

Redução da evaporação em reservatórios de mineração por meio de técnicas físicas e químicas

Reduction of evaporation in mining reservoirs using physical em chemical techniques

Guilherme Gomes de Medeiros¹
Heriberto Costa Monteiro²
Igor Pereira Fernandes³
Moisés Lucena de Oliveira⁴
Wedryson Lucas Xavier Oliveira Souza⁵
Diego Vinicius Cirilo do Nascimento⁶
Pedro Iuri Soares de Souza⁷
Andouglas Gonçalves da Silva Júnior⁸

Resumo

Este projeto aborda a problemática da perda de água por evaporação nos reservatórios a céu aberto da empresa de mineração Aura Borborema, localizada em Currais Novos (RN), região caracterizada por clima semiárido. A proposta consiste em uma solução estruturada em três etapas: o estudo do fenômeno da evaporação, a implementação de um sistema de coleta de dados por meio de sensores para monitoramento ambiental e, por fim, o desenvolvimento de um sistema de mitigação da evaporação. Para a solução do problema, foram analisados métodos físicos e químicos de redução da evaporação, com menção complementar a abordagens biológicas, destacando alternativas como o uso de garrafas PET recicladas,

¹ Discente do Curso de Formação Inicial e Continuada (Curso FIC) em Residência Tecnológica em Software Embarcado, na modalidade a distância. e-mail: guilherme762002@gmail.com

² Discente do Curso de Formação Inicial e Continuada (Curso FIC) em Residência Tecnológica em Software Embarcado, na modalidade a distância. e-mail: heribertoomonteiro@gmail.com

³ Discente do Curso de Formação Inicial e Continuada (Curso FIC) em Residência Tecnológica em Software Embarcado, na modalidade a distância. e-mail: igorperfl@gmail.com

⁴ Discente do Curso de Formação Inicial e Continuada (Curso FIC) em Residência Tecnológica em Software Embarcado, na modalidade a distância. e-mail: moisesbrats98@gmail.com

⁵ Discente do Curso de Formação Inicial e Continuada (Curso FIC) em Residência Tecnológica em Software Embarcado, na modalidade a distância. e-mail: wedryson@gmail.com

⁶ Docente do Curso de Formação Inicial e Continuada (Curso FIC) em Residência Tecnológica em Software Embarcado, na modalidade a distância. e-mail: diego.cirilo@ifrn.edu.br

⁷ Docente do Curso de Formação Inicial e Continuada (Curso FIC) em Residência Tecnológica em Software Embarcado, na modalidade a distância. e-mail: pedro.iuri@ifrn.edu.br

⁸ Docente do Curso de Formação Inicial e Continuada (Curso FIC) em Residência Tecnológica em FPGA, na modalidade a distância. e-mail: andouglas.silva@ifrn.edu.br

painéis solares flutuantes, quebra-ventos e a aplicação de álcoois graxos. O objetivo é desenvolver um protótipo funcional que possibilite a redução significativa da perda de volume de água, utilizando soluções de baixo custo aliadas a tecnologias de automação aplicáveis ao setor de mineração.

Palavras-chave: Evaporação. Automação. IoT. Mineração. Reservatório.

Abstract

This project addresses the problem of water loss through evaporation in the open-air reservoirs of the mining company Aura Borborema, located in Currais Novos, Rio Grande do Norte, a region characterized by a semi-arid climate. The proposal consists of a solution structured in three stages: the study of the evaporation phenomenon, the implementation of a data collection system using sensors for environmental monitoring, and, finally, the development of an evaporation mitigation system. To solve the problem, physical and chemical methods for reducing evaporation were analyzed, with complementary mention of biological approaches, highlighting alternatives such as the use of recycled PET bottles, floating solar panels, windbreaks, and the application of fatty alcohols. The objective is to develop a functional prototype capable of significantly reducing water volume loss by using low-cost solutions combined with automation technologies applicable to the mining sector.

Keywords: Evaporation. Automation. IoT. Mining. Reservoir.

1 INTRODUÇÃO

A disponibilidade e o uso eficiente de água são fatores estratégicos para a operação de empreendimentos minerários, indispensáveis para as atividades que demandam grandes volumes hídricos ao longo de sua execução. Na mineração de ouro, a água é amplamente utilizada durante as etapas de processamento do minério, tornando essencial a criação de grandes reservatórios para o armazenamento e a recirculação desse recurso ao longo do ciclo operacional (TRINDADE & BARBOSA FILHO, 2019). Nesse contexto, a redução de perdas hídricas torna-se um aspecto relevante para a eficiência técnica e econômica das operações.

Em regiões de clima semiárido, como no estado do Rio Grande do Norte, por exemplo, as condições climáticas caracterizadas por elevadas temperaturas, intensa radiação solar e ação persistente dos ventos favorecem o aumento das taxas de evaporação em reservatórios a céu aberto. Estudos indicam que, nessas condições, a evaporação pode representar uma parcela significativa das perdas de água armazenada, impactando diretamente

a disponibilidade hídrica para o processo industrial e elevando a necessidade de reposição de água ao sistema (MEDEIROS, 2017).

