v7.n5.2026

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

DEFINIÇÃO DE LIMITES DE TOLERÂNCIA PARA NÍVEIS DE EMERGÊNCIA UTILIZANDO TURBIDÍMETROS NO MONITORAMENTO *ON-LINE* EM BARRAGENS DE MINERAÇÃO

DEFINITION OF TOLERANCE THRESHOLDS FOR EMERGENCY CONDITIONS BASED ON TURBIDIMETER DATA IN ONLINE MONITORING OF MINING DAMS

DEFINICIÓN DE LÍMITES DE TOLERANCIA PARA NIVELES DE EMERGENCIA MEDIANTE TURBIDÍMETROS EN EL MONITOREO EN LÍNEA DE PRESAS DE MINERÍA

Anderson Luis Matos Moreira[1], Fábio Masato Yamanaka[2], Marcelo Rassy Teixeira[3]

e757831
https://doi.org/10.47820/recima21.v7i5.7831

PUBLICADO: 05/2026

RESUMO

A segurança de barragens de mineração constitui um tema de elevada relevância no contexto ambiental e operacional, especialmente em regiões sensíveis como a Amazônia. Nesse cenário, o monitoramento contínuo de variáveis ambientais torna-se essencial para a detecção precoce de alterações associadas a riscos estruturais ou impactos aos recursos hídricos. Este estudo teve como objetivo analisar o comportamento da turbidez da água em uma barragem de mineração, a partir de uma série temporal de alta frequência, compreendendo o período de junho de 2024 a março de 2026. A metodologia baseou-se no tratamento estatístico dos dados, incluindo análise descritiva, identificação de outliers, aplicação de médias móveis e definição de limites operacionais por meio de percentis (P90, P95 e P99). Os resultados indicaram comportamento predominantemente estável, com média de 14,19 NTU, porém com ocorrência de eventos extremos, evidenciada por assimetria positiva e valor máximo de 199,94 NTU. A análise temporal revelou períodos críticos associados ao inverno amazônico, caracterizado por maior precipitação e intensificação do carreamento de sedimentos. A classificação em faixas operacionais mostrou-se eficaz para a interpretação dos dados; contudo, verificou-se que o valor máximo registrado permaneceu abaixo do limiar de emergência (> 221,54 NTU), indicando a ausência de eventos classificados como emergência no período analisado. Conclui-se que o uso de abordagens estatísticas robustas, aliado à análise temporal e sazonal, contribui para o aprimoramento do monitoramento ambiental e para a tomada de decisão em barragens de rejeitos.

PALAVRAS-CHAVE: Barragens. Mineração. Turbidez. Monitoramento. Sedimentos.

ABSTRACT

The safety of mining dams is a critical issue in environmental and operational contexts, particularly in sensitive regions such as the Amazon. Continuous monitoring of environmental variables is essential for the early detection of changes related to structural risks and impacts on water resources. This study aimed to analyze water turbidity behavior in a mining dam using a high-frequency time series dataset collected from June 2024 to March 2026. The methodology was based on statistical data processing, including descriptive analysis, outlier detection, moving averages, and the definition of operational thresholds using percentiles (P90, P95, and P99). The results indicated a predominantly stable system, with a mean turbidity of 14.19 NTU, but with the occurrence of extreme events, evidenced by a positively skewed distribution and a maximum value of 199.94 NTU. Temporal analysis revealed critical periods associated with the Amazonian rainy season, characterized by increased precipitation and sediment transport.

[1] Mestrando Engenharia de Barragem e Gestão Ambiental. Universidade Federal do Pará – UFPA.
[2] Mestrando em Engenharia de Infraestrutura e Desenvolvimento Energético, Universidade Federal do Pará – UFPA, Belém, Pará, Brasil.
[3] Pós-doutor em Geologia e Geotecnia. Universidade Federal do Pará – UFPA.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

The classification into operational ranges proved effective for data interpretation; however, the maximum observed value remained below the emergency threshold (> 221.54 NTU), indicating that no emergency events were recorded during the study period. It is concluded that robust statistical approaches combined with temporal and seasonal analysis enhance environmental monitoring and support decision-making in mining dam management.

KEYWORDS: *Dams. Mining. Turbidity. Monitoring. Sediments.*

RESUMEN
La seguridad de las presas de relaves mineros constituye un tema de gran relevancia en el contexto ambiental y operativo, especialmente en regiones sensibles como la Amazonía. En este escenario, el monitoreo continuo de variables ambientales es fundamental para la detección temprana de cambios asociados a riesgos estructurales o impactos en los recursos hídricos. Este estudio tuvo como objetivo analizar el comportamiento de la turbidez del agua en una presa minera, a partir de una serie temporal de alta frecuencia correspondiente al período de junio de 2024 a marzo de 2026. La metodología se basó en el tratamiento estadístico de los datos, incluyendo análisis descriptivo, identificación de valores atípicos, medias móviles y definición de límites operacionales mediante percentiles (P90, P95 y P99). Los resultados indicaron un comportamiento predominantemente estable, con una media de 14,19 NTU, aunque con la presencia de eventos extremos, evidenciados por una distribución asimétrica positiva y un valor máximo de 199,94 NTU. El análisis temporal identificó períodos críticos asociados a la temporada lluviosa amazónica, caracterizada por mayor precipitación y transporte de sedimentos. La clasificación en rangos operativos resultó eficaz; sin embargo, el valor máximo observado se mantuvo por debajo del umbral de emergencia (> 221,54 NTU), indicando que no se registraron eventos de emergencia en el período analizado. Se concluye que el uso de enfoques estadísticos robustos, junto con el análisis temporal y estacional, contribuye al fortalecimiento del monitoreo ambiental y la toma de decisiones.

PALABRAS CLAVE*: Represas. Minería. Turbidez. Monitoreo. Sedimentos.*

INTRODUÇÃO

A atividade mineradora possui grande relevância econômica e estratégica para diversos países, sendo o Brasil um dos principais produtores mundiais de minério de ferro. Entretanto, o processo de extração e beneficiamento mineral gera grandes volumes de rejeitos, os quais precisam ser armazenados em estruturas específicas, como as barragens de rejeitos (Figura 01). Essas estruturas desempenham papel essencial na gestão de resíduos da mineração, porém também representam potenciais riscos ambientais, sociais e econômicos quando não monitoradas adequadamente.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Figura 1. Barragem de Rejeitos



Fonte: Autores, 2026.

Nos últimos anos, eventos envolvendo falhas em barragens de mineração ampliaram o debate sobre a necessidade de aprimoramento dos sistemas de monitoramento dessas estruturas. O colapso dessas barragens pode gerar impactos ambientais severos, afetando cursos d'água, solos, ecossistemas naturais e comunidades humanas localizadas a jusante, reforçando a importância de estratégias preventivas baseadas em monitoramento contínuo e análise de indicadores ambientais.

Os estudos no campo da engenharia geotécnica vêm enfatizando a relevância da adoção de métodos estatísticos aliados a análises complementares visando aprimorar a compreensão do comportamento dos solos e das fundações. Investigações recentes apontam que a heterogeneidade das propriedades geotécnicas, somada às características intrínsecas do subsolo, exerce influência direta na resposta mecânica dos materiais e, por consequência, no desempenho das estruturas que neles se apoiam. Dessa forma, a integração entre abordagens analíticas, ensaios experimentais e modelos de avaliação mais abrangentes se mostra fundamental para mitigar as incertezas associadas aos parâmetros geotécnicos, possibilitando interpretações mais robustas quanto à segurança e à confiabilidade das soluções de engenharia adotadas (OLIVEIRA *et al*., 2025; RODRIGUES *et al*., 2025; SILVA *et al.,* 2025; YAMANAKA *et al*., 2025).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Nesse contexto, o monitoramento de variáveis ambientais tem se consolidado como ferramenta essencial para a avaliação indireta do comportamento dessas estruturas. Entre os parâmetros utilizados, destaca-se a turbidez da água, que representa a presença de partículas em suspensão e está diretamente associada à dinâmica de transporte de sedimentos e a possíveis alterações nos processos hidrossedimentológicos. Além disso, variações anormais na turbidez podem indicar processos erosivos internos ou mudanças nas condições estruturais das barragens.

A utilização da turbidez como indicador indireto de anomalias em barragens fundamenta-se na sua relação com a presença de partículas em suspensão e com os processos de transporte de sedimentos em sistemas hídricos. Em condições normais de operação, espera-se que os níveis de turbidez apresentem variações compatíveis com fatores sazonais e hidrológicos, como precipitação e escoamento superficial. Entretanto, elevações anômalas ou persistentes desse parâmetro podem estar associadas a processos não usuais, tais como erosão interna, instabilidades superficiais ou alterações nas condições de drenagem da estrutura, funcionando, portanto, como um indicativo indireto de possíveis anomalias.

Contudo, essa inferência apresenta limitações epistemológicas relevantes, uma vez que a turbidez não constitui uma medida direta do estado estrutural da barragem, sendo influenciada por múltiplos fatores externos, como eventos pluviométricos, intervenções operacionais e características do meio físico local. Dessa forma, a interpretação dos dados de turbidez deve ser realizada de maneira integrada com outras variáveis ambientais e operacionais, evitando associações causais simplificadas. Assim, a turbidez deve ser compreendida como um indicador auxiliar no sistema de monitoramento, cuja principal contribuição reside na detecção precoce de desvios no comportamento esperado, e não na confirmação isolada de processos de falha estrutural.

