

## **Análise da qualidade da água do açude Gavião em Fagundes/PB: Uma abordagem integrada entre o volume armazenado (2021–2025) e os parâmetros físico-químicos e microbiológicos**

**Samuel Florencio Dantas** (UFCG-CDSA) *samuel.florencio@estudante.ufcg.edu.br*

**Jonny Klan de Araújo** (UFCG-CDSA) *jonnyklan81@hotmail.com*

**Bruno Pereira Diniz** (UFCG-CDSA) *bruno.pereira@estudante.ufcg.edu.br*

**Morganna Eugênia Silva Santos**, UFCG-CDSA, *morganna.eugenia@gmail.com*

**Luciano Felix da Silva**, UFCG-CDSA, *lucianofelixx21@gmail.com*

**Daniel Augusto de Moura Pereira**, UFCG-CDSA, *danielmoura@ufcg.edu.br*

### **Resumo**

A qualidade da água em reservatórios do semiárido nordestino é influenciada pela variabilidade climática, pela oscilação do volume armazenado e por pressões antrópicas, exigindo análises integradas entre quantidade e qualidade hídrica. Neste estudo, analisa-se a dinâmica do volume armazenado do Açude Gavião, localizado no município de Fagundes-PB, entre 2021 e 2025, articulando essa série hidrológica aos resultados de parâmetros físico-químicos e microbiológicos da água bruta captada para abastecimento. Foram considerados cor aparente, turbidez, pH, condutividade, sólidos dissolvidos totais, cloretos, salinidade, coliformes totais e *Escherichia coli*. Os resultados evidenciaram condição crítica de armazenamento em 2021, com mínimo de 15,78%, seguida de recuperação em 2022, estabilização em níveis elevados em 2023 e 2024 e redução moderada em 2025. Observou-se, ainda, comportamento sazonal compatível com a dinâmica hidrológica regional, com maiores ganhos no primeiro semestre e perdas mais frequentes ao final do ano. A análise integrada indicou que períodos de menor armazenamento tendem a intensificar a concentração de sais e a ampliar a vulnerabilidade microbiológica do manancial, aumentando a pressão sobre a tratabilidade da água. Como contribuição metodológica, propõe-se um Índice Integrado de Risco e Conformidade, com apoio do Método de Borda, para sintetizar o desempenho relativo dos anos analisados e subsidiar decisões de gestão, vigilância e regulação.

**Palavras-Chaves:** *Qualidade da Água, Açude Gavião, Método de Borda, Gestão e Regulação.*



## Abstract

Water quality in reservoirs located in Brazil's semi-arid region is influenced by climate variability, fluctuations in stored volume, and anthropogenic pressures, requiring integrated analyses between water availability and water quality. This study analyzes the dynamics of the stored volume of the Gavião Reservoir, located in Fagundes, Paraíba, from 2021 to 2025, relating this hydrological series to physicochemical and microbiological parameters of raw water collected for public supply. The parameters considered were apparent color, turbidity, pH, conductivity, total dissolved solids, chlorides, salinity, total coliforms, and *Escherichia coli*. The results showed a critical storage condition in 2021, with a minimum of 15.78%, followed by recovery in 2022, stabilization at high levels in 2023 and 2024, and a moderate decline in 2025. Seasonal behavior consistent with the regional hydrological regime was also observed, with greater increases in the first half of the year and more frequent losses toward the end of the year. The integrated analysis indicated that lower storage periods tend to intensify salt concentration and increase the microbiological vulnerability of the reservoir, raising pressure on water treatability. As a methodological contribution, an Integrated Risk and Compliance Index supported by the Borda Method is proposed to synthesize the relative performance of the analyzed years and support management, surveillance, and regulatory decisions.

**Keywords:** *Water Quality, Gavião Dam, Edge Method, Management and Regulation.*

## 1. Introdução

Reservatórios destinados ao abastecimento humano no semiárido brasileiro operam em condições hidrológicas particularmente sensíveis, marcadas pela irregularidade das precipitações, por longos períodos de estiagem e por eventos concentrados de recarga (Meira Neto et al., 2024). Essa dinâmica interfere diretamente no comportamento limnológico dos mananciais, uma vez que afeta o tempo de residência da água, a capacidade de diluição, a concentração de sais e nutrientes, a ressuspensão de sedimentos e a estabilidade da coluna d'água (ANA, 2023; Von Sperling, 1996).

Como consequência, a interpretação da qualidade da água em tais sistemas não pode se restringir à leitura isolada de resultados laboratoriais, sendo indispensável considerar a evolução do volume armazenado e a sazonalidade hidrológica como componentes centrais da análise (Lucas et al., 2025).

Em reservatórios superficiais inseridos em regiões semiáridas, a redução do volume armazenado costuma agravar processos de concentração, aumentar a suscetibilidade à deterioração físico-química e favorecer condições propícias à proliferação de microrganismos e florações de cianobactérias (Von Sperling, 1996).

Além disso, variações rápidas na disponibilidade hídrica podem alterar significativamente a turbidez, a cor aparente, a mineralização e outros parâmetros relevantes para a tratabilidade da água captada. Nesse sentido, o monitoramento da qualidade da água demanda uma abordagem integrada, capaz de articular variáveis hidrológicas e indicadores sanitários, operacionais e ambientais (ANA, 2023).

No campo normativo, a Portaria GM/MS nº 888/2021 (Brasil, 2021) estabelece os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano, reforçando a necessidade de monitoramento contínuo e de gestão orientada por risco. Embora boa parte de seus parâmetros seja dirigida à água distribuída à população após tratamento, seus referenciais constituem base importante para a interpretação das pressões que recaem sobre a água bruta e sobre o desempenho operacional do sistema de abastecimento (Quon; Jiang, 2023). Assim, sua utilização como parâmetro analítico pode contribuir para identificar vulnerabilidades, antecipar desafios de tratabilidade e subsidiar decisões de gestão.

Diante desse contexto, o presente estudo tem como objetivo analisar o comportamento do volume armazenado do Açude Gavião, localizado no município de Fagundes-PB, entre os anos de 2021 e 2025, utilizando essa dinâmica como base para uma avaliação integrada da

qualidade da água. De forma complementar, propõe-se uma estrutura analítica que articula resultados laboratoriais de parâmetros físico-químicos e microbiológicos com uma estratégia de síntese multicritério, de modo a ampliar a capacidade interpretativa do monitoramento. Com isso, busca-se oferecer uma leitura mais robusta do desempenho do manancial, contribuindo para o aprimoramento da gestão operacional, da vigilância sanitária e da regulação em sistemas de abastecimento vulneráveis à variabilidade climática.

## **2. Referencial Teórico**

### **2.1 Qualidade da água em reservatórios do semiárido**

A qualidade da água em reservatórios resulta da interação entre processos físicos, químicos e biológicos, sendo fortemente influenciada pelo regime hidrológico e pelas condições de armazenamento. Em sistemas situados no semiárido, essa relação torna-se ainda mais expressiva, uma vez que a irregularidade das chuvas e a elevada taxa de evaporação impõem oscilações relevantes no volume acumulado ao longo do ano. Nesses contextos, a disponibilidade hídrica não representa apenas um indicador quantitativo, mas também um fator determinante para a compreensão do comportamento qualitativo do manancial (Liu et al., 2024).