Diante desse cenário, diferentes técnicas têm sido estudadas com o objetivo de controlar a evaporação em corpos d'água. A literatura especializada classifica essas técnicas em métodos físicos, químicos e biológicos, os quais diferem quanto aos mecanismos de atuação, custos de implantação, requisitos operacionais e impactos ambientais associados (OLIVEIRA et al., 2019). Entre esses, os métodos físicos têm se destacado por atuarem diretamente sobre os principais fatores que intensificam a evaporação, como a radiação solar e a velocidade do vento, por meio do uso de coberturas flutuantes, estruturas de sombreamento e barreiras quebra-vento (YOUSSEF & KHODZINSKAYA, 2019).

Apesar da existência de soluções tecnicamente consolidadas, como coberturas modulares industriais e sistemas fotovoltaicos flutuantes, sua aplicação em reservatórios de uso minerário pode ser limitada por fatores como elevado custo de implantação, complexidade de construção e manutenção e necessidade de adaptações às condições operacionais específicas do empreendimento. Nesse contexto, alternativas baseadas em materiais de baixo custo e fácil implementação têm sido objeto de investigações recentes.

Dessa forma, o objetivo deste trabalho é analisar o uso de técnicas de controle da evaporação aplicadas a reservatórios a céu aberto empregados no processamento de ouro, com ênfase em soluções de custo reduzido e fácil aplicação. A justificativa desta pesquisa reside na possibilidade de contribuir para a otimização do uso da água em operações minerárias, ampliando a compreensão sobre o desempenho dessas técnicas em condições reais de operação e fornecendo subsídios técnicos para a tomada de decisão em projetos de gestão hídrica no setor mineral.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A evaporação da água em reservatórios a céu aberto constitui uma das principais causas de perda hídrica em regiões de clima semiárido, sendo influenciada por fatores como radiação solar, temperatura do ar, velocidade do vento, umidade relativa e características da superfície líquida. Em ambientes como o semiárido nordestino, onde predominam elevadas taxas de insolação, baixos índices pluviométricos e ventos persistentes, a evaporação pode representar parcela significativa do volume armazenado, comprometendo a eficiência hídrica de sistemas destinados ao abastecimento urbano, à irrigação e às atividades industriais (OLIVEIRA et al., 2019; MEDEIROS, 2017; SOUZA, MARTINS & SILVA, 2023).

Estudos realizados na região do Seridó potiguar indicam que a combinação entre alta evaporação potencial e baixa precipitação anual resulta em déficits hídricos expressivos, com impactos diretos sobre a disponibilidade de água em açudes e reservatórios (MEDEIROS, 2017). De acordo com Gomes et al. (2020), a intensa radiação solar e a baixa umidade relativa do ar típicas da Caatinga favorecem o aumento do gradiente de pressão de vapor, intensificando o processo evaporativo.

No setor mineral, a água desempenha papel estratégico em diversas etapas do processo produtivo, especialmente no beneficiamento e na lixiviação de minérios, exigindo grandes volumes para transporte de polpa, separação de partículas e controle de poeira. A redução das perdas por evaporação, portanto, assume relevância não apenas ambiental, mas também operacional e econômica, ao diminuir a necessidade de captação adicional e os custos associados ao tratamento e bombeamento.

A literatura especializada classifica as técnicas de mitigação da evaporação em três grandes grupos: métodos físicos, químicos e biológicos, os quais diferem quanto aos mecanismos de atuação, eficiência, custos de implantação, requisitos de manutenção e impactos ambientais (OLIVEIRA et al., 2019; GADELHA et al., 2023). A compreensão dessas abordagens é fundamental para a seleção de soluções adequadas ao contexto específico de reservatórios utilizados em operações de mineração em regiões semiáridas.

2.1 Métodos de Redução da Evaporação

Os métodos de redução da evaporação têm como objetivo interferir nos processos físicos responsáveis pela transferência de massa e energia entre a superfície da água e a atmosfera. Esses processos incluem a absorção de radiação solar, o aquecimento da lâmina d'água, a ação do vento sobre a superfície e o gradiente de pressão de vapor, conforme descrito nos modelos clássicos de evaporação, como o de Penman (1948) e suas revisões posteriores (ALLEN et al., 1998). As técnicas disponíveis buscam atuar sobre um ou mais desses fatores, de forma isolada ou combinada, a fim de reduzir a taxa de evaporação e, conseqüentemente, preservar o volume armazenado.

2.1.1 Métodos Físicos

Os métodos físicos baseiam-se na utilização de barreiras mecânicas ou estruturas que reduzem a incidência direta da radiação solar e a ação do vento sobre a superfície da água. Entre as soluções mais difundidas destacam-se as coberturas flutuantes, as estruturas de

sombreamento e os sistemas fotovoltaicos flutuantes (OLIVEIRA et al., 2019; YOUSSEF & KHODZINSKAYA, 2019).