O avanço das tecnologias de instrumentação tem possibilitado a utilização de sensores capazes de realizar medições contínuas e em tempo real. A incorporação de turbidímetros em sistemas de monitoramento on-line permite o acompanhamento contínuo da qualidade da água, ampliando a capacidade de detecção precoce de anomalias. Estudos recentes indicam que sensores ópticos de turbidez possibilitam medições in situ com elevada frequência, contribuindo para análises mais detalhadas do comportamento temporal dos dados (Vu *et al.*, 2023).

Apesar desses avanços, ainda existe uma lacuna significativa na interpretação dos dados de turbidez em sistemas aplicados a barragens de mineração. Do ponto de vista teórico, observa-se a ausência de critérios consolidados que relacionem diretamente níveis de turbidez a condições de risco estrutural ou ambiental. Sob a perspectiva metodológica, há carência de

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

abordagens padronizadas para o tratamento estatístico de séries temporais de alta frequência, especialmente no que se refere à definição de limites operacionais baseados em dados reais. No âmbito aplicado, essa ausência de parâmetros dificulta a utilização prática dos dados em sistemas de alerta e tomada de decisão, reduzindo a efetividade dos programas de monitoramento.

Diante desse cenário, o problema científico deste estudo consiste em compreender como os dados de turbidez, obtidos por meio de monitoramento contínuo, podem ser tratados e interpretados de forma a subsidiar a definição de limites de tolerância aplicáveis a sistemas de alerta em barragens de mineração.

Assim, o presente trabalho tem como objetivo definir limites de tolerância para níveis de emergência a partir da análise de dados de turbidez obtidos por turbidímetros utilizados no monitoramento on-line de barragens de mineração. De forma complementar, busca-se analisar o comportamento da turbidez, identificar padrões de variação associados a possíveis anomalias e propor faixas de classificação que auxiliem na interpretação dos dados e na tomada de decisões operacionais.

A realização desta pesquisa justifica-se pela necessidade de aprimorar os sistemas de monitoramento e gestão de riscos em barragens de mineração, especialmente em regiões ambientalmente sensíveis, como a Amazônia brasileira. A definição de limites de tolerância baseada em dados quantitativos contribui para a identificação mais rápida de situações anormais, fortalecendo protocolos de alerta e resposta e promovendo maior segurança na gestão dessas estruturas.

1. REFERENCIAL TEÓRICO

A atividade mineradora envolve a extração e o beneficiamento de recursos minerais, processos que geram grandes volumes de resíduos conhecidos como rejeitos. Esses materiais são geralmente compostos por partículas finas de rocha misturadas com água e outros resíduos resultantes das etapas de processamento do minério. Para garantir a disposição adequada desses materiais, são utilizadas estruturas denominadas barragens de rejeitos, cuja função principal é armazenar de forma controlada os resíduos provenientes das operações minerárias. Essas estruturas são consideradas fundamentais para a viabilidade técnica e econômica da atividade mineral, uma vez que permitem o gerenciamento seguro dos resíduos gerados durante a produção (Azam; Li, 2010).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

As barragens de rejeitos diferem significativamente das barragens convencionais utilizadas para armazenamento de água. Enquanto as barragens tradicionais são construídas com materiais selecionados e projetadas para retenção hídrica, as barragens de rejeitos são, normalmente, construídas utilizando o próprio material proveniente do processo de beneficiamento mineral. Além disso, essas estruturas costumam ser elevadas gradualmente ao longo da vida útil da mina, acompanhando o aumento do volume de rejeitos produzidos. Esse processo construtivo contínuo torna o controle de estabilidade e o monitoramento dessas estruturas aspectos essenciais para a segurança operacional (Vick, 1990).

A importância das barragens de rejeitos para o setor mineral relaciona-se à necessidade de armazenamento seguro dos resíduos gerados durante as atividades de mineração. Com o avanço tecnológico e o aproveitamento de minérios com teores cada vez menores, a quantidade de rejeitos produzidos pelas operações minerárias tem aumentado significativamente nas últimas décadas. Esse cenário contribuiu para o crescimento do número e da capacidade das barragens de rejeitos em todo o mundo, tornando essas estruturas componentes críticos da infraestrutura mineradora e exigindo níveis cada vez maiores de controle técnico e ambiental (ICOLD, 1989).

No contexto brasileiro, a gestão de barragens de mineração ganhou destaque nas últimas décadas em função do aumento das atividades minerárias e dos desafios relacionados à segurança dessas estruturas. O Brasil possui um número significativo de barragens associadas à mineração, muitas delas localizadas em regiões ambientalmente sensíveis. Nesse sentido, órgãos reguladores e instituições técnicas têm enfatizado a importância da implementação de sistemas adequados de monitoramento e gestão de risco, visando garantir a estabilidade dessas estruturas e minimizar possíveis impactos ambientais e sociais decorrentes de falhas estruturais (ANA, 2013).

A segurança de barragens constitui um dos aspectos mais relevantes na gestão de estruturas destinadas ao armazenamento de rejeitos provenientes das atividades minerárias. A estabilidade dessas estruturas depende de diversos fatores geotécnicos e hidráulicos, incluindo características dos materiais utilizados na construção, condições de drenagem, pressão de poros e métodos construtivos adotados. Quando adequadamente projetadas e monitoradas, as barragens podem operar de forma segura por longos períodos; entretanto, falhas no projeto, construção ou operação podem comprometer sua estabilidade e aumentar significativamente os riscos associados a essas estruturas (Azam; Li, 2010; Oliveira *et al*., 2025)

Conforme Pereira (2025), entre os principais riscos estruturais associados às barragens de rejeitos destacam-se processos como erosão interna (piping), infiltrações excessivas, instabilidade de taludes e liquefação dos materiais depositados. Esses fenômenos podem evoluir

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

gradualmente ao longo do tempo e, muitas vezes, apresentam sinais iniciais que podem ser identificados por meio de sistemas de instrumentação geotécnica e monitoramento contínuo. A identificação precoce dessas alterações permite a adoção de medidas preventivas, reduzindo a probabilidade de falhas estruturais e contribuindo para a manutenção da integridade das barragens ao longo de sua vida útil.

Quando ocorre o rompimento de uma barragem de rejeitos, os impactos ambientais e sociais podem ser extremamente severos. Grandes volumes de rejeitos podem ser liberados no ambiente, atingindo cursos d'água, solos e comunidades localizadas a jusante das estruturas. Estudos internacionais mostram que falhas em barragens de rejeitos estão frequentemente associadas a deficiências de monitoramento, problemas de drenagem ou falhas de gestão operacional, evidenciando a importância da implementação de sistemas eficazes de controle e acompanhamento dessas estruturas (World Mine Tailing Failures, 2020).

Diante desse cenário, diversos países passaram a fortalecer suas legislações e regulamentações voltadas à segurança de barragens, estabelecendo critérios mais rigorosos para projeto, operação e monitoramento dessas estruturas. Países como Chile, Peru, Equador e China, por exemplo, adotaram normas mais restritivas para a construção e gestão de barragens de rejeitos, incluindo limitações ao uso de métodos construtivos considerados mais suscetíveis a falhas e restrições à implantação dessas estruturas próximas a áreas habitadas (Dri *et al.,* 2018).

As barragens de rejeitos estão sujeitas a diferentes mecanismos de falha associados às características geotécnicas dos materiais utilizados em sua construção e às condições hidráulicas presentes ao longo de sua operação. Diferentemente das barragens convencionais de concreto, muitas barragens de rejeitos são construídas utilizando materiais provenientes do próprio processo de beneficiamento mineral, que apresentam granulometria fina e comportamento mecânico variável (Luo, Li e Xu, 2023). Essas características tornam fundamental a compreensão dos processos que podem comprometer a estabilidade dessas estruturas, como erosão interna, liquefação e infiltrações excessivas, os quais podem evoluir progressivamente até resultar em falhas estruturais.

Chi *et al.* (2025) apontam que, entre os mecanismos de falha mais relevantes em barragens de rejeitos destaca-se a erosão interna, também conhecida como piping. Esse processo ocorre quando o fluxo de água através do corpo da barragem ou de sua fundação transporta partículas finas do material, criando canais internos que podem aumentar progressivamente de tamanho. Com o avanço da erosão, esses canais podem comprometer a integridade da estrutura, reduzindo sua resistência e podendo levar ao colapso parcial ou total

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

da barragem. A ocorrência de piping está frequentemente associada a problemas de drenagem, gradientes hidráulicos elevados ou deficiência nos sistemas de filtragem e controle de fluxo.

Outro mecanismo importante de falha em barragens de rejeitos é a liquefação dos materiais depositados. Esse fenômeno ocorre quando materiais saturados e pouco consolidados perdem rapidamente sua resistência ao cisalhamento devido ao aumento da pressão de poros, podendo comportar-se temporariamente como um fluido. Em barragens de rejeitos, a liquefação pode ser desencadeada por vibrações sísmicas, carregamentos rápidos ou mudanças nas condições hidráulicas do depósito. Quando esse processo ocorre, grandes volumes de rejeitos podem se mobilizar rapidamente, aumentando o potencial destrutivo de uma eventual falha estrutural (Li *et al*., 2023; Oliveira *et al.,* 2025).