Em períodos de menor armazenamento, observa-se frequentemente redução da capacidade de diluição, aumento relativo da concentração de sais e nutrientes, prolongamento do tempo de residência da água e maior sensibilidade à influência de cargas difusas e pontuais. Tais condições podem favorecer processos de mineralização, deterioração estética da água e intensificação de riscos sanitários, sobretudo quando associadas a temperaturas elevadas e baixa renovação hídrica. Em contrapartida, em períodos de recarga, a entrada de água pode provocar mudanças bruscas nos padrões de mistura, turbidez e transporte de material em suspensão, produzindo novos desafios interpretativos e operacionais (Alkhadher et al., 2025).

Desse modo, a avaliação da qualidade da água em reservatórios do semiárido exige abordagem sistêmica, na qual a série hidrológica seja tratada como variável explicativa central, e não apenas como pano de fundo para a leitura dos parâmetros laboratoriais. A análise integrada entre volume armazenado e qualidade da água permite identificar padrões de vulnerabilidade, compreender momentos críticos do sistema e orientar estratégias de monitoramento mais aderentes à realidade hidrológica do reservatório (Granata; Di Nunno, 2026).

## 2.2 Padrão de potabilidade e monitoramento (Portaria GM/MS nº 888/2021)

A qualidade da água destinada ao abastecimento humano no Brasil é regulada por um conjunto de normas que estabelecem padrões de referência e procedimentos de controle e vigilância. Entre elas, a Portaria GM/MS nº 888/2021 ocupa posição central ao definir parâmetros microbiológicos, físico-químicos e operacionais que devem ser acompanhados no sistema de abastecimento. Mais do que uma norma de verificação final da água distribuída, a Portaria também orienta uma lógica preventiva de gestão, baseada na identificação de riscos e no fortalecimento das barreiras sanitárias ao longo do processo de captação, tratamento e distribuição (IBEAS, 2021).

No caso de sistemas com captação em mananciais superficiais, a norma reforça a importância do acompanhamento sistemático de variáveis que influenciam diretamente a segurança da água, como turbidez, indicadores microbiológicos e parâmetros associados ao controle de cianobactérias e cianotoxinas (OMS, 2022). Ainda que os valores máximos permitidos tenham aplicação direta sobretudo sobre a água tratada e distribuída, sua leitura no contexto da água bruta pode desempenhar relevante função analítica. Isso porque resultados desfavoráveis na captação indicam maior pressão sobre o tratamento, maior exigência operacional e maior necessidade de vigilância da eficiência do sistema.

Assim, a referência normativa não deve ser utilizada de forma mecânica ou descontextualizada, mas como instrumento de interpretação crítica da qualidade do manancial. Em estudos que trabalham com água bruta, como o presente, o uso desses parâmetros exige mediação conceitual: não se trata de afirmar automaticamente descumprimento de potabilidade na fonte, mas de evidenciar condições que podem ampliar o risco sanitário e comprometer a tratabilidade, o que é plenamente pertinente em uma perspectiva de gestão preventiva e orientada por risco (Silva; Moraes; Urtiga, 2022).

## 2.3 Tomada de decisão e síntese multicritério

A gestão da qualidade da água envolve múltiplas dimensões analíticas e decisórias. Um mesmo manancial pode apresentar, simultaneamente, bom desempenho em determinados parâmetros e fragilidades em outros, o que dificulta interpretações lineares e compromete a construção de diagnósticos consistentes quando a análise se restringe à leitura isolada de cada variável. Em razão disso, métodos multicritério têm sido amplamente utilizados em problemas ambientais e de gestão de recursos hídricos, pois possibilitam organizar informações

heterogêneas, reduzir ambiguidades e apoiar processos de decisão mais transparentes (Gomes; Gomes, 2019).

No caso do monitoramento da qualidade da água, a utilidade das abordagens multicritério reside justamente na possibilidade de integrar indicadores com naturezas distintas, escalas diferentes e significados complementares (Srivastava; Gaur; Ohri, 2024). Parâmetros hidrológicos, microbiológicos e físico-químicos nem sempre apontam na mesma direção, e sua interpretação demanda ferramenta capaz de preservar essa complexidade sem perder a objetividade analítica. A síntese multicritério permite comparar cenários, períodos ou alternativas a partir de critérios múltiplos, construindo uma visão mais abrangente do desempenho do sistema (Sahoo; Goswami, 2023).

Entre os métodos de agregação ordinal, o Método de Borda apresenta vantagens relevantes para aplicações desse tipo. Sua lógica baseia-se na ordenação relativa das alternativas em cada critério ou bloco de critérios, seguida da agregação dos rankings parciais em uma classificação final (Franceschini; Maisano; Mastrogiacomio, 2022). Trata-se de procedimento particularmente útil quando o objetivo não é produzir um índice absoluto de qualidade, mas estabelecer comparação estruturada entre diferentes períodos de observação. No contexto deste estudo, o Método de Borda foi adotado como estratégia de síntese entre os blocos hidrológico, físico-químico e microbiológico, permitindo comparar o desempenho relativo dos anos de 2021 a 2025.

É importante destacar, contudo, que a síntese multicritério não substitui a leitura individual dos parâmetros. Ao contrário, sua função é complementar a análise, transformando um conjunto disperso de evidências em uma estrutura interpretativa mais clara para apoiar decisões de gestão. Nesse sentido, a utilização do Método de Borda no presente trabalho não pretende simplificar indevidamente o problema, mas fornece uma camada adicional de inteligência analítica para a compreensão integrada do comportamento do Açude Gavião ao longo do período estudado.

### **3. Metodologia**

#### **3.1 Área de estudo**

O estudo foi desenvolvido com base no Açude Gavião, localizado no município de Fagundes, no estado da Paraíba. O reservatório possui capacidade de 1.450.840,00 m<sup>3</sup> e está

inserido nos domínios da bacia hidrográfica da Região do Baixo Curso do Rio Paraíba. Como manancial superficial utilizado no contexto do abastecimento, o açude encontra-se sujeito tanto à variabilidade climática característica do semiárido quanto às influências decorrentes do uso e ocupação do solo em sua área de contribuição.

A escolha do Açude Gavião como objeto de estudo justifica-se por sua relevância local e pela necessidade de compreender, de forma integrada, a relação entre disponibilidade hídrica e qualidade da água em reservatórios de pequeno e médio porte inseridos em contextos de vulnerabilidade hídrica. Nesse tipo de sistema, oscilações no volume armazenado podem repercutir diretamente sobre a tratabilidade e sobre o risco sanitário associado à água captada, o que torna pertinente a construção de análises que articulem quantidade e qualidade em perspectiva temporal.

### **3.2 Base de dados hidrológica (2021–2025)**

A base hidrológica utilizada compreendeu dados mensais do volume do reservatório entre janeiro de 2021 e novembro de 2025, totalizando 59 observações. Foram consideradas as variáveis volume percentual armazenado, volume absoluto em metros cúbicos e registro de afluência/defluência, conforme disponibilidade da base. A organização dos dados incluiu padronização de separadores decimais, conversão e ordenação das datas e tratamento de ausências indicadas por traço, especialmente na variável afluência/defluência.