As coberturas flutuantes consistem na disposição de elementos sobre a lâmina d'água, como esferas plásticas, módulos poliméricos ou placas leves, formando uma camada que atua como escudo contra a radiação solar e diminui o contato direto do vento com a superfície. De acordo com Bakhtiar et al. (2022), esse tipo de cobertura pode reduzir significativamente a evaporação, além de influenciar parâmetros físicos, químicos e biológicos da água. Ribeiro et al. (2024) observaram reduções expressivas da evaporação em pequenos reservatórios do semiárido brasileiro com diferentes tipos de coberturas físicas, evidenciando o potencial dessa técnica em contextos de escassez hídrica.

Outra alternativa é o uso de materiais recicláveis flutuantes, como garrafas PET, que têm sido investigados como solução de baixo custo e fácil implementação. Gadelha et al. (2023) destacam que a disposição de materiais flutuantes sobre a superfície da água promove sombreamento parcial e reduz a troca de calor entre a água e a atmosfera, contribuindo para a diminuição da taxa de evaporação. Ensaio experimentais relatados por Ribeiro et al. (2024) indicam que a eficiência dessa técnica varia conforme o tipo de material, a cor e o grau de cobertura, sendo mais elevada quando se utilizam materiais com maior capacidade de reflexão e isolamento térmico.

Os sistemas fotovoltaicos flutuantes representam uma solução híbrida que associa a geração de energia elétrica à mitigação da evaporação. A instalação de painéis solares sobre reservatórios cria uma barreira física que bloqueia parte significativa da radiação solar incidente, reduzindo o aquecimento da lâmina d'água e, conseqüentemente, a evaporação (YOUSSEF & KHODZINSKAYA, 2019). Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2021), além da conservação hídrica, esses sistemas permitem o aproveitamento de áreas aquáticas sem competição com o uso do solo, sendo especialmente atrativos em regiões com alta incidência solar.

Lopes, Freitas e Branco (2020) ressaltam que os sistemas fotovoltaicos flutuantes podem contribuir simultaneamente para a segurança hídrica e energética no semiárido brasileiro, integrando o nexo água-energia. A Revista Pesquisa FAPESP (s.d.) destaca experiências piloto no Brasil, como na Represa Billings e em Itaipu, evidenciando o interesse crescente nessa tecnologia. Apesar dos benefícios, essa alternativa apresenta custo inicial elevado e maior complexidade de implantação, sendo mais indicada para reservatórios de

pequeno a médio porte ou para locais onde o aproveitamento energético justifique o investimento.

De modo geral, os métodos físicos apresentam elevada eficiência na redução da evaporação, porém podem demandar investimentos significativos e manutenção periódica, especialmente em ambientes sujeitos a ventos fortes e variações no nível da água (OLIVEIRA et al., 2019; GADELHA et al., 2023).

2.1.2 Métodos Químicos: Filmes Monomoleculares de Álcoois Graxos

Os métodos químicos de redução da evaporação fundamentam-se na aplicação de substâncias capazes de formar uma película contínua sobre a superfície da água, atuando como barreira à difusão de vapor para a atmosfera. Entre essas abordagens, destacam-se os filmes monomoleculares de álcoois graxos de cadeia longa, amplamente estudados na literatura científica e empregados em diferentes contextos experimentais e operacionais (CRAIG, 2004; HAN et al., 2021).

Os álcoois graxos, como o álcool cetílico (hexadecanol, $C_{16}H_{34}O$) e o álcool estearílico (octadecanol, $C_{18}H_{38}O$), apresentam estrutura anfifílica, composta por uma extremidade hidrofílica (grupo hidroxila $-OH$) e uma longa cadeia carbônica hidrofóbica. Quando aplicadas sobre a superfície da água, essas moléculas se orientam espontaneamente na interface líquido-ar, com o grupo hidroxila interagindo com a água por meio de ligações de hidrogênio e a cadeia carbônica voltada para a atmosfera, formando uma camada com espessura de uma única molécula, denominada filme monomolecular (CRAIG, 2004).

Essa monocamada atua como uma barreira físico-química que dificulta a migração das moléculas de água para a fase gasosa, reduzindo o fluxo difusivo e o gradiente de pressão de vapor na interface água-ar. Han et al. (2021) demonstraram, em condições de campo, reduções significativas da evaporação com o uso de monocamadas de álcoois graxos, evidenciando a eficácia da técnica sob diferentes regimes climáticos.

No contexto brasileiro, Agostinho (2007) avaliou a aplicação de hexadecanol em tanques experimentais de 20 m², ao longo de três anos, no estado do Ceará, observando redução média de aproximadamente 40% na evaporação em relação aos tanques controle, sem alterações significativas em parâmetros como pH, condutividade elétrica e salinidade da água. O autor também não identificou impactos relevantes sobre a biota aquática, registrando apenas discreto aumento na temperatura superficial da água.

Resultados semelhantes foram observados em estudos internacionais. Panjabi, Rudra & Goel (2016), em experimento conduzido no reservatório Aji, na Índia, reportaram redução média de 19% na evaporação com o uso de misturas de álcool cetílico e estearílico. Esses resultados corroboram a aplicabilidade da técnica em reservatórios de diferentes portes e condições climáticas.