Wang *et al.* (2025) explicam que, além da erosão interna e da liquefação, infiltrações excessivas também podem contribuir para processos de instabilidade em barragens de rejeitos. O fluxo de água através do maciço da barragem pode elevar a pressão de poros e reduzir a resistência dos materiais, favorecendo o desenvolvimento de deformações e deslizamentos nos taludes. Por essa razão, sistemas de drenagem adequados e o monitoramento contínuo de parâmetros hidráulicos e geotécnicos são considerados fundamentais para garantir a estabilidade dessas estruturas ao longo de sua vida útil.

O monitoramento geotécnico constitui uma das principais ferramentas utilizadas para garantir a segurança e o desempenho adequado de barragens ao longo de sua vida útil. Por meio da coleta sistemática de dados sobre o comportamento da estrutura e das condições do maciço, é possível identificar alterações que possam indicar situações de risco ou anomalias estruturais. Esse acompanhamento permite avaliar parâmetros como deslocamentos, níveis de água, pressão de poros e deformações, contribuindo para a tomada de decisões técnicas voltadas à prevenção de falhas e à manutenção da estabilidade da barragem (Ouellet *et al.,* 2022).

A instrumentação geotécnica desempenha papel fundamental nesse processo de monitoramento, sendo composta por diversos tipos de sensores instalados no corpo da barragem, em sua fundação ou nas áreas adjacentes. Entre os instrumentos mais utilizados estão piezômetros, inclinômetros, medidores de recalque, marcos superficiais e extensômetros. Esses dispositivos permitem medir variáveis importantes relacionadas ao comportamento do maciço, fornecendo dados que auxiliam na avaliação da estabilidade estrutural e na identificação de possíveis mudanças nas condições internas da barragem (Wu *et al*., 2025).

Os piezômetros, por exemplo, são utilizados para medir a pressão de poros e os níveis de água dentro do maciço da barragem e em sua fundação. Wu *et al.* (2025) afirmam que tais

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

informações são essenciais para compreender o comportamento hidráulico da estrutura, uma vez que o aumento da pressão de poros pode reduzir a resistência ao cisalhamento dos materiais e favorecer processos de instabilidade. Já os instrumentos voltados à medição de deslocamentos e deformações permitem acompanhar possíveis movimentos do maciço ou dos taludes da barragem, possibilitando a detecção precoce de deformações anormais que possam indicar risco estrutural.

Com o avanço das tecnologias de monitoramento, muitas barragens passaram a adotar sistemas automatizados de aquisição e transmissão de dados. Esses sistemas utilizam sensores conectados a redes de telemetria que enviam informações em tempo real para centros de monitoramento geotécnico, permitindo o acompanhamento contínuo do comportamento da estrutura. Essa abordagem possibilita respostas mais rápidas diante de alterações detectadas nos parâmetros monitorados, aumentando a eficiência da gestão de segurança das barragens e contribuindo para a redução de riscos associados a essas estruturas (Ouellet *et al*., 2022).

O monitoramento ambiental em barragens de mineração é uma prática essencial para avaliar os possíveis impactos das atividades minerárias sobre o meio ambiente, especialmente em relação aos recursos hídricos. Esse processo envolve a coleta sistemática de dados ambientais em áreas próximas às estruturas de contenção de rejeitos, permitindo acompanhar alterações nas características da água, do solo e dos sedimentos. O acompanhamento contínuo desses parâmetros possibilita identificar mudanças que possam indicar contaminação ou degradação ambiental, contribuindo para a adoção de medidas preventivas e corretivas voltadas à proteção dos ecossistemas (Garcia *et al*., 2025).

Segundo Silva Junior *et al.* (2023), dentre os principais aspectos avaliados no monitoramento ambiental de barragens de mineração incluem-se a análise da qualidade da água em corpos hídricos localizados a montante e a jusante dessas estruturas. Esse acompanhamento geralmente envolve a medição de diversos parâmetros físico-químicos, como pH, turbidez, condutividade elétrica, oxigênio dissolvido e concentração de sólidos suspensos. Esses indicadores permitem avaliar possíveis alterações causadas pela presença de sedimentos ou substâncias provenientes dos rejeitos minerários, sendo utilizados em programas de gestão ambiental associados à atividade mineral.

O monitoramento de sedimentos também desempenha papel importante na avaliação ambiental de barragens de rejeitos, uma vez que o transporte de partículas sólidas pode afetar significativamente a qualidade da água e o equilíbrio dos ecossistemas aquáticos. A presença excessiva de sedimentos em suspensão pode reduzir a penetração da luz na coluna d'água, afetar organismos aquáticos e comprometer o uso da água para diferentes finalidades

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

(Skrzypczak e Tandyrak, 2024). Por essa razão, programas de monitoramento ambiental frequentemente incluem a análise de sólidos suspensos e sedimentos transportados pelos cursos d'água próximos às áreas de mineração.

Nesse contexto, parâmetros relacionados à presença de partículas em suspensão na água, como a turbidez, tornam-se indicadores relevantes para o acompanhamento ambiental em regiões influenciadas por atividades minerárias. A turbidez está diretamente associada à quantidade de partículas presentes na água e pode refletir processos de erosão, transporte de sedimentos ou alterações na dinâmica dos corpos hídricos. Dessa forma, o monitoramento desse parâmetro tem sido utilizado em programas de controle ambiental e gestão de recursos hídricos, constituindo uma ferramenta importante para a avaliação de possíveis impactos ambientais relacionados às barragens de mineração (Kim *et al.,* 2025).

Ainda de acordo com Kim *et al.* (2025), sabe-se que turbidez é um parâmetro bastante utilizado na avaliação da qualidade da água e está relacionada à presença de partículas em suspensão que interferem na transparência do meio aquático. Essas partículas podem incluir sedimentos minerais, matéria orgânica, microrganismos e outros materiais particulados transportados pela água. Em ambientes naturais ou impactados por atividades antrópicas, a turbidez pode variar significativamente em função de processos como erosão do solo, escoamento superficial e transporte de sedimentos. Dessa forma, a análise desse parâmetro é frequentemente empregada em programas de monitoramento ambiental para avaliar alterações na qualidade dos recursos hídricos.

A medição da turbidez é normalmente expressa em unidades denominadas NTU (Nephelometric Turbidity Unit), que representam a intensidade da dispersão da luz causada pelas partículas presentes na água. Esse método de medição baseia-se no princípio da nefelometria, no qual um feixe de luz é direcionado para a amostra e a quantidade de luz espalhada pelas partículas suspensas é detectada por sensores específicos. A utilização dessa unidade padronizada permite comparar resultados obtidos em diferentes estudos e programas de monitoramento ambiental, sendo adotada em análises de qualidade da água em diversos países (Matos *et al*., 2024).

A turbidez apresenta forte relação com a presença de sedimentos em suspensão nos corpos hídricos. Quando ocorre aumento na concentração de partículas sólidas transportadas pela água, observa-se geralmente um aumento nos valores de turbidez. Esse fenômeno pode ocorrer em decorrência de processos naturais, como chuvas intensas e erosão do solo, ou em função de atividades humanas que alteram o uso do solo e a dinâmica hidrossedimentológica

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

das bacias hidrográficas. Por esse motivo, a turbidez é frequentemente utilizada como indicador indireto da carga de sedimentos em sistemas aquáticos (Li *et al*., 2024).

Além de refletir a presença de sedimentos em suspensão, a turbidez também pode indicar processos de erosão e transporte de materiais em ambientes fluviais e reservatórios. Segundo Matos *et al.* (2024), em regiões onde há atividades minerárias, por exemplo, alterações nos níveis de turbidez podem estar associadas ao carregamento de partículas provenientes de áreas de deposição de rejeitos ou de superfícies expostas. Nesse contexto, o monitoramento da turbidez é utilizado como ferramenta para identificar mudanças na dinâmica dos sedimentos e avaliar possíveis impactos ambientais sobre os corpos d'água, contribuindo para a gestão sustentável dos recursos hídricos.

Com o avanço das tecnologias de instrumentação ambiental, muitos turbidímetros passaram a operar de forma automatizada, permitindo a realização de medições contínuas e em tempo real. Esses sistemas geralmente são integrados a plataformas de monitoramento que registram dados em intervalos regulares e os transmitem para bases de dados ou centros de controle por meio de sistemas de telemetria. Essa abordagem possibilita acompanhar variações na turbidez ao longo do tempo, identificar eventos anômalos e analisar tendências relacionadas a processos naturais ou impactos antrópicos sobre os corpos hídricos (Droujko, Molnar, 2022).

Os turbidímetros são aplicados no monitoramento de rios e reservatórios, especialmente em estudos relacionados ao transporte de sedimentos e à qualidade da água. Em ambientes fluviais, a medição contínua da turbidez permite identificar variações associadas a eventos de chuva, processos erosivos e mudanças no uso do solo nas bacias hidrográficas. Esses dados são importantes para compreender a dinâmica sedimentar dos cursos d'água e para subsidiar ações de gestão dos recursos hídricos, além de auxiliar na avaliação de possíveis impactos ambientais (Miglino *et al*., 2025).