Após a etapa de preparação, os dados foram submetidos a conferência de consistência por meio de planilha e verificação computacional, buscando reduzir riscos de erro de digitação, desalinhamento temporal e inconsistências de formatação. A utilização da série mensal permitiu observar não apenas o comportamento geral do reservatório ao longo do quinquênio, mas também sua dinâmica intra-anual, aspecto fundamental para a interpretação sazonal dos resultados.

### **3.3 Estratégia de análise de dados**

A base de qualidade da água foi composta por 57 relatórios de ensaio referentes à água bruta coletada na entrada da ETA de Fagundes, abrangendo o período de 2021 a 2025 (CAGEPA, 2025). Foram considerados os parâmetros físico-químicos cor aparente, turbidez, pH, condutividade, sólidos dissolvidos totais, cloretos e salinidade, além dos indicadores

microbiológicos coliformes totais e *Escherichia coli*. Os dados laboratoriais foram organizados por campanha e, posteriormente, consolidados por ano, de modo a permitir leitura comparativa em escala temporal.

A estratégia analítica foi desenvolvida em duas frentes complementares. Na primeira, realizou-se a caracterização estatística da dinâmica hidrológica do açude, com cálculo de média, mínimo, máximo e coeficiente de variação por ano, identificação de extremos e análise do comportamento sazonal dos ganhos e perdas mensais. De maneira complementar, utilizou-se o teste não paramétrico de Mann-Kendall em caráter exploratório, com o objetivo de observar indícios de tendência temporal, reconhecendo-se as limitações associadas à autocorrelação em séries hidrológicas.

Na segunda frente, os resultados laboratoriais foram interpretados individualmente e de forma integrada. Inicialmente, cada parâmetro foi analisado à luz de valores de referência normativos e técnicos, respeitando-se a distinção entre água bruta e água tratada. Em seguida, os indicadores foram organizados em blocos analíticos e articulados à dinâmica do volume armazenado, buscando compreender em que medida a oscilação hidrológica se associou a mudanças nos padrões de qualidade da água ao longo do período estudado.

### **3.4 Protocolo para integração e síntese multicritério**

A integração entre quantidade e qualidade da água foi estruturada a partir de três eixos analíticos: conformidade, risco sanitário e síntese multicritério. No eixo de conformidade, os resultados dos parâmetros foram comparados com valores de referência presentes em normas e literatura técnica, com o objetivo de identificar excedências, recorrências e comportamentos críticos. No eixo de risco sanitário, a interpretação concentrou-se na relevância dos parâmetros para a segurança do sistema de abastecimento, sobretudo no que se refere à presença de microrganismos indicadores, elevação da turbidez, piora da cor aparente e intensificação da mineralização da água.

A partir desses dois eixos, foi concebido o Índice Integrado de Risco e Conformidade, entendido neste estudo como instrumento de síntese interpretativa do desempenho relativo do manancial. Para sua operacionalização, os anos analisados foram comparados em três blocos: hidrológico, físico-químico e microbiológico. No bloco hidrológico, consideraram-se indicadores como volume médio, volume mínimo e estabilidade relativa ao longo do ano. No bloco físico-químico, foram observados os resultados consolidados de cor aparente, turbidez,



pH, condutividade, sólidos dissolvidos totais, cloretos e salinidade. No bloco microbiológico, a análise centrou-se na frequência de detecção e nas medidas-resumo de coliformes totais e *Escherichia coli*.

Em seguida, os anos foram ordenados em cada bloco segundo desempenho relativo e os rankings parciais foram agregados por meio do Método de Borda. O objetivo dessa etapa não foi produzir um valor absoluto de qualidade, mas construir uma ordenação comparativa capaz de sintetizar o comportamento do açude ao longo do período estudado. Assim, a abordagem multicritério foi utilizada como instrumento complementar à análise estatística e normativa, ampliando a capacidade interpretativa do estudo e oferecendo base mais consistente para decisões operacionais, sanitárias e regulatórias.

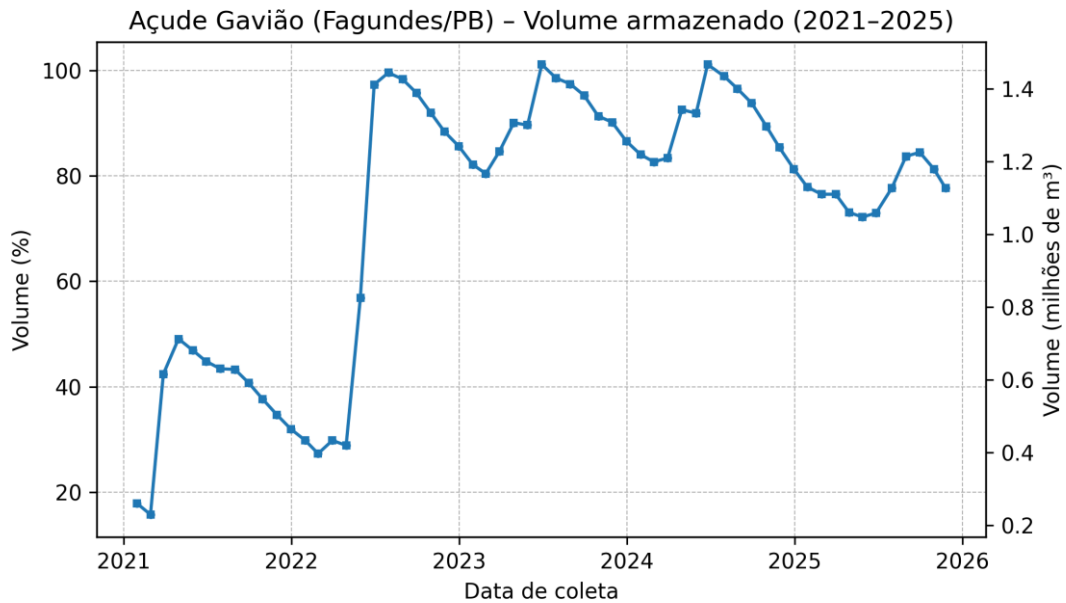
## **4. Resultados e Discussão**

### **4.1 Visão geral da série**

A análise da série temporal do volume armazenado do Açude Gavião evidenciou comportamento hidrológico fortemente oscilante ao longo do período de 2021 a 2025, refletindo a sensibilidade típica dos reservatórios do semiárido às variações sazonais de precipitação e recarga. No intervalo estudado, o reservatório apresentou volume médio de 72,88%, com amplitude entre 15,78% e 101,10%. Em termos absolutos, a média foi de 1.057.394 m<sup>3</sup>, com mínimo de 228.970 m<sup>3</sup> e máximo de 1.466.789 m<sup>3</sup>.

O ponto mais crítico foi registrado em 28/02/2021, quando o açude atingiu 15,78% de armazenamento, ao passo que o maior valor foi observado em 30/06/2023, com 101,10%, indicando situação próxima ao limite máximo operacional do reservatório. A trajetória anual pode ser visualizada de forma sintética na Figura 1, que evidência tanto o período de forte restrição hídrica em 2021 quanto a recuperação posterior do sistema.

**Figura 1** - Açude Gavião (Fagundes/PB): volume armazenado (2021–2025)



**Fonte:** Adaptado dos dados hidrológicos da AESA (2021–2025)

A Figura 1 permite perceber que o comportamento do açude não foi linear ao longo do quinquênio. Há, inicialmente, uma condição de baixa disponibilidade, seguida por recuperação acentuada, estabilidade em níveis elevados e, ao final da série, uma tendência de redução moderada. Essa leitura é importante porque afasta interpretações pontuais e mostra que a dinâmica do reservatório deve ser compreendida como processo temporal, marcado por momentos de escassez, transição e relativa estabilização.