Do ponto de vista operacional, os filmes monomoleculares podem ser aplicados na forma de pó fino, emulsão aquosa ou formulações comerciais prontas. Produtos como o WaterSavr, desenvolvido pela Flexible Solutions International Inc. (2023), têm sido utilizados em reservatórios de irrigação e abastecimento, com reduções médias de 20% a 30% da evaporação em aplicações de campo. A literatura indica dosagens típicas da ordem de 1 a 2 mg/m², com reaplicações periódicas, uma vez que o filme é degradado por ação do vento, da radiação solar e de processos biológicos (HAN et al., 2021).

No contexto da mineração em regiões semiáridas, a utilização de álcoois graxos apresenta potencial relevante, uma vez que não altera significativamente o pH da água e não interfere diretamente nos processos de dissolução de metais (AGOSTINHO, 2007; KALIUM CHEMICAL, 2025). Entretanto, devem ser consideradas limitações como a sensibilidade do filme à ação de ventos fortes e chuvas intensas, a necessidade de reaplicação frequente e a possível interferência na difusão de gases em corpos d'água de pequeno porte. Em sistemas industriais, recomenda-se a realização de ensaios em escala piloto para avaliar a compatibilidade do filme com os parâmetros físico-químicos específicos do processo, especialmente em ambientes de recirculação e lixiviação.

De forma geral, os filmes monomoleculares de álcoois graxos constituem uma técnica quimicamente simples, ambientalmente segura e tecnicamente comprovada para a mitigação da evaporação, podendo ser considerados como alternativa ou complemento a métodos físicos e biológicos, sobretudo em regiões caracterizadas por elevada insolação e déficit hídrico, como o semiárido brasileiro (OLIVEIRA et al., 2019; SOUZA, MARTINS & SILVA, 2023).

2.1.3 Métodos Biológicos

Os métodos biológicos de redução da evaporação baseiam-se na utilização de elementos naturais para modificar as condições microclimáticas sobre a superfície da água, atuando principalmente na redução da incidência de radiação solar e da velocidade do vento. Entre as principais abordagens destacam-se o uso de plantas aquáticas flutuantes e a implantação de barreiras vegetais no entorno dos reservatórios (OLIVEIRA et al., 2019).

As plantas aquáticas flutuantes, como espécies dos gêneros *Lemna* e *Nymphaea*, formam uma cobertura parcial sobre a lâmina d'água, refletindo parte da radiação solar e reduzindo o aquecimento da superfície. No entanto, sua eficiência na redução da evaporação é limitada e pode ser acompanhada por efeitos indesejáveis, como a diminuição da oxigenação da água, a alteração da qualidade físico-química e o comprometimento do equilíbrio ecológico do reservatório (BAKHTIAR et al., 2022).

As barreiras vegetais quebra-vento consistem no plantio de árvores e arbustos ao redor dos reservatórios, formando cortinas que reduzem a velocidade do vento sobre a superfície da água. Estudos demonstram que a redução da velocidade do vento pode resultar em diminuição mensurável da taxa de evaporação, dependendo da altura, densidade e porosidade da barreira (PJOES, 2019; YOUSSEF & KHODZINSKAYA, 2019). Gomes et al. (2020) destacam que espécies adaptadas ao semiárido, como jurema-preta (*Mimosa tenuiflora*), juazeiro (*Ziziphus joazeiro*) e catingueira (*Poincianella bracteosa*), apresentam bom desempenho em condições de estresse hídrico, sendo indicadas para a formação de cortinas vegetais na Caatinga.

Do ponto de vista ecológico, Brito & Dias (2015), Maia et al. (2011) e Rodrigues (2021) ressaltam a importância dessas espécies na manutenção da biodiversidade e na recuperação de áreas degradadas, o que agrega valor ambiental à técnica. Silva et al. (2019) apontam ainda que essas plantas apresentam características químicas e fisiológicas que favorecem sua adaptação a ambientes semiáridos.

Além da redução das perdas hídricas, as barreiras vegetais oferecem benefícios adicionais, como controle de erosão, abrigo para fauna, melhoria da paisagem e criação de microclimas mais amenos. Entretanto, apresentam limitações, como o tempo necessário para o estabelecimento das plantas, a dependência de irrigação inicial e a variabilidade de desempenho conforme as condições climáticas e a espécie utilizada (OLIVEIRA et al., 2019).

De modo geral, os métodos biológicos apresentam menor eficiência direta na redução da evaporação quando comparados aos métodos físicos e químicos, porém podem ser considerados como soluções complementares, especialmente em projetos que buscam integrar conservação hídrica e recuperação ambiental em áreas de mineração (GADELHA et al., 2023; SOUZA, MARTINS & SILVA, 2023).

