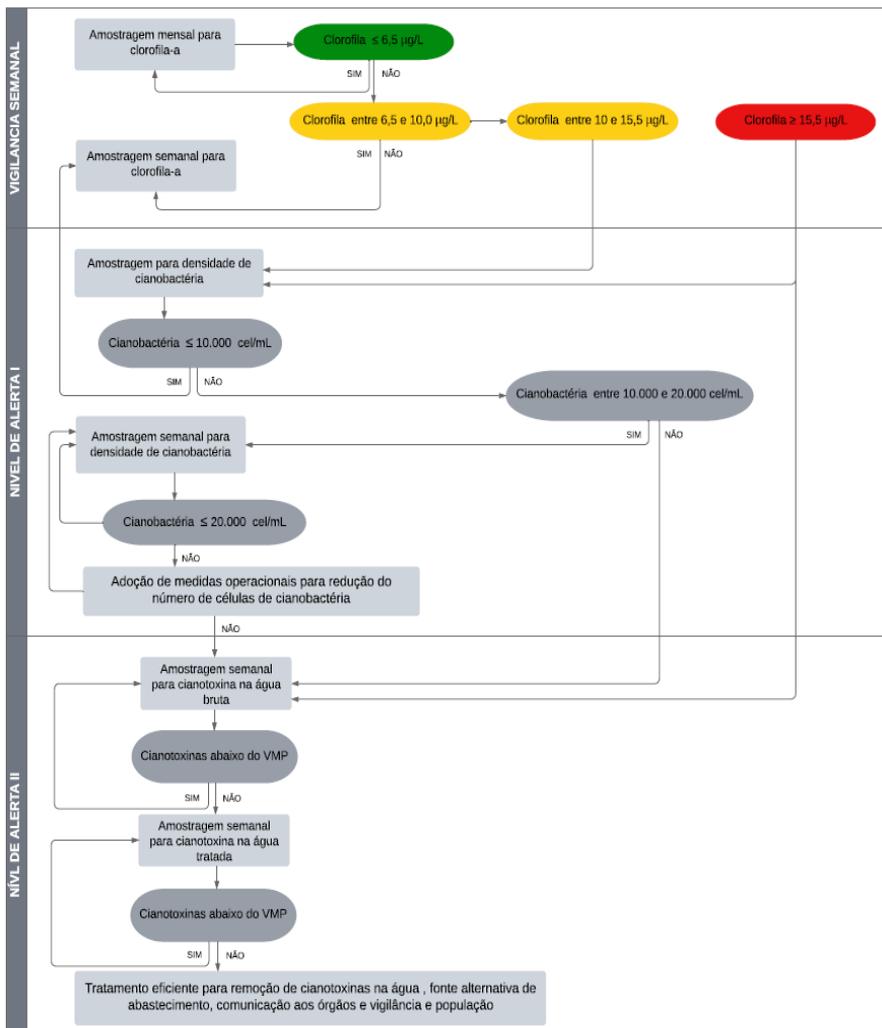
Se a análise de cianobactérias identificar uma concentração inferior a 10.000 cel/mL, o monitoramento por concentração de clorofila-a pode ser recommençado. Caso indique uma concentração de cianobactérias igual ou superior a 10.000 cel/mL e inferior a 20.000 cel/mL, a frequência de monitoramento deverá ser alterada para semanal.

### Nível de alerta 2

Se a concentração for superior ou igual a 20.000 cel/mL, o monitoramento de cianotoxinas na água bruta deverá ser iniciado. Caso ultrapasse os valores máximos permitidos, o monitoramento deverá se estender à água tratada, também em frequência semanal.