Do ponto de vista analítico, esse comportamento constitui a base para a leitura integrada da qualidade da água, uma vez que variações no volume armazenado tendem a repercutir sobre concentração de sais, dinâmica microbiológica e esforço operacional do tratamento.

## 4.2 Estatística anual e variabilidade

A Tabela 1 consolida os indicadores descritivos anuais do volume armazenado e permite identificar, com maior clareza, a mudança de patamar hidrológico observada ao longo do período. O ano de 2021 apresentou o cenário mais restritivo, com volume médio de 37,39%, mínimo de 15,78% e máximo de 49,09%, revelando que o reservatório permaneceu durante todo o ano em condição relativamente desfavorável.

Em 2022, verificou-se forte recuperação, com média de 69,13% e máximo de 99,55%, o que indica reabastecimento expressivo do sistema. Nos anos de 2023 e 2024, o reservatório manteve-se em patamar elevado e relativamente estável, com médias de 90,60% e 90,06%, respectivamente. Já em 2025, embora o volume médio ainda tenha permanecido acima de 77%, observou-se redução em relação aos dois anos anteriores, sugerindo perda parcial do patamar de segurança hídrica recentemente alcançado.

**Tabela 1** - Estatística descritiva do volume do Açude Gavião por ano (2021–2025)

| Ano  | n<br>(meses) | Volume<br>médio<br>(%) | Mín (%) | Máx (%) | Volume médio<br>(10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> ) | Mín<br>(10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> ) | Máx<br>(10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> ) | CV (m <sup>3</sup> ) |
|------|--------------|------------------------|---------|---------|---------------------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------|----------------------|
| 2021 | 12           | 37,39                  | 15,78   | 49,09   | 0,543                                             | 0,229                                    | 0,712                                    | 0,288                |
| 2022 | 12           | 69,13                  | 27,34   | 99,55   | 1,003                                             | 0,397                                    | 1,444                                    | 0,458                |
| 2023 | 12           | 90,60                  | 80,41   | 101,10  | 1,314                                             | 1,167                                    | 1,467                                    | 0,072                |
| 2024 | 12           | 90,06                  | 81,26   | 101,10  | 1,307                                             | 1,179                                    | 1,467                                    | 0,075                |
| 2025 | 11           | 77,62                  | 72,17   | 84,45   | 1,126                                             | 1,047                                    | 1,225                                    | 0,053                |

**Fonte:** Adaptado dos dados hidrológicos da AESA (2021–2025)

A leitura da Tabela 1 também permite discutir a variabilidade intra-anual do sistema. Em 2021 e 2022, os coeficientes de variação foram mais elevados, indicando maior instabilidade do comportamento hidrológico. Em 2023, 2024 e 2025, os coeficientes de variação foram mais baixos, o que sugere maior estabilidade relativa do volume ao longo do ano.

No entanto, essa estabilidade não deve ser interpretada automaticamente como sinônimo de condição qualitativa favorável, pois, como se observará nas análises posteriores, a manutenção de volumes elevados não impediu a persistência ou mesmo o agravamento de determinados parâmetros de qualidade. Portanto, a Tabela 1 cumpre papel importante não apenas descritivo, mas também interpretativo, ao evidenciar que a evolução da disponibilidade hídrica foi heterogênea e produziu diferentes contextos de vulnerabilidade ao longo do quinquênio.

#### 4.3 Balanço mensal (afluência/defluência) e sazonalidade

A dinâmica mensal do reservatório reforça a leitura de sazonalidade típica da região semiárida. O maior ganho mensal ocorreu em 30/06/2022, com incremento de 586.091 m<sup>3</sup>,

enquanto a maior perda mensal foi registrada em 31/10/2024, com variação negativa de 63.944 m<sup>3</sup>.

Esses extremos indicam que o sistema responde de maneira sensível aos períodos de recarga concentrada e, em contrapartida, aos meses em que predominam perdas por consumo, evaporação e ausência de aporte significativo. Esse padrão reforça que a leitura da série não deve ser limitada aos valores médios anuais, pois parte importante da dinâmica do manancial se manifesta justamente na alternância entre ganhos rápidos e depleções graduais.

Do ponto de vista hidrológico, a sazonalidade observada é coerente com o regime regional, no qual as maiores entradas de água tendem a se concentrar no primeiro semestre, enquanto o final do ano costuma apresentar maior retração do volume acumulado. Essa característica é relevante porque influencia diretamente a interpretação da qualidade da água.

Em períodos de recarga, pode haver carreamento de material particulado, aumento da turbidez e alteração momentânea de alguns parâmetros. Em fases de retração, tornam-se mais prováveis processos de concentração, aumento do tempo de residência e intensificação da mineralização. Assim, o balanço mensal não constitui apenas informação complementar, mas elemento central para compreender por que determinados resultados laboratoriais se tornaram mais críticos em certos anos e menos em outros.

#### **4.4 Implicações para a qualidade da água (ponte para as análises laboratoriais)**

A análise hidrológica permite afirmar que a qualidade da água do Açude Gavião deve ser interpretada à luz da evolução do volume armazenado. Em reservatórios superficiais, especialmente em regiões semiáridas, a redução do armazenamento tende a intensificar a vulnerabilidade do sistema por diferentes mecanismos: concentração de sais e nutrientes, aumento do tempo de residência, maior estabilidade térmica da massa d'água e maior suscetibilidade a processos de deterioração biológica. Nesse sentido, o cenário de 2021 se destaca como referência crítica para a análise integrada, pois reuniu a condição de menor disponibilidade hídrica de toda a série.

Essa ponte entre quantidade e qualidade é decisiva para evitar interpretações fragmentadas. Um ano com forte recuperação volumétrica pode não apresentar, necessariamente, melhoria proporcional em todos os parâmetros qualitativos, do mesmo modo que um período de maior estabilidade hídrica pode coexistir com agravamento de mineralização ou persistência de carga microbiológica. Portanto, a leitura dos resultados laboratoriais nas

subseções seguintes deve ser entendida como desdobramento da própria dinâmica do reservatório, e não como análise isolada de amostras desconectadas da evolução temporal do manancial.