3 METODOLOGIA

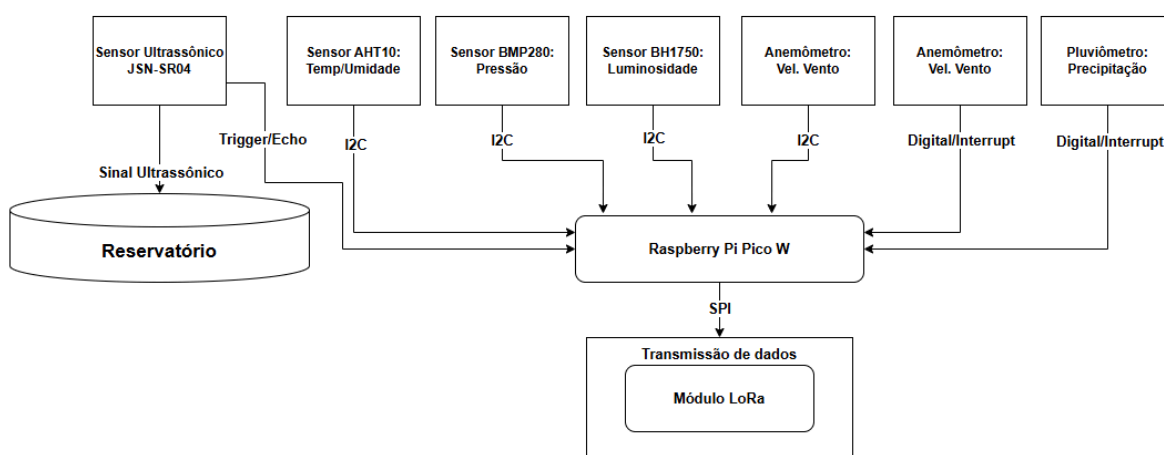
A presente pesquisa adota uma abordagem experimental de caráter prospectivo e tecnológico, com o objetivo de investigar a viabilidade técnica da redução da taxa de

evaporação em reservatórios associados a operações de mineração, particularmente em contextos de elevada insolação e escassez hídrica. O estudo é estruturado de forma a integrar fundamentos da físico-química de interfaces, instrumentação ambiental e sistemas embarcados para monitoramento contínuo de variáveis climáticas, conforme abordagens consolidadas na literatura sobre mitigação da evaporação em corpos hídricos a céu aberto (BARNES, 1986; MCJANNET et al., 2008).

3.1 Sistema de Monitoramento e Telemetria Ambiental

Para permitir a avaliação do comportamento do sistema e a correlação entre variáveis ambientais e evaporação, está previsto o desenvolvimento de uma estação meteorológica de baixo custo, baseada na plataforma BitDogLab e no microcontrolador Raspberry Pi Pico W. A escolha dessa plataforma considera sua capacidade de processamento, conectividade sem fio integrada e baixo consumo energético, características adequadas para aplicações de monitoramento contínuo em ambientes remotos.

Figura 1 - Arquitetura do Sistema.



Fonte: Autores (2026).

O sistema foi concebido de forma modular, possibilitando a calibração individual dos sensores e futuras expansões da arquitetura.

3.1.1 Variáveis ambientais monitoradas

O conjunto de sensores selecionado permite o monitoramento das principais variáveis associadas ao processo de evaporação:

- **Temperatura e umidade relativa do ar:** AHT10;
- **Pressão atmosférica:** BMP280;
- **Intensidade luminosa:** BH1750;
- **Velocidade do vento:** medida por meio de um anemômetro de baixo custo, desenvolvido a partir de técnicas de manufatura aditiva e do reaproveitamento de componentes mecânicos e digitais, conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2 - Anemômetro desenvolvido.



Fonte: Autores (2026).

- **Precipitação:** registrada por um pluviômetro digital do tipo *tipping bucket*, desenvolvido com componentes digitais e impressão 3D.

Essas variáveis permitem caracterizar o ambiente atmosférico e estabelecer correlações com o comportamento esperado da evaporação superficial.

3.1.2 Medição da variação do nível da água

A variação do nível da água será monitorada por meio de um sensor ultrassônico JSN-SR04T, instalado de forma fixa e orientado para a superfície do reservatório. A resolução milimétrica do sensor permite detectar pequenas variações de nível ao longo do tempo, as quais poderão ser associadas à evaporação após a devida correção por eventos pluviométricos.

3.1.3 Aquisição e tratamento de dados

Os dados coletados pelos sensores serão processados localmente pelo microcontrolador e transmitidos via LoRa. Essa arquitetura possibilita tanto o acompanhamento contínuo das variáveis quanto a posterior análise temporal dos dados, fornecendo suporte à avaliação do comportamento do sistema em diferentes condições ambientais.

3.2. Implementação da Barreira Química (Monocamadas de Langmuir)

A solução proposta baseia-se na formação de uma monocamada de Langmuir, caracterizada como um filme interfacial de espessura molecular, formado por substâncias anfífilas organizadas na interface ar-água, técnica amplamente estudada como método de redução da evaporação superficial (BARNES, 1986; MCJANNET et al., 2008).