**Figura 4**

**Fluxograma para monitoramento de mananciais com ocorrência de eventos de floração de cianobactérias em até 50% das amostras.**



### **Categoria III: Mananciais lóuticos com ocorrência anual de florações de cianobactérias acima de 50% das amostras**

Em mananciais lóuticos com histórico de alta ocorrência de florações e mananciais lênticos, o risco associado é alto. Dessa forma, a frequência inicial de monitoramento é alterada, ocorrendo em intervalo de tempo menor (semanal), assim como a concentração limite de clorofila-a. Devido ao elevado risco à saúde pública relacionados à esses eventos, o gestor ao identificar a ultrapassagem dos limites estabelecidos para concentração de clorofila-a deve realizar não somente a quantificação de cianotoxinas na água bruta como também na água tratada. Deve-se, portanto, seguir o fluxograma descrito no Figura 5.

#### Nível de vigilância

A amostragem para determinação da concentração de clorofila-a no manancial deverá ser realizada semanalmente. Caso a concentração determinada seja igual ou inferior a 2,7 µg/L, o monitoramento poderá continuar a ser realizado através desse parâmetro. Caso a concentração de clorofila-a seja superior a 2,7 µg/L e inferior a 5,5 µg/L, deverá ser realizada a identificação em contagem de cianobactérias. Se a concentração de clorofila-a estiver entre de 5,5 e 16,7 µg/L, além da identificação e quantificação de cianobactérias deverá ser realizada a análise para quantificação de cianotoxinas da água bruta. Caso a concentração de clorofila-a extrapole a concentração de 16,7 µg/L, além da identificação e quantificação de cianobactérias deverá ser realizada a análise para quantificação de cianotoxinas da água tratada.

### Nível de alerta 1

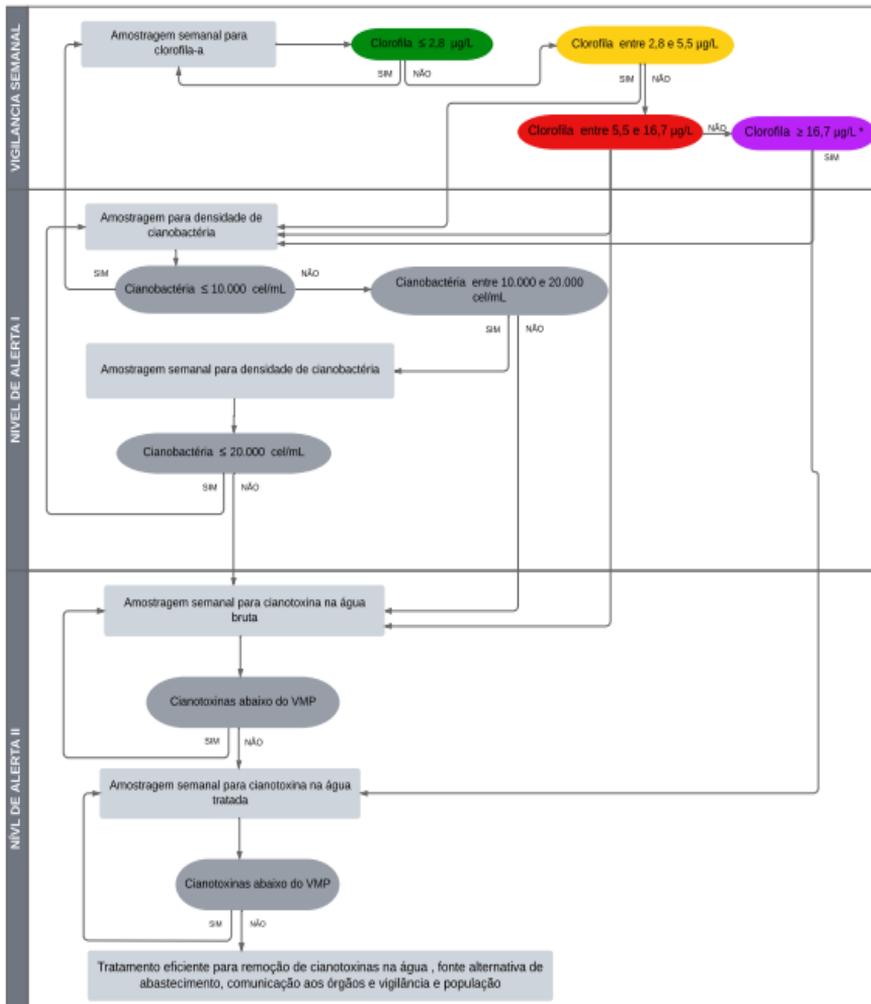
Se a análise de cianobactérias identificar uma concentração inferior a 10.000 cel/mL, o monitoramento por concentração de clorofila-a pode ser recommçado. Caso indique uma concentração de cianobactérias igual ou superior a 10.000 cel/mL e inferior a 20.000 cel/mL, a frequência de monitoramento deverá ser alterada para semanal.