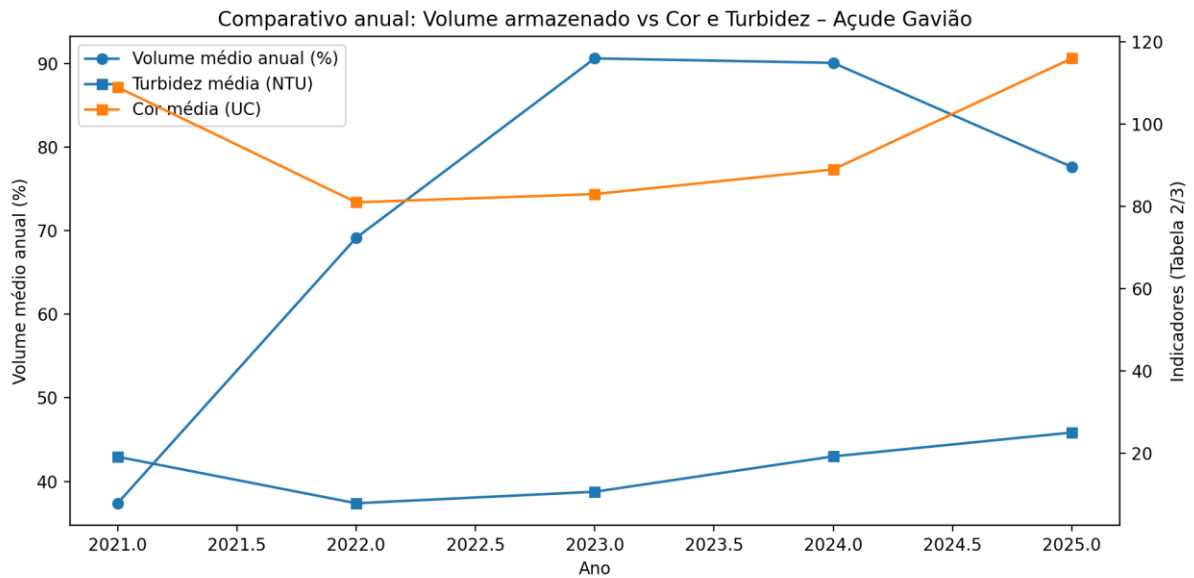
#### **4.5. Estrutura de Análise Integrada da Qualidade da Água**

A análise integrada da qualidade da água foi construída com base em 57 relatórios de ensaio referentes à água bruta coletada na entrada da ETA de Fagundes, abrangendo parâmetros físico-químicos e indicadores microbiológicos. Essa base permitiu avaliar o comportamento do manancial entre 2021 e 2025 sob uma perspectiva mais ampla, articulando dados laboratoriais com a série hidrológica previamente discutida.

Embora parte dos valores de referência utilizados derive da Portaria GM/MS nº 888/2021, a interpretação adotada neste estudo reconhece que se trata de água bruta, de modo que os excedentes observados não devem ser lidos como simples juízo de não conformidade da água distribuída, mas como indicativos de maior pressão sobre a tratabilidade e sobre o risco sanitário do sistema de abastecimento.

##### **4.5.1 Parâmetros Físico-Químicos**

Os parâmetros físico-químicos revelaram que o Açude Gavião apresentou, ao longo do período, problemas persistentes tanto do ponto de vista estético quanto operacional. A Figura 2, ao relacionar volume armazenado com cor aparente e turbidez, evidencia que a qualidade da água não variou apenas em função do aumento ou da redução do volume, mas também em função das condições específicas de cada ano, indicando que a recuperação hidrológica não foi automaticamente acompanhada de melhoria uniforme desses indicadores. Esse é um ponto importante da discussão, pois impede leituras simplistas em que mais água significaria, necessariamente, melhor qualidade.

**Figura 2** - Comparativo anual: volume armazenado vs cor e turbidez – Açude Gavião (2021–2025)


**Fonte:** Adaptado dos dados hidrológicos da AESA e dos relatórios de ensaio da Cagepa (2021–2025)

No caso da cor aparente, os resultados permaneceram elevados em todo o período, com médias anuais entre aproximadamente 81 e 116 UC e valor máximo de 301 UC em 30/03/2021. Tal comportamento indica persistência de influência de matéria orgânica dissolvida, partículas em suspensão e outros compostos que afetam a aparência e a tratabilidade da água. A manutenção de valores elevados mesmo em anos hidrológicamente mais favoráveis sugere que esse parâmetro reflete não apenas o volume armazenado, mas também a influência de processos internos do reservatório e de cargas externas associadas à bacia de contribuição.

A turbidez, por sua vez, também se apresentou como parâmetro crítico. A série mostrou predominância de valores acima do referencial de 5 NTU em grande parte das campanhas, com variação entre 0,29 e 76,9 NTU e máximo igualmente observado em 30/03/2021. Esse comportamento sugere aporte de material particulado, carreamento superficial, ressuspensão de sedimentos e, possivelmente, crescimento algal em determinados momentos.

A relevância desse resultado é reforçada pela Figura 2, que demonstra que os episódios mais problemáticos não se restringiram a um único ano, ainda que o cenário de 2021 tenha se destacado pela combinação entre baixa disponibilidade hídrica e piora simultânea de mais de um parâmetro.

A Tabela 2 consolida essa leitura ao apresentar as estatísticas anuais e as frequências de excedência dos parâmetros físico-químicos. Em 2021, a água apresentou cor média de 109 UC, turbidez média de 19,1 NTU, condutividade média de 581  $\mu\text{S}/\text{cm}$  e sólidos dissolvidos totais

médios de 602 mg/L. Em 2025, os resultados tornaram-se ainda mais preocupantes no bloco da mineralização, com condutividade média de 1605  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , SDT médio de 787 mg/L, cloretos médios de 311 mg/L e salinidade média de 0,8 ppt.

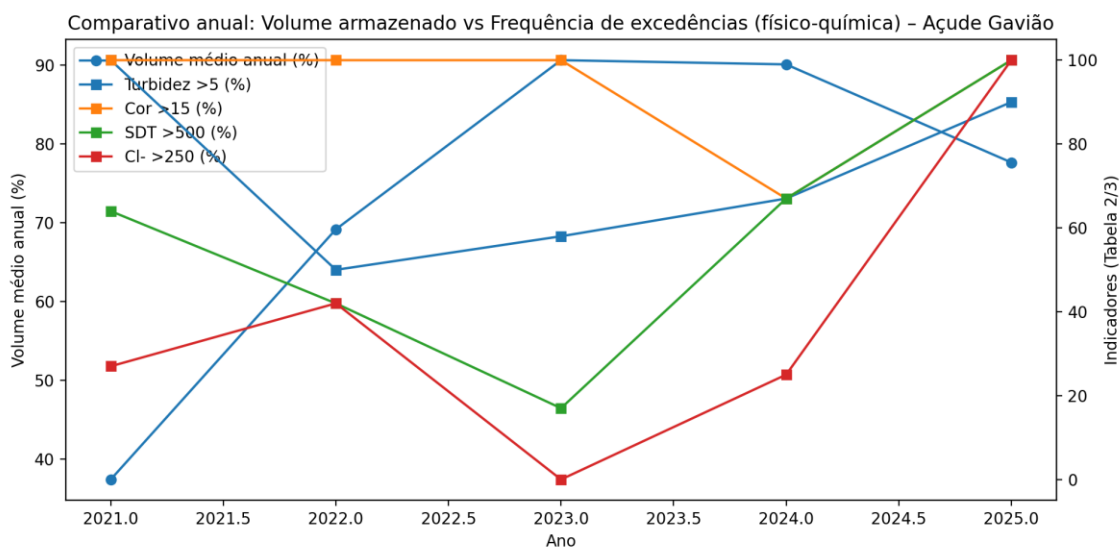
Além disso, a frequência de excedência foi particularmente elevada nesse ano: 100% para cor acima de 15, 90% para turbidez acima de 5, 100% para SDT acima de 500 e 100% para cloretos acima de 250. Esses achados mostram que o problema físico-químico do reservatório, sobretudo no bloco salino, não se restringiu ao período de menor armazenamento absoluto, mas ganhou força também em 2025, quando o volume ainda se mantinha relativamente elevado.