3.2.1 Seleção dos reagentes

Para a formação da monocamada, está prevista a utilização de álcoois graxos de cadeia longa, especificamente:

- Hexadecanol (álcool cetílico, $C_{16}H_{34}O$)
- Octadecanol (álcool estearílico, $C_{18}H_{38}O$)

A seleção desses compostos baseia-se em propriedades amplamente documentadas na literatura, tais como baixa solubilidade em água, elevada estabilidade interfacial e capacidade de formar monocamadas compactas e relativamente resistentes à perturbação ambiental (BARNES, 1986; MCJANNET et al., 2008). Adicionalmente, esses álcoois apresentam características favoráveis do ponto de vista ambiental e sanitário, incluindo biodegradabilidade e ausência de efeitos adversos relevantes à saúde humana em concentrações típicas de aplicação superficial (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2003).

3.2.2 Estratégia de aplicação superficial

A metodologia prevê a aplicação dos álcoois graxos por meio de um sistema de dispersão superficial controlada, projetado para promover uma distribuição homogênea do reagente sobre a superfície do reservatório. O material deverá ser aplicado em estado fundido ou disperso, conforme as condições operacionais, permitindo sua rápida espalhabilidade e reorganização molecular na interface, conforme práticas descritas em estudos de campo sobre monocamadas evaporativas (MCJANNET et al., 2008).

A taxa de aplicação será definida com base em valores reportados na literatura técnica, situando-se na ordem de grandeza de $0,3 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{dia}^{-1}$, podendo ser ajustada em função das condições meteorológicas locais, tais como intensidade do vento e temperatura ambiente (MCJANNET et al., 2008). Reaplicações periódicas são consideradas no planejamento metodológico, de modo a compensar perdas decorrentes de degradação natural ou de perturbações superficiais, fenômenos recorrentes em reservatórios a céu aberto (BARNES, 1986).

3.2.3 Mecanismo de ação proposto

O processo de evaporação da água pode ser descrito como uma sequência de etapas que envolvem a difusão das moléculas a partir do volume do líquido até a interface e, subsequentemente, sua transição para a fase gasosa. A presença da monocamada introduz uma barreira adicional ao transporte de massa, exigindo que a molécula de água atravesse uma camada insolúvel antes de atingir a atmosfera (BARNES, 1986).

Essa etapa adicional implica um aumento da energia de ativação efetiva do processo de evaporação, o que, em termos estatísticos, tende a reduzir a frequência de eventos de transição de fase. Como resultado esperado, projeta-se uma diminuição mensurável da taxa de evaporação, em consonância com modelos físico-químicos e observações experimentais reportadas na literatura especializada (BARNES, 1986; MCJANNET et al., 2008).

3.2.4 Critério de desempenho esperado

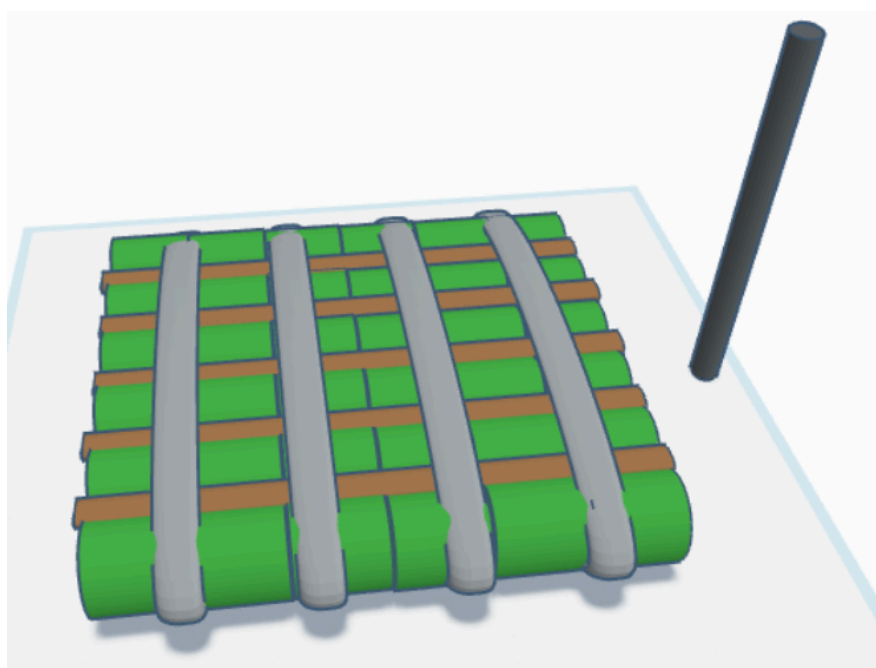
Com base em estudos previamente reportados, a metodologia adota como referência de desempenho uma redução da taxa de evaporação da ordem de 25%, valor considerado conservador e compatível com condições reais de reservatórios a céu aberto (MCJANNET et

al., 2008). Esse parâmetro não representa um resultado experimental, mas sim um critério de avaliação para análises futuras da viabilidade da técnica proposta.

3.3 Metodologia de Implantação da Cobertura Flutuante com Garrafas PET

A metodologia proposta baseia-se na implantação de uma cobertura flutuante modular, composta por garrafas PET recicladas, distribuídas parcialmente sobre a lâmina d'água do reservatório. O objetivo é reduzir a evaporação por meio do sombreamento superficial e do isolamento térmico, mantendo a funcionalidade ecológica do corpo hídrico, um exemplo do módulo é apresentado na Figura 3.