### Nível de alerta 2

Se a concentração for superior ou igual a 20.000 cel/mL, o monitoramento de cianotoxinas na água bruta deverá ser iniciado. Caso ultrapasse os valores máximos permitidos, o monitoramento deverá se estender à água tratada, também em frequência semanal.

**Figura 5**

**Fluxograma para monitoramento de mananciais com ocorrência de eventos de floração de cianobactérias acima de 50% das amostras e mananciais lênticos.**



## CONSIDERAÇÕES FINAIS

---

O monitoramento é um componente primordial na avaliação e quantificação dos riscos. Como não é possível monitorar todo o manancial o tempo todo, o programa de monitoramento para um sistema de abastecimento de água deve ser estruturado de uma maneira que os dados gerados sejam interpretados e utilizados de forma a identificar os riscos associados a esses resultados e que façam parte dos processos de tomada de decisão. O monitoramento da qualidade não pode evitar que água fora dos padrões estabelecidos seja fornecida aos consumidores. Um monitoramento adequado e eficiente diminui o risco associado ao consumo de água fora dos padrões de qualidade.

Os resultados analíticos do monitoramento tornam-se disponíveis em tempos variados (horas, dias ou semanas, dependendo do método analítico ou distância entre o local e o laboratório apto), portanto, após a água ter sido fornecida e qualquer ação corretiva possa ser realizada em tempo hábil. Nesse sentido, é crítico que a coleta da amostra, a realização do ensaio analítico, disponibilização dos resultados e a interpretação do mesmo seja realizada em tempo mínimo adequado para que as ações operacionais possam ser realizadas e o risco do consumo de água inadequada seja diminuído.

Importante salientar que sempre que o monitoramento de cianobactérias, realizado pelo responsável pelo sistema de abastecimento, identificar possíveis situações de risco à saúde pública, as autoridades de saúde local

devem ser comunicadas. Essa comunicação deve vir acompanhada de planos de ação e medidas eficazes imediatas para diminuição do risco à saúde pública e para garantir fornecimento de água de qualidade à população.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA). **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 23. ed. Washington DC: APHA Press, 2017. p. 874

BONILLA, S. et al. What drives the distribution of the bloom-forming cyanobacteria *Planktothrix agardhii* and *Cylindrospermopsis raciborskii*? **FEMS Microbiology Ecology**, v. 79, n. 3, p. 594–607, 28 nov. 2011.

BRASIL; MINISTÉRIO DA SAÚDE. **PORTARIA GM/MS Nº 888, DE 4 DE MAIO DE 2021 - DOU - Imprensa Nacional**. Disponível em: <<https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-gm/ms-n-888-de-4-de-maio-de-2021-318461562>>.

CHORUS, I.; WELKER, M. **Toxic cyanobacteria in water : a guide to their public health consequences, monitoring and management**. 2. ed. Boca Raton: Crc Press / Tayldor & Francis Group, 2021.

YEMA, L.; LITCHMAN, E.; PINTO, P. T. The role of heterocytes in the physiology and ecology of bloom-forming harmful cyanobacteria. **Harmful Algae**, v. 60, p. 131–138, dez. 2016.

KOMÁREK J; JOHANSEN J.R. Chapter 4 - Filamentous Cyanobacteria. In: Aquatic Ecology, Freshwater Algae of North America (Segunda Edição), p. 135-235, 2015.