**Tabela 2** - Estatística anual dos parâmetros físico-químicos (água bruta, entrada da ETA) e frequência de excedência em relação aos valores de referência

| Ano  | n  | Cor<br>média<br>(UC) | Turb.<br>média<br>(NTU) | pH<br>médio | Cond.<br>média<br>( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) | SDT<br>médio<br>(mg/L) | Cl-<br>médio<br>(mg/L) | Salin.<br>média<br>(ppt) | %<br>Cor>15 | %<br>Turb>5 | % pH<br>fora<br>6-9 | %<br>SDT>500 | % Cl-<br>>250 |
|------|----|----------------------|-------------------------|-------------|-----------------------------------------------|------------------------|------------------------|--------------------------|-------------|-------------|---------------------|--------------|---------------|
| 2021 | 11 | 109                  | 19,1                    | 7,90        | 581                                           | 602                    | 282                    | 0,6                      | 100%        | 100%        | 0%                  | 64%          | 27%           |
| 2022 | 12 | 81                   | 7,8                     | 7,72        | 508                                           | 512                    | 248                    | 0,5                      | 100%        | 50%         | 0%                  | 42%          | 42%           |
| 2023 | 12 | 83                   | 10,6                    | 7,98        | 511                                           | 478                    | 187                    | 0,5                      | 100%        | 58%         | 0%                  | 17%          | 0%            |
| 2024 | 12 | 89                   | 19,2                    | 7,83        | 1137                                          | 552                    | 223                    | 0,6                      | 67%         | 67%         | 0%                  | 67%          | 25%           |
| 2025 | 10 | 116                  | 25,0                    | 8,46        | 1605                                          | 787                    | 311                    | 0,8                      | 100%        | 90%         | 30%                 | 100%         | 100%          |

**Fonte:** Adaptado dos relatórios de ensaio da Cagepa (2021–2025)

A Figura 3 reforça essa interpretação ao sintetizar a frequência de excedências dos parâmetros físico-químicos em comparação com o volume armazenado. O que ela sugere é que a piora qualitativa não se distribuiu homoganeamente ao longo dos anos. Em 2023, por exemplo, embora o reservatório tenha operado em patamar hidrológico muito favorável, ainda persistiram frequências elevadas de excedência para cor e turbidez, mas com desempenho mais controlado nos indicadores de mineralização. Em 2024 e, principalmente, em 2025, nota-se piora acentuada das excedências associadas a SDT e cloretos, o que indica deslocamento do problema para uma dimensão mais hidroquímica. Essa mudança de perfil é relevante porque mostra que a gestão do manancial não deve se concentrar apenas na recuperação quantitativa do volume, mas também na vigilância de processos de concentração salina e seus efeitos sobre a água captada.

**Figura 3** – Comparativo anual: volume armazenado vs frequência de excedências (físico-química)


**Fonte:** Adaptado dos dados hidrológicos da AESA e dos relatórios de ensaio da Cagepa (2021–2025)

Quanto ao pH, os resultados foram relativamente estáveis, com médias anuais variando em faixa compatível com menor criticidade comparativamente a outros parâmetros. Isso não significa, contudo, ausência de relevância analítica, mas sim que o pH, no conjunto estudado, não se configurou como o principal vetor de comprometimento qualitativo.

Em contrapartida, condutividade, SDT, cloretos e salinidade indicaram de forma convergente a intensificação da mineralização da água, sobretudo nos anos mais recentes. Tal convergência fortalece a hipótese de que o açude passou a experimentar, além da oscilação hidrológica, processo qualitativo de agravamento hidroquímico que deve ser acompanhado de forma mais rigorosa.

#### 4.5.2 Indicadores Microbiológicos

O bloco microbiológico revelou pressão sanitária persistente sobre a água bruta do Açude Gavião. Conforme apresentado na Tabela 3, observou-se presença de coliformes totais em praticamente todo o período e elevada frequência de detecção de *Escherichia coli* ao longo dos anos analisados.

Em 2021, 82% das amostras apresentaram *E. coli* detectável e 100% apresentaram coliformes totais. Em 2023, a frequência de detecção de *E. coli* alcançou 92%, enquanto em 2025 permaneceu elevada, em 90%. Os valores máximos também chamam atenção, com ocorrência de episódios de grande magnitude, como 2419,6 NMP/100 mL. Esses números



mostram que a vulnerabilidade microbiológica do manancial foi recorrente, e não circunstancial.

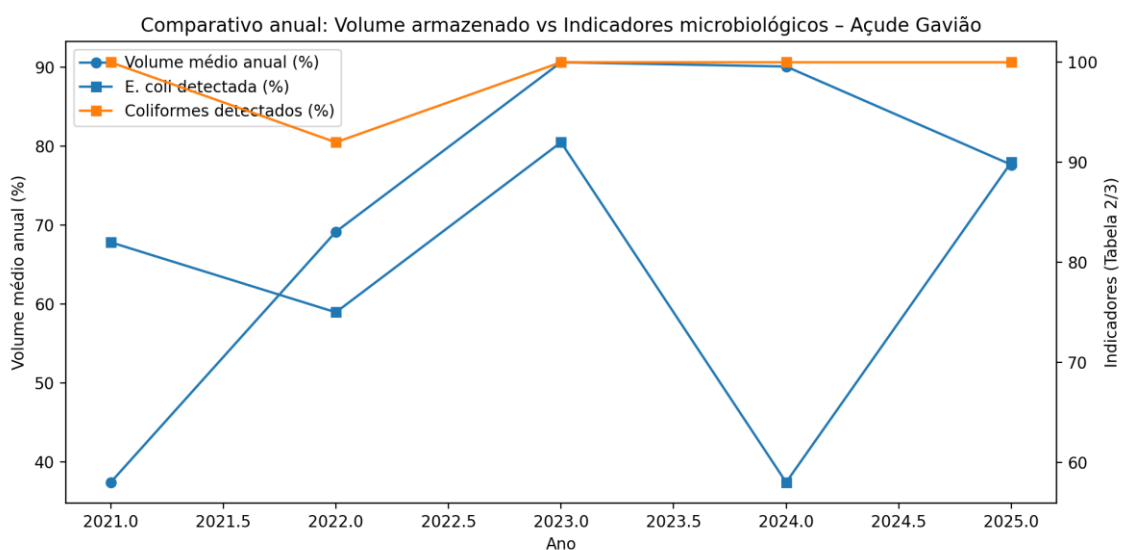
**Tabela 3** - Síntese anual de indicadores microbiológicos na água bruta (entrada da ETA)

| Ano  | n  | % E. coli detectada | Mediana E. coli (NMP/100 mL) | Máx E. coli | % Coliformes detectados | Mediana Coliformes (NMP/100 mL) | Máx Coliformes |
|------|----|---------------------|------------------------------|-------------|-------------------------|---------------------------------|----------------|
| 2021 | 11 | 82%                 | 8,40                         | 2419,6      | 100%                    | 1299,70                         | 2419,6         |
| 2022 | 12 | 75%                 | 3,05                         | 90,6        | 92%                     | 1986,30                         | 2419,6         |
| 2023 | 12 | 92%                 | 3,60                         | 16,0        | 100%                    | 547,50                          | 2419,6         |
| 2024 | 12 | 58%                 | 3,05                         | 214,2       | 100%                    | 681,95                          | 2419,6         |
| 2025 | 10 | 90%                 | 3,05                         | 61,3        | 100%                    | 732,60                          | 2419,6         |

**Fonte:** Adaptado dos relatórios de ensaio da Cagepa (2021–2025)

A Figura 4, ao relacionar o volume armazenado com a frequência de detecção microbiológica, evidencia que a carga bacteriológica se manteve relevante mesmo em anos de maior disponibilidade hídrica. Isso é um achado importante, pois mostra que a recuperação do volume, por si só, não eliminou o problema sanitário. Em outras palavras, embora a condição crítica de 2021 possa ter ampliado a vulnerabilidade do sistema, a persistência de altas frequências de detecção em anos como 2023 e 2025 indica que o comportamento microbiológico do reservatório também depende de fatores como aporte difuso, uso do solo, carreamento superficial e dinâmica local do manancial.