Figura 3 - Módulo PET



Fonte: Autores (2026).

A Figura 3 detalha a representação tridimensional do módulo de cobertura flutuante desenvolvido a partir de garrafas PET recicladas. Observa-se a disposição organizada das garrafas, representadas em verde, alinhadas lado a lado e posicionadas horizontalmente, formando a base flutuante responsável pelo sombreamento da lâmina d'água.

As estruturas em marrom correspondem aos elementos de travamento e espaçamento, responsáveis por manter o alinhamento das garrafas e distribuir uniformemente os esforços mecânicos ao longo do módulo. Já os componentes em cinza representam as tiras de

contenção, que exercem a função de fixação do conjunto, garantindo estabilidade estrutural e prevenindo deslocamentos laterais das garrafas durante a ação do vento ou de pequenas correntes superficiais.

À direita da figura é apresentado um elemento cilíndrico vertical, que representa a barra de contenção ou ancoragem, utilizada para reforço estrutural do módulo e possível fixação ao sistema periférico do reservatório. Esse componente contribui para a integridade do conjunto e facilita a organização modular da cobertura flutuante.

3.3.1 Preparação e Tratamento do Material:

Após a coleta, as garrafas PET passam por um processo padronizado de preparação, composto pelas seguintes etapas:

1. Lavagem e higienização, com remoção de resíduos internos, rótulos e impurezas;
2. Inserção de tiras de papelão reciclado no interior das garrafas, atuando como isolante térmico e reduzindo a transferência de calor para a superfície da água;
3. Vedação hermética com tampas originais ou reaproveitadas, garantindo estanqueidade, durabilidade e flutuabilidade.

As garrafas preparadas são armazenadas temporariamente em local coberto, seco e ventilado, até o transporte para o reservatório.

3.3.2 Dimensionamento e Quantidade de Material

Considerando as seguintes dimensões para garrafa PET de 2 litros deitada:

- Comprimento (L): 30 cm
- Diâmetro (D): 10 cm

Sua área ocupada na superfície de um reservatório seria aproximadamente:

$$30 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} = 300 \text{ cm}^2 = 0,03 \text{ m}^2$$

Logo, para cobrir 1.000 m² com garrafas PET deitadas em arranjo de grade, seriam necessárias cerca de 33.334 garrafas, entretanto, a cobertura desejada para maior eficiência é de apenas 85% da superfície do reservatório, equilibrando eficiência na redução da

evaporação com a necessidade de trocas gasosas e circulação natural da água. Nesse caso o valor para 1.000 m² é reduzido para aproximadamente 28.334 garrafas.

3.3.3 Implantação da Cobertura no Reservatório

A implantação da cobertura flutuante no reservatório será realizada de forma gradual e controlada, visando garantir a eficiência do sistema e a segurança operacional. Inicialmente, as garrafas PET serão distribuídas de maneira uniforme sobre a lâmina d'água, evitando aglomerações que possam comprometer a estabilidade da cobertura.

Em seguida, as garrafas serão organizadas em módulos previamente identificados, possibilitando o rastreamento, a inspeção periódica e a realização de manutenções de forma sistemática. A densidade da cobertura será ajustada de modo a atingir aproximadamente 85% da superfície do reservatório, valor considerado ideal para maximizar a redução da evaporação.

Quando necessário, será realizada a instalação de contenção periférica, utilizando cordas, redes flutuantes ou estruturas modulares, especialmente em áreas sujeitas à ação do vento ou correntes superficiais. Por fim, serão mantidas áreas parcialmente descobertas, assegurando as trocas gasosas, a circulação natural da água e a preservação do equilíbrio ecológico do ambiente aquático.

3.3.4 Monitoramento e Avaliação de Desempenho

Após a implantação, será adotado um plano de monitoramento contínuo com o objetivo de avaliar a eficiência e a durabilidade do sistema. Esse monitoramento contemplará a análise da taxa de evaporação, por meio da comparação entre áreas cobertas e áreas de controle sem cobertura. Também serão realizadas medições periódicas da temperatura superficial da água ao longo do ano, a fim de verificar o efeito do sombreamento proporcionado pela cobertura flutuante.

A integridade estrutural do sistema será acompanhada por meio de inspeções visuais regulares, visando identificar garrafas danificadas, submersas ou deslocadas. Além disso, será efetuada uma avaliação de custo-benefício, considerando a economia de água obtida em relação aos custos de implantação e manutenção do sistema. Os dados coletados serão organizados em relatórios técnicos periódicos, possibilitando ajustes operacionais e a validação da metodologia sob diferentes condições climáticas.