No contexto das barragens de mineração, o uso de turbidímetros também tem se mostrado uma ferramenta relevante para o monitoramento ambiental, especialmente em áreas localizadas a jusante dessas estruturas. A análise da turbidez da água pode fornecer informações sobre a presença de sedimentos transportados e eventuais alterações na qualidade da água associadas às atividades minerárias (Silva Junior *et al*., 2023). Dessa forma, sistemas de monitoramento baseados em sensores de turbidez podem contribuir para a detecção precoce de mudanças ambientais e para o fortalecimento das estratégias de gestão e controle ambiental em regiões influenciadas por barragens de rejeitos

O avanço das tecnologias de monitoramento tem permitido a implementação de sistemas on-line capazes de acompanhar, em tempo real, o comportamento de barragens e de seus

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

componentes estruturais e ambientais. Esses sistemas utilizam sensores instalados em diferentes pontos da estrutura e de sua área de influência, permitindo a coleta contínua de dados relacionados a parâmetros como níveis de água, pressão de poros, deslocamentos, deformações e variáveis ambientais. A integração dessas informações em plataformas digitais possibilita uma avaliação mais rápida e precisa das condições operacionais das barragens, contribuindo para a melhoria das estratégias de segurança e gestão dessas estruturas (Ren *et al*., 2022).

Entre os principais elementos que compõem os sistemas de monitoramento on-line estão os sensores remotos e dispositivos de instrumentação automatizada. Esses sensores são capazes de registrar dados de forma contínua e transmiti-los automaticamente para sistemas de armazenamento e análise. A utilização de tecnologias desse tipo permite reduzir a dependência de medições manuais e amplia a frequência de coleta de dados, aumentando a capacidade de detecção de mudanças no comportamento estrutural ou ambiental das barragens (Shao *et al*., 2025).

Outro componente fundamental desses sistemas é a telemetria, tecnologia responsável pela transmissão automática dos dados coletados pelos sensores para centros de monitoramento ou bancos de dados remotos. A telemetria permite que informações obtidas em campo sejam enviadas em tempo quase real para equipes técnicas responsáveis pelo acompanhamento das barragens, facilitando a análise contínua dos parâmetros monitorados. Esse tipo de tecnologia é utilizado em projetos de instrumentação geotécnica e ambiental, contribuindo para aumentar a eficiência dos programas de monitoramento (Oulkar *et al*., 2026).

A centralização dessas informações em centros de controle ou centros de monitoramento geotécnico possibilita a análise integrada dos dados coletados pelos diferentes sensores instalados na barragem. Nesses centros, equipes técnicas podem acompanhar em tempo real o comportamento da estrutura e identificar rapidamente possíveis anomalias ou variações nos parâmetros monitorados. Essa abordagem permite uma gestão de risco mais eficiente, pois facilita a adoção de medidas preventivas e corretivas diante de situações que possam representar ameaça à estabilidade da barragem ou ao meio ambiente (Forti *et al*., 2024).

A análise de dados ambientais constitui uma etapa fundamental nos programas de monitoramento voltados à gestão de recursos naturais e à avaliação de possíveis impactos decorrentes de atividades antrópicas. A partir da coleta contínua de informações sobre parâmetros físicos, químicos e biológicos, torna-se possível identificar padrões de comportamento dos sistemas ambientais ao longo do tempo. Esses dados permitem compreender a dinâmica natural dos ambientes monitorados e estabelecer referências que

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

auxiliam na identificação de alterações significativas na qualidade ambiental (Silva e Borges, 2025).

Os métodos estatísticos aplicados à análise de dados ambientais são ferramentas para interpretar séries temporais e avaliar variações nos parâmetros monitorados. Técnicas como análise de tendência, cálculo de médias, desvios padrão e identificação de valores extremos permitem compreender o comportamento normal dos indicadores ambientais e detectar possíveis desvios em relação às condições consideradas naturais ou esperadas. Esse tipo de abordagem é importante em programas de monitoramento contínuo, nos quais grandes volumes de dados são gerados ao longo do tempo (Soetan *et al.,* 2024).

A identificação de anomalias nos dados ambientais representa uma etapa importante para a detecção precoce de possíveis problemas ou alterações nos sistemas monitorados. Valores que se afastam significativamente do padrão esperado podem indicar a ocorrência de eventos específicos, como aumento do transporte de sedimentos, contaminação de corpos d'água ou mudanças nas condições hidrológicas da bacia hidrográfica. Nesse contexto, a análise sistemática das informações coletadas permite identificar rapidamente situações atípicas que possam exigir investigação ou intervenção por parte das equipes responsáveis pelo monitoramento (Li *et al.,* 2023).

Com base na interpretação dos dados coletados, é possível estabelecer limites de alerta, também conhecidos como *thresholds*, que representam valores de referência utilizados para indicar possíveis condições de risco ou alteração ambiental. Esses limites são definidos a partir da análise histórica dos dados e da compreensão do comportamento natural dos parâmetros monitorados. Quando os valores registrados ultrapassam os limites estabelecidos, sistemas de monitoramento podem emitir alertas para que medidas de avaliação ou mitigação sejam adotadas. Essa abordagem é utilizada em programas de gestão ambiental e de monitoramento de estruturas sensíveis, como barragens e reservatórios (Ibrahim *et al.,* 2025).

A definição de limites de tolerância em sistemas de monitoramento constitui uma etapa fundamental para a interpretação adequada dos dados coletados em programas de acompanhamento ambiental e estrutural. Esses limites representam valores de referência estabelecidos para indicar condições consideradas normais, de atenção ou de alerta dentro de um sistema monitorado. A partir da análise histórica dos dados e da compreensão do comportamento natural dos parâmetros observados, é possível estabelecer faixas de variação aceitáveis, permitindo diferenciar oscilações naturais de alterações potencialmente críticas no sistema avaliado (Li, Han e Zheng, 2026)

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

A utilização de limites de alerta facilita o processo de tomada de decisão em programas de monitoramento contínuo, especialmente em contextos que envolvem grandes volumes de dados coletados por sensores automáticos. Quando os valores registrados ultrapassam os limites previamente estabelecidos, os sistemas de monitoramento podem gerar alertas que indicam a necessidade de análise mais detalhada ou de ações corretivas. Esse tipo de abordagem permite que equipes técnicas identifiquem rapidamente possíveis anomalias e adotem medidas preventivas antes que ocorram situações de maior risco (Ateia, Wei e Andreescu, 2024).

No contexto da gestão de barragens e de monitoramento ambiental, a definição de limites de tolerância também desempenha papel importante na redução de riscos associados à operação dessas estruturas. A interpretação adequada dos dados obtidos por sensores e sistemas automatizados permite avaliar o comportamento da barragem e de seu entorno ambiental, possibilitando a identificação precoce de mudanças que possam indicar processos de instabilidade ou alterações ambientais relevantes. Dessa forma, os limites de tolerância funcionam como ferramentas de apoio à gestão de risco, contribuindo para a segurança operacional e para a proteção dos ecossistemas associados (Dai *et al*., 2025).

Diante desse cenário, o estabelecimento de limites de tolerância para parâmetros ambientais, como a turbidez da água, torna-se um elemento importante em programas de monitoramento associados a barragens de mineração. A definição desses limites pode contribuir para a identificação de alterações relacionadas ao transporte de sedimentos ou a possíveis mudanças nas condições ambientais de áreas influenciadas por essas estruturas. Nesse contexto, a presente pesquisa busca analisar dados de monitoramento ambiental com o objetivo de contribuir para a definição de limites de referência aplicáveis ao acompanhamento da turbidez em sistemas associados a barragens de rejeitos, fornecendo subsídios para a melhoria das estratégias de monitoramento e gestão de risco ambiental.

2. METODOLOGIA

A área de estudo desta pesquisa compreende o complexo minerador de Carajás, localizado no sudeste do estado do Pará, no município de Parauapebas. A região abriga uma das maiores províncias minerais do mundo, com destaque para a exploração de minério de ferro de alto teor na Serra Norte. Nesse contexto, diversas estruturas hidráulicas e geotécnicas são utilizadas para o controle de efluentes, sedimentos e rejeitos provenientes das atividades de mineração.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Entre essas estruturas destaca-se a Barragem do Geladinho, associada ao sistema de drenagem e contenção de sedimentos do complexo minerador. A barragem está localizada na região da Serra dos Carajás e possui função de armazenamento e controle de sedimentos e efluentes oriundos das operações de mineração e beneficiamento de minério de ferro. De acordo com dados institucionais, a estrutura recebe rejeitos e sedimentos provenientes das operações da mina Serra Norte, estando integrada ao sistema hidráulico da região (Figura 02).

Figura 2. Barragem do Geladinho



Fonte: Autores, 2026.

A barragem possui grande capacidade de armazenamento, com volume estimado superior a 140 milhões de metros cúbicos, sendo construída com materiais de terra e utilizada principalmente para retenção de sedimentos e controle de efluentes associados às operações de mineração. Além disso, a estrutura integra um conjunto de reservatórios e sistemas de drenagem que controlam o fluxo de água e sedimentos provenientes das áreas de lavra e beneficiamento mineral.

A região também apresenta elevada sensibilidade ambiental, uma vez que a barragem está inserida na área de influência da APA do Igarapé Gelado, unidade de conservação federal localizada na Floresta Nacional de Carajás. Dessa forma, o monitoramento da qualidade da água e do comportamento hidrossedimentológico da barragem torna-se um fator essencial para a prevenção de impactos ambientais e para a manutenção da segurança das operações minerárias.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

O monitoramento de barragens de mineração é realizado por meio de um conjunto de instrumentos de sensores capazes de fornecer dados contínuos sobre o comportamento estrutural e hidráulico dessas estruturas. No caso das barragens do complexo minerador de Carajás, os dados provenientes desses instrumentos são centralizados em centros de monitoramento geotécnico responsáveis pela análise contínua das condições estruturais das barragens. Esses centros operam de forma permanente, permitindo o acompanhamento em tempo real das variáveis monitoradas e contribuindo para a identificação precoce de possíveis anomalias estruturais ou ambientais.