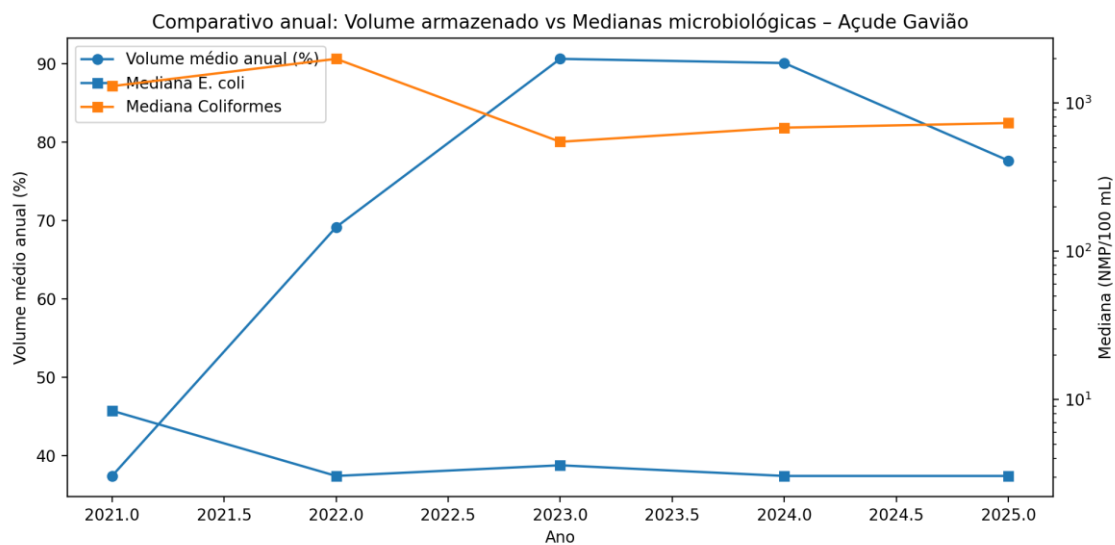
**Figura 4** - Comparativo anual: volume armazenado vs indicadores microbiológicos (frequência de detecção)



**Fonte:** Adaptado dos dados hidrológicos da AESA e dos relatórios de ensaio da Cagepa (2021–2025)

A Figura 5 complementa essa análise ao apresentar as medianas microbiológicas em escala logarítmica. Sua interpretação é particularmente útil porque permite observar não apenas a frequência de ocorrência, mas também a intensidade relativa da carga microbiológica entre os anos. Enquanto a Tabela 3 organiza as medidas anuais de forma objetiva, a Figura 5 oferece melhor visualização comparativa do padrão central dos dados, mostrando que determinados anos combinam alta frequência de detecção com medianas ainda significativas.

**Figura 5** – Comparativo anual: volume armazenado vs medianas microbiológicas (escala log)



**Fonte:** Adaptado dos dados hidrológicos da AESA e dos relatórios de ensaio da Cagepa (2021–2025)

O conjunto formado por Tabela 3, Figura 4 e Figura 5 fortalece a conclusão de que a água bruta do Açude Gavião esteve submetida a pressão microbiológica contínua no período analisado, exigindo barreiras robustas de tratamento, controle rigoroso da turbidez e monitoramento permanente da eficiência sanitária do sistema.

#### 4.6. Índice Integrado de Risco e Conformidade

A síntese multicritério dos resultados foi estruturada para comparar o desempenho relativo dos anos de 2021 a 2025 a partir de três blocos: hidrológico, físico-químico e microbiológico. A Tabela 4 deve apresentar essa consolidação, reunindo o ranqueamento de cada ano em cada bloco e a ordenação final pelo Método de Borda. Sua inserção é fundamental porque transforma a discussão multicritério em evidência explícita, deixando claro ao leitor

como os rankings parciais resultaram em uma classificação global do período. A menção às Tabelas 2 e 3, nesse ponto, é decisiva, pois a Tabela 4 deve ser lida como síntese interpretativa dos resultados físico-químicos e microbiológicos já discutidos, combinados com o bloco hidrológico derivado da Tabela 1.

Com base nessa síntese, o ano de 2023 ocupou a posição mais favorável no ranqueamento global, por combinar elevada robustez hidrológica com desempenho relativamente melhor no conjunto da qualidade da água. Embora não tenha sido um ano isento de excedências, a leitura conjunta da Tabela 1, da Tabela 2 e da Tabela 3 sugere que 2023 apresentou equilíbrio mais favorável entre disponibilidade hídrica, controle da mineralização e comportamento microbiológico quando comparado aos demais anos. A Tabela 4, portanto, deve explicitar esse resultado como expressão da melhor combinação relativa entre os blocos analisados, e não como indicação de ausência de problemas qualitativos.

**Tabela 4** - Ranqueamento anual dos blocos hidrológico, físico-químico e microbiológico pelo Método de Borda

| Ano  | Hidrológico | Físico-químico | Microbiológico | Soma de pontos (Borda) | Ranking final |
|------|-------------|----------------|----------------|------------------------|---------------|
| 2023 | 1º          | 2º             | 1º             | 4                      | 1º            |
| 2022 | 4º          | 1º             | 2º             | 7                      | 2º            |
| 2024 | 2º          | 4º             | 3º             | 9                      | 3º            |
| 2021 | 5º          | 3º             | 4º             | 12                     | 4º            |
| 2025 | 3º          | 5º             | 5º             | 13                     | 5º            |

Fonte: Autor (2026)

Na sequência, 2022 apresentou desempenho global também positivo, sobretudo por representar o momento de recuperação após a condição crítica de 2021. Embora o bloco hidrológico ainda não tenha alcançado o patamar de 2023 e 2024, os indicadores físico-químicos médios de 2022 mostraram comportamento relativamente competitivo, o que justifica sua posição elevada na síntese final. Já 2024, mesmo com desempenho hidrológico muito semelhante ao de 2023, foi penalizado pela piora relativa do conjunto físico-químico, especialmente no que se refere à intensificação da condutividade e dos sólidos dissolvidos totais. Esse contraste é muito importante para a discussão, porque confirma que alta disponibilidade hídrica não garante, isoladamente, melhor qualidade da água.

Nas posições menos favoráveis ficaram 2021 e 2025, ainda que por razões diferentes. O ano de 2021 foi penalizado principalmente pela combinação entre volume crítico, maior fragilidade geral do sistema e contexto de maior vulnerabilidade sanitária e operacional. O ano de 2025, por outro lado, apresentou situação distinta: apesar de o volume armazenado ainda

permanecer em faixa relativamente elevada, o bloco físico-químico revelou forte deterioração, sobretudo pelo aumento acentuado de condutividade, SDT, cloretos e salinidade, além da elevação das frequências de excedência mostradas na Tabela 2 e na Figura 3. Assim, a Tabela 4 tem papel central ao evidenciar que a pior posição global de 2025 decorre, sobretudo, do agravamento hidroquímico do sistema, e não de uma crise volumétrica semelhante à de 2021.

Do ponto de vista científico, a principal contribuição da síntese multicritério consiste em demonstrar que a interpretação do desempenho do Açude Gavião não pode ser sustentada nem exclusivamente pela série hidrológica, nem apenas pela leitura isolada de parâmetros laboratoriais. A integração representada na Tabela 4 permite capturar situações em que a recuperação quantitativa não se converte em melhoria qualitativa e, inversamente, evidencia anos em que o equilíbrio entre os blocos foi relativamente mais favorável. Isso confere maior robustez à análise, amplia a utilidade prática do monitoramento e fortalece a proposta de utilização do Índice Integrado de Risco e Conformidade como ferramenta de apoio à gestão, à vigilância e à regulação.

## 5. Considerações Finais

O presente estudo permitiu compreender, de forma integrada, a relação entre a dinâmica do volume armazenado do Açude Gavião e o comportamento de parâmetros físico-químicos e microbiológicos da água bruta captada para abastecimento no município de Fagundes/PB, no período de 2021 a 2025. Os resultados evidenciaram que a variabilidade hidrológica do reservatório exerceu influência relevante sobre a qualidade da água, especialmente em cenários de menor armazenamento, nos quais se intensificaram processos de concentração de sais e de aumento da vulnerabilidade sanitária do manancial. Nesse sentido, a análise desenvolvida reforça que, em reservatórios do semiárido, quantidade e qualidade da água não devem ser tratadas como dimensões independentes, mas como componentes fortemente interligados da gestão hídrica.

Do ponto de vista hidrológico, observou-se que 2021 representou o período mais crítico da série, com armazenamento mínimo de 15,78%, enquanto 2022 marcou a recuperação do sistema e 2023–2024 corresponderam ao momento de maior estabilidade volumétrica. Em 2025, embora os níveis armazenados ainda tenham permanecido relativamente elevados, os indicadores físico-químicos apontaram agravamento da mineralização da água, evidenciado pelo aumento da condutividade, dos sólidos dissolvidos totais, dos cloretos e da salinidade.



Paralelamente, os dados microbiológicos revelaram a persistência de coliformes totais e *Escherichia coli* em grande parte das campanhas analisadas, demonstrando que a recuperação volumétrica do reservatório não foi suficiente, por si só, para assegurar melhoria proporcional da qualidade da água bruta.

A principal contribuição do estudo reside na proposição de uma estrutura analítica integrada, capaz de articular série hidrológica, resultados laboratoriais e síntese multicritério em um mesmo quadro interpretativo. A utilização do Índice Integrado de Risco e Conformidade, com apoio do Método de Borda, mostrou-se pertinente para comparar o desempenho relativo dos anos analisados e tornar mais clara a leitura do comportamento do manancial ao longo do tempo. Essa abordagem amplia a utilidade do monitoramento, pois transforma dados isolados em informação estruturada para subsidiar decisões de gestão operacional, vigilância sanitária e regulação.

Em termos práticos, os achados indicam a necessidade de fortalecimento do monitoramento contínuo da água bruta e tratada, com especial atenção aos parâmetros associados à mineralização, à turbidez e ao risco microbiológico. Recomenda-se, ainda, que estudos futuros incorporem variáveis complementares, como clorofila-a, densidade de cianobactérias, cianotoxinas e metais, de modo a aprofundar a compreensão da vulnerabilidade do reservatório e ampliar a capacidade preditiva das análises. Assim, conclui-se que a gestão do Açude Gavião demanda abordagem preventiva, integrada e orientada por risco, compatível com a complexidade dos sistemas de abastecimento inseridos no semiárido brasileiro.



## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Panorama da qualidade das águas superficiais no Brasil: diagnóstico 2023**. Brasília: ANA, 2023.

ALKHADHER, Sadeq Abdullah Abdo et al. Seasonal variations in water quality and hydrological dynamics in a tropical reservoir driven by rainfall, runoff, and anthropogenic activities. **Scientific Reports**, v. 15, n. 1, p. 35589, 2025.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade**. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 7 maio 2021.

CAGEPA – Companhia de Água e Esgotos da Paraíba. **Relatórios de monitoramento da qualidade da água – Municípios do Cariri Paraibano (2024–2025)**. João Pessoa: CAGEPA, 2025.

FRANCESCHINI, Fiorenzo; MAISANO, Domenico A.; MASTROGIACOMO, Luca. Ranking aggregation techniques. In: **Rankings and decisions in engineering: conceptual and practical insights**. Cham: Springer International Publishing, 2022. p. 85-160.

GOMES, L. F. A. M.; GOMES, Carlos Francisco Simões. Princípios e métodos para a tomada de decisão: Enfoque multicritério. **São Paulo: Atlas**, 2019.

GRANATA, Francesco; DI NUNNO, Fabio. Pathways for hydrological resilience: strategies for adaptation in a changing climate. **Earth Systems and Environment**, v. 10, n. 1, p. 203-231, 2026.

INSTITUTO BRASILEIRO DE ESTUDOS AMBIENTAIS (IBEAS). **Análise preliminar da Portaria GM/MS nº 888/2021 e suas implicações para o controle da qualidade da água**. In: Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental e Sustentabilidade, 2021. Anais [...].

LUCAS, Lisa V. et al. Gaps in water quality modeling of hydrologic systems. **Water**, v. 17, n. 8, p. 1200, 2025.

MEIRA NETO, Antônio Alves et al. Evolution of drought mitigation and water security through 100 years of reservoir expansion in semi-arid Brazil. **Water Resources Research**, v. 60, n. 9, p. e2023WR036411, 2024.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE (OMS). **Guidelines for Drinking-water Quality: Fourth Edition Incorporating the First Addendum**. Geneva: World Health Organization, 2022.

QUON, Hunter; JIANG, Sunny. Decision making for implementing non-traditional water sources: a review of challenges and potential solutions. **npj Clean Water**, v. 6, n. 1, p. 56, 2023.

SAHOO, Sushil Kumar; GOSWAMI, Shankha Shubhra. A comprehensive review of multiple criteria decision-making (MCDM) methods: advancements, applications, and future directions. **Decision making advances**, v. 1, n. 1, p. 25-48, 2023.

SILVA, Wesley Douglas Oliveira; MORAIS, Danielle Costa; URTIGA, Marcella Maia. An Integrative negotiation model to deal with conflicts toward water resources management: a case study in Brazil. **Environment, Development and Sustainability**, v. 24, n. 8, p. 10443-10469, 2022.

SRIVASTAVA, Mohit Kumar; GAUR, Shishir; OHRI, Anurag. Analysing the effectiveness of MCDM and integrated weighting approaches in groundwater quality index development. **Water Conservation Science and Engineering**, v. 9, n. 2, p. 35, 2024.

VON SPERLING, Marcos. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. Editora UFMG, 1996.