Para o monitoramento da turbidez da água foi utilizado o sistema composto por turbidímetro JUMO Ecoline NTU e uma unidade/controladora de sensores digitais JUMO AQUIS 500 RS (Figura 03). Esse sistema opera de forma automatizada, realizando medições periódicas da turbidez da água e transmite os dados para sistemas de armazenamento e processamento de informações.

Figura 3. Sistema de monitoramento de turbidez



Fonte: Autores, 2026.

O método de medição de turbidez adotado baseia-se na norma ISO 7027, utilizando o princípio nefelométrico calibrado com padrões de formazinha, no qual a turbidez é determinada pela intensidade da luz dispersa a 90° em relação ao feixe incidente. Esse método emprega uma fonte de luz monocromática no infravermelho, com comprimento de onda de 860 ± 30 nm, proveniente de um LED, o que reduz interferências associadas à cor da amostra. A detecção é

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

realizada por um sensor posicionado a 90°, podendo haver ângulos adicionais de medição, enquanto o percurso óptico é limitado a 10 cm, conforme padronização da norma. O equipamento utilizado opera na faixa de 0 a 1000 NTU, sendo adequado para o monitoramento de variações de turbidez em sistemas ambientais.

Os dados obtidos são registrados em intervalos regulares de tempo, a cada hora, formando séries temporais que permitem analisar a evolução do comportamento da turbidez ao longo do período de monitoramento, de 12 de julho de 2024 a 22 de março de 2026. Após a coleta, os dados passaram por uma etapa de tratamento e organização, contemplando a verificação da consistência das medições, a remoção de valores inconsistentes, como registros negativos e dados associados a falhas de sensores, e a padronização das unidades de medida. Tais ocorrências não possuem significado físico para a variável turbidez e estão, em geral, relacionadas a falhas de medição, ruídos instrumentais ou interferências no equipamento de monitoramento.

Adicionalmente, foram realizadas etapas de verificação de integridade dos dados, incluindo a identificação e tratamento de valores faltantes, registros duplicados e possíveis anomalias na série temporal. Esse processo teve como objetivo garantir a confiabilidade e a representatividade do conjunto de dados, evitando distorções nas análises subsequentes. Após essas etapas, os dados foram estruturados em bases organizadas e consistentes, adequadas para processamento estatístico e construção de visualizações analíticas.

O processo de tratamento seguiu a lógica de ETL (*Extract, Transform, Load*), sendo conduzido no ambiente do Power Query, onde os dados foram extraídos da fonte original, transformados por meio de filtros, ajustes de tipos de dados, tratamento de inconsistências e criação de colunas auxiliares, e posteriormente carregados para o modelo analítico.

A análise estatística das séries temporais obtidas pelo sistema de monitoramento da barragem foi realizada com o suporte dos softwares Excel e Power BI, possibilitando tanto o processamento dos dados quanto a construção de visualizações analíticas interativas. Inicialmente, foi conduzida uma análise exploratória, com a determinação de medidas estatísticas descritivas, incluindo média, desvio padrão, valores máximos e mínimos, com o objetivo de caracterizar o comportamento geral da série e avaliar sua variabilidade.

Esses indicadores foram posteriormente integrados a um *dashboard* interativo desenvolvido no Power BI, permitindo a visualização dinâmica da evolução da turbidez ao longo do tempo, bem como a identificação de padrões, tendências e possíveis anomalias. As análises estatísticas e os indicadores apresentados foram implementados por meio da linguagem DAX (*Data Analysis Expressions*), que possibilita a criação de medidas dinâmicas baseadas no

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

contexto dos dados. As fórmulas desenvolvidas permitiram não apenas o cálculo das estatísticas descritivas, mas também a identificação de eventos críticos e a realização de análises temporais, contribuindo para uma interpretação mais robusta e integrada da série de turbidez.

Para o cálculo de limites foi utilizada a metodologia baseada em percentis é uma abordagem estatística utilizada para caracterizar a distribuição dos dados e definir limites operacionais de forma robusta, especialmente em séries que não seguem distribuição normal, como é o caso de variáveis ambientais. A utilização desse método é justificada por ser menos sensível à presença de valores extremos (*outliers*) e mais adequada para distribuições assimétricas, permitindo uma interpretação direta da frequência de ocorrência dos eventos. Seu cálculo é obtido com base na distribuição ordenada dos dados, sendo o percentil Pk definido como o valor abaixo do qual se encontram k% das observações. Para sua determinação, os dados foram organizados em ordem crescente, e a posição do percentil foi obtida por meio da relação (equação 01):

$$i = \frac{k}{100} . (n + 1) \quad (1)$$

Onde, n representa o número total de observações.

Em DAX, os percentis foram determinados por meio da função “PERCENTILEX.INC”, aplicada sobre o conjunto de dados filtrado, permitindo calcular limites estatísticos como P90, P95 e P99. Esses valores foram utilizados para a definição de faixas de classificação operacional, representando diferentes níveis de criticidade da turbidez (Figura 4).

Figura 4. Cálculo de Percentis

```
P90_Turbidez =
PERCENTILEX.INC
(
    ALL
    ('SNOBGPJTB001'),
    'SNOBGPJTB001'[TURBIDEZ],
    0.90
)
```

Fonte: Autores, 2026.

Do ponto de vista matemático, a média móvel simples é definida como a média aritmética de um conjunto de observações dentro de uma janela temporal fixa. Para uma série temporal (xt), a média móvel de ordem (m) no instante (t) é dada pela equação empírica (Equação 2):

$$MMt = \frac{1}{m} \sum_{i=0}^{m-1} xt - 1 \quad (2)$$

Onde,

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

MMt é a média móvel no tempo ttt;

m representa o tamanho da janela (por exemplo, 7, 15 ou 30 dias);

xt−i são os valores observados nos períodos anteriores.

A implementação média móveis foi realizada por meio funções DAX iterativas como “AVERAGE”, combinadas com filtros de janela temporal. Essas medidas consideram subconjuntos de dados em intervalos definidos (7, 15 e 30 dias), permitindo a suavização da série e a identificação de tendências ao longo do tempo (Figura 5)

Figura 5. Cálculo de médias móveis

```
MediaMovel_7d =
CALCULATE(
    [Media_Diaria],
    DATESINPERIOD(
        Calendario[Date],
        MAX(Calendario[Date]),
        -7,
        DAY
    )
)
```

Fonte: Autores, 2026.

Além disso, foram analisadas as distribuições de frequência dos valores de turbidez registrados ao longo do período de monitoramento. Essa análise possibilita identificar a ocorrência de eventos extremos ou valores atípicos que possam estar associados a eventos hidrológicos intensos, como períodos de chuva intensa, ou a alterações no funcionamento da barragem e de seus sistemas de drenagem. O tratamento estatístico envolveu a análise temporal dos dados, para isso, as séries históricas de turbidez foram organizadas cronologicamente, permitindo a identificação de tendências, padrões sazonais e variações associadas a eventos específicos. pois permite compreender a dinâmica dos parâmetros monitorados ao longo do tempo.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Durante todo o período analisado, foram coletados 14.569 registros de turbidez, os quais passaram por um processo inicial de tratamento de dados voltado à remoção de inconsistências. Após essa etapa, o conjunto foi depurado para 14.155 registros válidos, garantindo maior confiabilidade para as análises subsequentes.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

A agregação dos dados em escala diária foi adotada como estratégia para reduzir a variabilidade intradiária associada às medições em alta frequência, as quais podem refletir oscilações momentâneas decorrentes de ruídos instrumentais, interferências operacionais ou variações de curta duração sem representatividade do comportamento global do sistema. Dessa forma, a consolidação dos dados horários em valores diários, por meio do cálculo da média e do valor máximo, permite uma representação mais estável e interpretável da série temporal, favorecendo a identificação de tendências, padrões sazonais e eventos extremos.

Tabela 1. Média NTU

ANO	MÉDIA	DESV. PAD.
2024	27,95	52,17
2025	7,85	13,54
2026	12,00	10,84

Fonte: Autores, 2026.

A análise da turbidez por ano (Tabela 1) evidencia variações significativas tanto nos valores médios quanto na dispersão dos dados ao longo do período estudado. No ano de 2024, observa-se a maior média de turbidez (27,95 NTU), acompanhada de um desvio padrão elevado (52,17 NTU), indicando forte variabilidade e presença de eventos extremos que impactaram significativamente o comportamento da série. Em contraste, o ano de 2025 apresentou uma redução expressiva na média (7,85 NTU), bem como uma diminuição substancial do desvio padrão (13,54 NTU), caracterizando um período de maior estabilidade e menor ocorrência de picos elevados de turbidez. Já em 2026, verifica-se um leve aumento da média (12,00 NTU) em relação ao ano anterior, porém com desvio padrão ainda reduzido (10,84 NTU), sugerindo a manutenção de um regime mais controlado, com menor influência de eventos extremos quando comparado a 2024. Esses resultados indicam uma possível mudança no comportamento do sistema ao longo do tempo, com tendência à redução da variabilidade e maior estabilidade operacional nos anos mais recentes. A elevada dispersão observada em 2024, associada aos maiores valores médios, reforça a hipótese de ocorrência de eventos críticos concentrados nesse período, os quais influenciam de forma significativa as estatísticas, sendo fundamentais para a compreensão do comportamento extremo da turbidez.

A definição dos limites operacionais foi realizada com base na distribuição dos dados por meio do uso de percentis, especificamente P90, P95 e P99, os quais permitem caracterizar o comportamento do sistema de forma robusta, minimizando a influência de valores extremos.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Tabela 2. Percentis

PERCENTIL	NTU
P90	29,19
P95	63,62
P99	184,62

Fonte: Autores, 2026.

Os valores elevados observados nos percentis superiores (P95 e P99) indicam a ocorrência de eventos extremos associados ao aumento da concentração de partículas em suspensão. Esse comportamento é consistente com o observado por Kim *et al.* (2025), que demonstraram a forte relação entre turbidez e a dinâmica de transporte de sedimentos, sendo influenciada pela granulometria e concentração de partículas. Além disso, estudos recentes apontam que, em ambientes impactados por atividades minerárias, eventos extremos de turbidez estão associados à ressuspensão de sedimentos finos e à variabilidade hidrossedimentológica (MATOS *et al*., 2024). Dessa forma, os valores elevados de P99 observados neste estudo reforçam o caráter episódico desses eventos, corroborando achados da literatura.

Com base nesses percentis, estabeleceu-se uma classificação em quatro níveis: normal, atenção, alerta e emergência (Tabela 3).

Tabela 3. Limites operacionais

FAIXA	CRITÉRIO	FAIXA NTU	INTERPRETAÇÃO
Normal	≤ P90	0 – 29,19	operação estável
Atenção	P90 – P95	29,19 – 63,62	início de desvio
Alerta	P95 – P99	63,62 – 184,62	evento raro
Emergência	P99 – 1,2 * P99	184,62 – 221,54	evento crítico

Fonte: Autores, 2026.

O limite de emergência foi definido como 1,2 × P99 com o objetivo de estabelecer um limiar adicional acima do percentil 99, capaz de diferenciar eventos estatisticamente raros de ocorrências efetivamente críticas. Embora o P99 represente valores extremos da distribuição, sua utilização isolada pode ainda incluir variações naturais ou eventos transitórios não necessariamente associados a condições de risco elevado. Dessa forma, a aplicação de um fator multiplicador busca introduzir uma margem de segurança operacional, reduzindo a probabilidade de acionamento de alarmes decorrentes de flutuações pontuais.

A escolha do fator 1,2 foi adotada como critério empírico, baseado na necessidade de equilibrar sensibilidade e especificidade do sistema de alerta. Fatores inferiores (como 1,1) tenderiam a manter elevada sensibilidade, porém com maior propensão a falsos positivos, enquanto fatores superiores (como 1,5) poderiam reduzir excessivamente a capacidade de

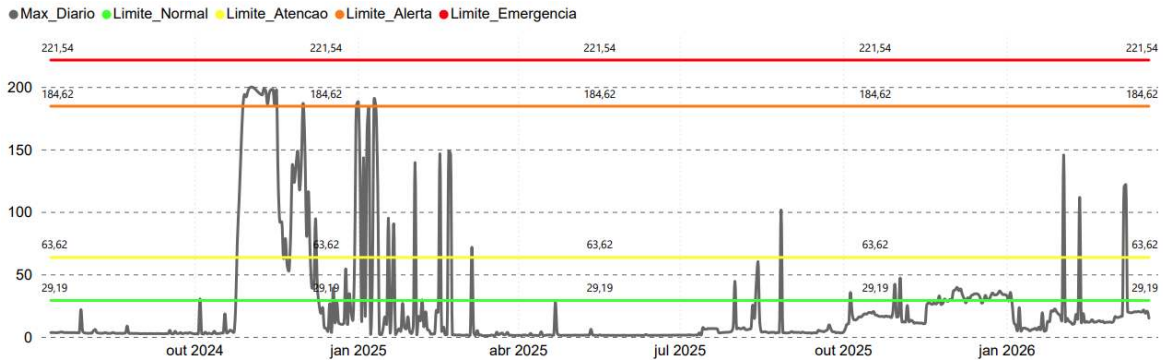
Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

detecção precoce de eventos críticos. Assim, o valor de 1,2 foi considerado adequado por representar um incremento moderado sobre o P99, preservando a identificação de eventos extremos ao mesmo tempo em que minimiza a influência de variações isoladas.

Ressalta-se que, na ausência de critérios padronizados na literatura para definição de limites de emergência baseados em turbidez em barragens de mineração, a adoção desse fator configura-se como uma escolha metodológica do estudo, passível de calibração conforme a ampliação da base de dados e a integração com outros parâmetros de monitoramento. Dessa forma, o limite proposto deve ser interpretado como um valor operacional inicial, sujeito a ajustes conforme a evolução do sistema e o aprofundamento das análises.

A definição das faixas de classificação da turbidez, baseada nos percentis da distribuição, permitiu estabelecer critérios objetivos para a interpretação do comportamento do sistema ao longo do período analisado. Valores de turbidez até 29,19 NTU (≤ P90) foram classificados como condição normal, representando um regime de operação estável e predominante na série temporal. A faixa de atenção, compreendida entre 29,16 NTU e 63,62 NTU (P90–P95), indica o início de desvios em relação ao comportamento típico, sinalizando possíveis alterações nas condições do sistema que, embora ainda não críticas, demandam monitoramento mais rigoroso. Já os valores entre 63,62 NTU e 184,62 NTU (P95–P99) foram classificados como nível de alerta, caracterizando eventos menos frequentes, porém de maior intensidade, associados a perturbações relevantes que podem comprometer a qualidade do meio analisado. Por fim, valores superiores a 184,62 NTU (P99–1,2*P99) foram enquadrados como condição de emergência, representando eventos extremos e críticos, com baixa frequência, mas elevado potencial de impacto (Figura 6).

Figura 6. Análise temporal



Fonte: Autores, 2026.

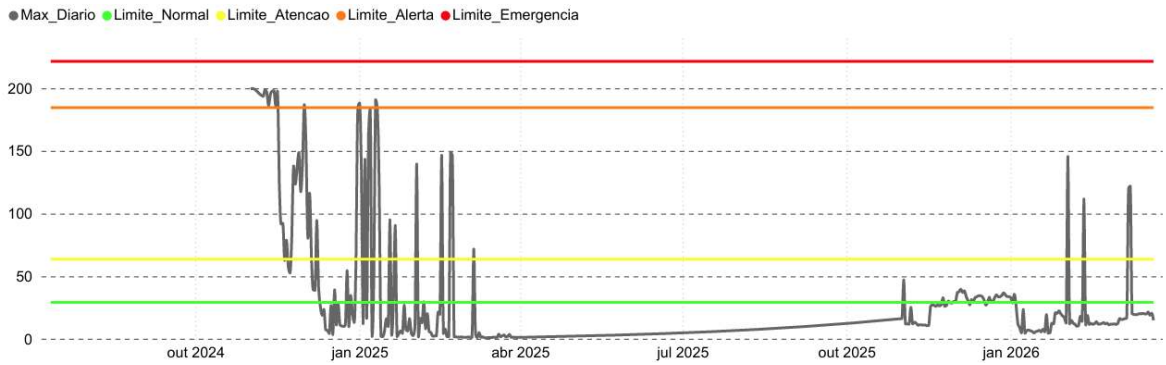
Com isso foi possível realizar a análise histórica dos dados de turbidez da barragem do Geladinho, que evidenciou um comportamento típico de valores de dados

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

ambientais com distribuição assimétrica, no qual a maior parte das observações se concentra em níveis baixos, enquanto uma pequena parcela de eventos apresenta magnitudes significativamente elevadas, reforçando a importância da utilização de percentis como ferramenta robusta para definição de limites operacionais e suporte à tomada de decisão (Figura 6).

A ocorrência de valores elevados de parâmetros ambientais concentra-se predominantemente no período associado ao inverno amazônico, compreendido entre os meses de novembro e março, caracterizado por elevados índices pluviométricos no estado do Pará. Nesse contexto, a maior incidência de precipitação contribui diretamente para o aumento da variabilidade dos dados, favorecendo a ocorrência de picos nos valores observados. A Figura 7 ilustra essa distribuição, evidenciando a concentração dos eventos mais intensos nesse intervalo sazonal, o que reforça a necessidade de um monitoramento mais rigoroso e contínuo nesse período.

Figura 7. Turbidez no período chuvoso



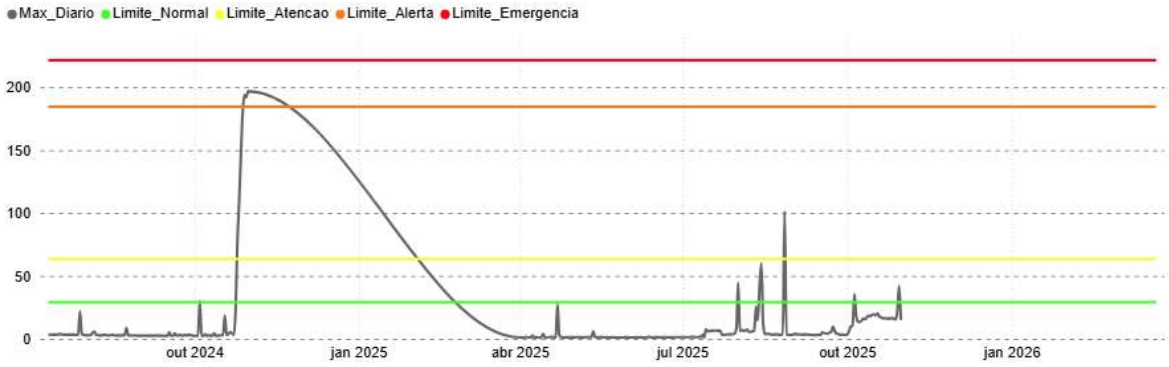
Fonte: Autores, 2026.

A maior incidência de valores elevados durante o período chuvoso está em concordância com estudos que indicam a precipitação como principal fator de controle da turbidez em sistemas naturais e impactados. Kim *et al.* (2025) destacam que eventos pluviométricos intensificam o transporte de sedimentos e elevam significativamente os níveis de turbidez. De forma complementar, Silva Júnior et al. (2023) demonstram que, em bacias hidrográficas sob influência antrópica, o aumento do escoamento superficial durante períodos chuvosos promove maior carreamento de partículas, elevando a turbidez dos corpos hídricos. Assim, o padrão sazonal identificado neste estudo, com picos associados ao inverno amazônico, encontra respaldo na literatura.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Enquanto no período majoritariamente seco, compreendido entre os meses de abril a outubro, observa-se maior incidência de valores baixos de turbidez, indicando um comportamento mais estável do sistema e menor influência de fatores externos, como o escoamento superficial e o carreamento de sedimentos, típicos de períodos chuvosos. Esse padrão reforça a relação direta entre a variabilidade da turbidez e a sazonalidade climática, evidenciando que, em condições de menor precipitação, há redução significativa na ocorrência de eventos extremos e maior previsibilidade dos dados monitorados (Figura 8)

Figura 8. Turbidez no período seco

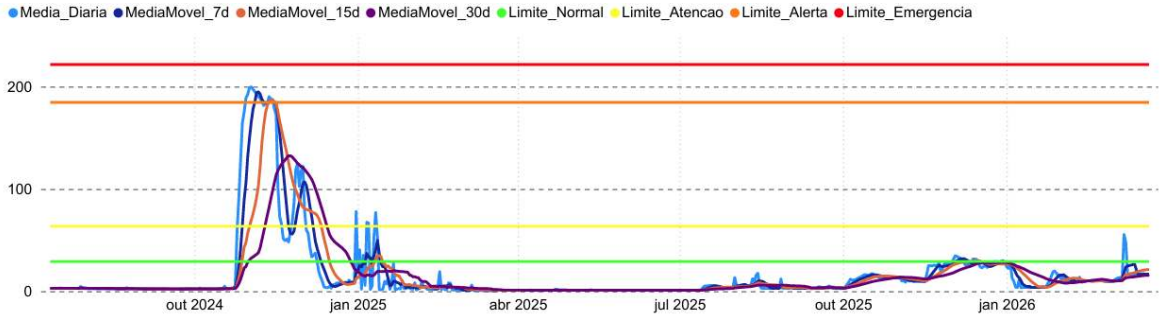


Fonte: Autores, 2026.

A análise temporal por meio de médias móveis de 7, 15 e 30 dias permitiu identificar não apenas picos isolados, mas também a persistência de eventos críticos, especialmente no período entre o final de 2024 e o início de 2025, caracterizado por valores elevados mantidos ao longo de várias semanas. Em contrapartida, observou-se um longo intervalo de estabilidade ao longo de 2025, seguido por um aumento gradual da turbidez no final do período analisado, porém com menor intensidade e variabilidade. A comparação anual reforça essa interpretação, evidenciando uma redução significativa da média e da dispersão dos dados entre 2024 e 2025, sugerindo maior controle do sistema ou menor influência de fatores externos (Figura 9).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Figura 9. Médias móveis



Fonte: Autores, 2026.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A segurança de barragens de mineração configura-se como um dos principais desafios no âmbito da gestão ambiental e operacional, especialmente em regiões ambientalmente sensíveis, onde eventuais falhas podem resultar em impactos significativos aos recursos naturais e às comunidades adjacentes. Nesse contexto, o monitoramento contínuo de variáveis ambientais assume papel estratégico, permitindo a detecção precoce de alterações que possam indicar tanto processos de instabilidade estrutural quanto mudanças na qualidade dos corpos hídricos. Dentre os parâmetros analisados, a turbidez destaca-se como um importante indicador indireto da dinâmica de sedimentos, refletindo processos de erosão, carreamento de partículas e alterações no regime hidrossedimentológico.

A análise da série temporal de turbidez demonstrou que, embora o sistema apresente comportamento predominantemente estável, há ocorrência de eventos extremos de elevada magnitude, evidenciados pela forte assimetria positiva da distribuição e pelo crescimento expressivo nos percentis superiores (P95 = 63,62 NTU e P99 = 184,62 NTU). O valor máximo registrado na série foi de 199,94 NTU, o que, embora represente um evento extremo relevante, permaneceu abaixo do limiar de emergência definido (> 221,54 NTU). Dessa forma, não foram identificados eventos classificados como emergência durante o período analisado, resultado que reforça a importância da correta interpretação dos limites estatísticos adotados.

Nesse sentido, a utilização de percentis para definição de limites operacionais mostrou-se adequada e consistente, permitindo a classificação objetiva das condições em níveis de normalidade, atenção, alerta e emergência. Essa abordagem possibilitou distinguir o comportamento típico do sistema de eventos raros, contribuindo para uma interpretação mais robusta da variabilidade dos dados e para o estabelecimento de critérios aplicáveis a sistemas de monitoramento e alerta.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

A análise por meio de médias móveis evidenciou a importância de considerar diferentes escalas temporais na interpretação da série, permitindo distinguir eventos isolados de períodos prolongados de elevação da turbidez. Destaca-se a ocorrência de um período crítico entre o final de 2024 e o início de 2025, caracterizado não apenas por picos elevados, mas pela persistência de valores acima da média ao longo de várias semanas. Em contrapartida, observou-se uma tendência de estabilização ao longo de 2025, seguida de um aumento moderado no início de 2026, sem atingir a intensidade dos eventos anteriormente registrados.

A influência da sazonalidade climática mostrou-se determinante, com maior incidência de valores elevados durante o inverno amazônico (novembro a março), período marcado por maiores índices pluviométricos e intensificação do carreamento de sedimentos. Por outro lado, o período seco (abril a outubro) apresentou maior estabilidade e predominância de valores reduzidos, evidenciando menor interferência de processos hidrológicos.

Diante desses resultados, conclui-se que o comportamento da turbidez está diretamente associado à ocorrência de eventos extremos e à sazonalidade climática, sendo fundamental a aplicação de abordagens estatísticas capazes de capturar essa complexidade. A utilização conjunta de percentis e médias móveis mostrou-se eficaz na caracterização do sistema, permitindo a identificação de padrões de normalidade e a detecção de desvios relevantes. Ressalta-se, contudo, que os limites definidos possuem caráter operacional e devem ser interpretados de forma integrada a outras variáveis ambientais e operacionais, considerando as limitações inerentes ao uso da turbidez como indicador indireto.

Como desdobramento desta pesquisa, prevê-se o aprofundamento das análises por meio da aplicação de técnicas estatísticas avançadas, incluindo métodos de detecção automática de anomalias, análise de correlação com variáveis hidrológicas, como precipitação acumulada, e integração com outros parâmetros de qualidade da água. Adicionalmente, propõe-se o uso da linguagem Python para tratamento, modelagem e automação dos dados, bem como o desenvolvimento de um dashboard dinâmico com dados em tempo real, voltado ao acompanhamento operacional e à tomada de decisão, permitindo maior agilidade na identificação de desvios e na resposta a eventos críticos.

REFERÊNCIAS

Agência Nacional das Águas; Ministério do Meio Ambiente. **Classificação de Barragens: Melhores Práticas Nacionais e Internacionais** [Documento Técnico]. Brasília, DF: ANA; 2013. Disponível em: https://arquivos.ana.gov.br/cadastros/barragens/Classificacao-de-barragens.pdf. Acesso em: 16 mar. 2026.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

ATEIA, M.; WEI, H.; ANDREESCU, S. Sensors for emerging water contaminants: overcoming roadblocks to innovation. **Environmental Science & Technology**, v. 58, n. 6, p. 2636-2651, 2024. Disponível em: https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.3c09889. Acesso em: 16 mar. 2026.

AZAM, S.; LI, Q. Tailings dam failures: a review of the last one hundred years. **Geotechnical News**, v. 28, n. 4, p. 50-54, 2010. Disponível em: https://ksmproject.com/wp-content/uploads/2017/08/Tailings-Dam-Failures-Last-100-years-Azam2010.pdf. Acesso em: 16 mar. 2026.

CHI, F. et al. Reliability analysis of backward erosion piping in an embankment dam considering the spatial variability of soil properties. **Scientific reports**, v. 15, n. 1, p. 23974, 2025. Disponível em: https://www.nature.com/articles/s41598-025-09175-9. Acesso em: 16 mar. 2026.

DAI, P. et al. Enhanced early warning threshold setting for dam safety monitoring based on M-estimation and confidence interval method. **Water**, v. 17, n. 13, p. 2040, 2025. Disponível em: https://www.mdpi.com/2073-4441/17/13/2040. Acesso em: 16 mar. 2026.

DRI, M. et al. **Best Environmental Management Practice for the Waste Management Sector.** JRC Science for Policy Report: Luxembourg, 2018, ISBN 978-92-79-80361-1. Acesso em: 16 mar. 2026.

DROUJKO, J.; MOLNAR, P. Open-source, low-cost, in-situ turbidity sensor for river network monitoring. **Scientific Reports**, v. 12, n. 1, p. 10341, 2022. Disponível em: https://www.nature.com/articles/s41598-022-14228-4. Acesso em: 16 mar. 2026.

FORTI, T. L. D. et al. Real-time structural monitoring of the Campos Novos dam. **Journal of Civil Structural Health Monitoring**, v. 14, n. 4, p. 963-978, 2024. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s13349-024-00770-4. Acesso em: 16 mar. 2026.

IBRAHIM, O. R. et al. Comparative insights into independent and hybrid modeling strategies for effective river water level prediction and management. **Modeling Earth Systems and Environment**, v. 11, n. 6, p. 415, 2025. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s40808-025-02611-9. Acesso em: 16 mar. 2026.

ICOLD. **Boletim 72: "Guidance for the Preparation of Dam Safety Reviews",** 1989. Disponível em: https://www.icold-cigb.org/gb/publications/bulletins.asp. Acesso em: 16 mar. 2026

GARCIA, F. F. et al. Mine tailings dams' failures: serious environmental impacts, remote solutions. **Environment, Development and Sustainability**, v. 27, n. 8, p. 18179-18201, 2025. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s10668-024-04628-z. Acesso em: 16 mar. 2026.

KIM, J. et al. Turbidity and suspended sediment relationship based on sediment composition and particle size distribution. **Scientific Reports**, v. 15, n. 1, p. 16286, 2025. Disponível em: https://www.nature.com/articles/s41598-025-00435-2. Acesso em: 16 mar. 2026.

LI, Y.; HAN, F.; ZHENG, Y. Artificial Intelligence in Surface Water Quality Research and Management: Recent Progress and Future Directions. **Ecosystem Health and Sustainability**,

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

v. 12, p. 0474, 2026. Disponível em: https://spj.science.org/doi/full/10.34133/ehs.0474. Acesso em: 16 mar. 2026.

LUO, C.; LI, D.; XU, B. Study on the evolution of tailings dam break disaster under complex environment. **Sustainability**, v. 15, n. 20, p. 14728, 2023. Disponível em: https://www.mdpi.com/2071-1050/15/20/14728. Acesso em: 16 mar. 2026.

MATOS, T. et al. A review of methods and instruments to monitor turbidity and suspended sediment concentration. **Journal of Water Process Engineering,** v. 64, p. 105624, 2024. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214714424008560?via%3Dihub. Acesso em: 16 mar. 2026.

MIGLINO, D. et al. Image processing for continuous river turbidity monitoring–full-scale tests and potential applications. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 29, n. 17, p. 4133-4151, 2025. Disponível em: https://hess.copernicus.org/articles/29/4133/2025/. Acesso em: 16 mar. 2026.

OUELLET, S. M. et al. Advanced monitoring of tailings dam performance using seismic noise and stress models. **Communications Earth & Environment**, v. 3, n. 1, p. 301, 2022. Disponível em: https://www.nature.com/articles/s43247-022-00629-w. Acesso em: 16 mar. 2026.

OULKAR, S. N. et al. Design and implementation of a robust data logging and satellite telemetry system for remote cryospheric research. **Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems**, v. 15, n. 1, p. 75-88, 2026. Disponível em: https://gi.copernicus.org/articles/15/75/2026/. Acesso em: 16 mar. 2026.

OLIVEIRA, S. S. J.; RODRIGUES, A. S.; MATOS, L. G. H.; YAMANAKA, F. M.; RODRIGUES, A. S.; TEIXEIRA, M. R. Evaluation of the Susceptibility to Liquefaction of the Foundation Material of a Tailings DAM. **Revista de Gestão Social e Ambiental - RGSA**, São Paulo (SP), v. 19, n. 8, p. e013205, 2025. DOI: 10.24857/rgsa.v19n8-067. Disponível em: https://rgsa.openaccesspublications.org/rgsa/article/view/13205. Acesso em: 16 abr. 2026.

PEREIRA, A. C. TAILINGS LIQUEFACTION AND DAM STABILITY: ADVANCES IN DIAGNOSIS, MONITORING, STANDARDS AND MITIGATION – A CRITICAL REVIEW. **REMUNOM**, [S. l.], v. 21, n. 02, p. 1–55, 2025. DOI: 10.61164/erfqjg05. Disponível em: https://remunom.ojsbr.com/multidisciplinar/article/view/5120. Acesso em: 16 mar. 2026.

REN, Q.; LI, M.; KONG, T.; MA, J. Multi-sensor real-time monitoring of dam behavior using self-adaptive online sequential learning. **Automation in Construction**, [*S.l.*], v. 140, p. 104365, ago. 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104365.

RODRIGUES, A. dos S.; YAMANAKA, F. M.; GARCIA, V. H. B.; TEIXEIRA, M. R. Análise multidisciplinar aplicada à perícia ambiental na Foz do Rio Amazonas. **Caderno Pedagógico**, *[S. l.]*, v. 22, n. 12, p. e20899, 2025. DOI: 10.54033/cadpedv22n12-231. Disponível em: https://ojs.studiespublicacoes.com.br/ojs/index.php/cadped/article/view/20899. Acesso em: 16 abr. 2026.

SHAO, S. et al. An Integrated Multi-Sensor Information System for Real-Time Reservoir Monitoring and Management. **Sensors,** v. 25, n. 18, p. 5730, 2025. Disponível em: https://www.mdpi.com/1424-8220/25/18/5730. Acesso em: 16 mar. 2026.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

SILVA, G. J. da; BORGES, A. C. Statistical Process Control in the Environmental Monitoring of Water Quality and Wastewaters: A Review. **Water**, v. 17, n. 9, p. 1281, 2025. Disponível em: https://www.mdpi.com/2073-4441/17/9/1281. Acesso em: 16 mar. 2026.

SILVA JÚNIOR, R. O. da et al. Methodological approach for an online water quality monitoring system in an iron ore tailing dam. **Water**, v. 15, n. 20, p. 3663, 2023. Disponível em: https://www.mdpi.com/2073-4441/15/20/3663. Acesso em: 16 mar. 2026.

SILVA, V. B.; RODRIGUES, A. S.; CARDOSO, A. A. A.; YAMANAKA, F. M.; MATOS, L. G. H.; SANTOS, C. A. O.; FRANÇA, C. D. V.; TEIXEIRA, M. R. The Use of Geotechnologies in Environmental Expert Reports: an Analysis of the Application of Tools That Contribute to the Support of Environmental Expert Reports in Cases of Meteorological Disasters in Pará. **Revista de Gestão Social e Ambiental - RGSA**, São Paulo (SP), v. 19, n. 12, p. e013700, 2025. DOI: 10.24857/rgsa.v19n12-012. Disponível em: https://rgsa.openaccesspublications.org/rgsa/article/view/13700. Acesso em: 16 abr. 2026.

SKRZYPCZAK, A.; TANDYRAK, R. Biotic aspects of suspended solid reduction in sedimentation ponds. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 31, n. 56, p. 65066-65077, 2024. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-024-35475-0. Acesso em: 16 mar. 2026.

SOETAN, O. et al. Application of time series and multivariate statistical models for water quality assessment and pollution source apportionment in an Urban River, New Jersey, USA. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 31, n. 52, p. 61643-61659, 2024. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-024-35330-2. Acesso em: 16 mar. 2026.

VICK, S. G. Planning, design, and analysis of tailings dams. **BiTech Publishers**, 1990. Disponível em: https://damfailures.org/sites/default/files/wp-pdf/Vick_Steven_Planning_Design_Analysis_Tailings_Dams_1990-1.pdf. Acesso em: 16 mar. 2026

VU, C. T.; et al. A glass-fiber-optic turbidity sensor for real-time in situ water quality monitoring. **Sensors**, v. 23, n. 16, 2023. Disponível em: https://www.mdpi.com/1424-8220/23/16/7271. Acesso em: 16 mar. 2026.

WANG, C. et al. Pore water pressure surge and piping failure characteristics in tailings dam: evidence from large-scale physical modelling. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, v. 84, n. 11, p. 1-20, 2025. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s10064-025-04588-2. Acesso em: 16 mar. 2026.

WORLD MINE TAILINGS FAILURES. **Supporting global research in tailings failure root cause, loss prevention and trend analysis.** 2020. Disponível em: https://worldminetailingsfailures.org/. Acesso em: 16 mar. 2026.

WU, W.et al. Pore water pressure and consolidation of tailing dams based on numerical simulation and similar modeling temporal and spatial distribution study. **Scientific Reports**, v. 15, n. 1, p. 26122, 2025. Disponível em: https://www.nature.com/articles/s41598-025-10105-y. Acesso em: 16 mar. 2026.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

YAMANAKA, F. M.; RODRIGUES, A. S.; GARCIA, V. H. B.; TEIXEIRA, M. R. Application of Electrical Resistivity Tomography with Pole-Dipole Arrangement in Environmental Expertise at the Mouth of the Amazon River. **Revista de Gestão Social e Ambiental - RGSA**, São Paulo (SP), v. 19, n. 11, p. e013748, 2025. DOI: 10.24857/rgsa.v19n11-019. Disponível em: https://rgsa.openaccesspublications.org/rgsa/article/view/13748. Acesso em: 16 abr. 2026.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.