A metodologia proposta apresenta como principais diferenciais o baixo custo de implantação, decorrente do uso de materiais amplamente disponíveis e de fácil obtenção, bem como o emprego exclusivo de materiais recicláveis, o que reforça seu caráter sustentável e ambientalmente responsável. Destaca-se ainda a facilidade de replicação e escalabilidade do sistema, permitindo sua aplicação tanto em reservatórios de pequena escala quanto em açudes e barragens de maiores dimensões, sem a necessidade de adaptações estruturais complexas.

Além disso, a metodologia mostra-se compatível com diferentes configurações e tamanhos de reservatórios, mantendo sua eficiência operacional. Por fim, estudos experimentais reportados na literatura indicam que soluções baseadas em coberturas flutuantes podem reduzir a evaporação em até 53,28%, evidenciando o elevado potencial da metodologia proposta para mitigação de perdas hídricas em regiões semiáridas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na etapa inicial do estudo, foram consideradas, de forma preliminar, variáveis meteorológicas como temperatura do ar, umidade relativa, pressão atmosférica e radiação solar, com o objetivo de contextualizar o ambiente climático ao qual o sistema experimental virá a ser submetido. Essa análise não se baseia em medições realizadas pelo protótipo, mas em informações de referência amplamente descritas na literatura para regiões semiáridas.

De modo geral, essas condições são caracterizadas pela predominância de elevadas temperaturas, baixos índices de umidade relativa e intensa incidência de radiação solar ao longo do dia, em conformidade com os cenários apresentados por Medeiros (2017) e Gomes et al. (2020) para o semiárido potiguar. Dessa forma, o ambiente de implantação do sistema mostra-se representativo das condições reais enfrentadas por reservatórios a céu aberto utilizados em atividades minerárias na região.

A partir dessa contextualização climática, deu-se início à etapa experimental propriamente dita, na qual o sistema desenvolvido passou a realizar a aquisição contínua de dados ambientais em campo. A Figura 4 apresenta os dados coletados pela estação meteorológica e disponibilizados na plataforma ThingSpeak, evidenciando a variação temporal das grandezas ambientais monitoradas, tais como temperatura, evaporação, velocidade do vento, umidade relativa, pressão atmosférica, irradiação solar, precipitação e altitude estimada. Os dados são captados continuamente por sensores integrados ao sistema embarcado, processados pelo microcontrolador e transmitidos via rede para a nuvem, onde são armazenados e visualizados em tempo real. Observa-se que as medições apresentam

comportamento coerente e variações suaves ao longo do intervalo analisado, indicando estabilidade no processo de aquisição e comunicação dos dados.

Figura 4 - Dados no ThingSpeak



Fonte: Autores (2026).

Esses resultados iniciais subsidiam a etapa posterior de validação do sistema, na qual as medições obtidas serão comparadas com bases de dados consolidadas, em especial com os registros disponibilizados pelo Instituto de Meteorologia do Rio Grande do Norte (EMPARN). Embora a estação de referência não esteja localizada exatamente na mesma região de instalação do protótipo, trata-se de uma área geograficamente próxima e pertencente à mesma região climática, o que permite a realização de uma extrapolação dos parâmetros ambientais para fins de validação. Adicionalmente, a empresa parceira dispõe de uma estação meteorológica própria, cujos dados, apesar de apresentarem acesso intermitente, também serão utilizados como fonte complementar para a comparação e avaliação da precisão e confiabilidade da estação desenvolvida.

4.2 Desempenho do Sistema de Monitoramento e Confiabilidade dos Dados

O sistema de monitoramento baseado na plataforma BitDogLab com o microcontrolador Raspberry Pi Pico W apresentou comportamento estável durante o período

de coleta. Os sensores AHT10 e BMP280 forneceram leituras consistentes de temperatura, umidade relativa e pressão atmosférica, com variações coerentes com o ciclo diurno esperado para a região.

O pluviômetro do tipo tipping bucket, desenvolvido por meio de manufatura aditiva baseando-se no modelo de Giovanni (2022) com algumas modificações autorais, utilizou um sistema de detecção baseado em sensor de efeito Hall acoplado a ímã permanente, permitindo a identificação precisa de cada basculamento da caçamba. Esse arranjo possibilitou a conversão do número de pulsos magnéticos em volume de precipitação acumulada, garantindo resolução adequada para eventos de chuva de baixa intensidade.

Os testes iniciais indicaram boa sensibilidade do sistema, com capacidade de detectar precipitações fracas e intermitentes, características do regime pluviométrico da região. Embora o sistema artesanal exija calibração periódica para correção do volume por basculamento, os dados obtidos mostraram-se consistentes e adequados para a finalidade de correção do balanço hídrico no experimento, permitindo distinguir de forma confiável os aportes de chuva das perdas efetivas por evaporação.

Figura 5 - Pluviômetro do tipo tipping bucket desenvolvido no projeto



Fonte: Autores (2026).

De modo geral, o conjunto de sensores apresentou desempenho satisfatório para a aplicação proposta, validando a viabilidade de utilização de instrumentação de baixo custo em

estudos experimentais de evaporação, conforme também observado em trabalhos similares na literatura (SOUZA, MARTINS & SILVA, 2023).

4.3 Avaliação da Taxa de Evaporação em Condições de Controle

Após aplicação dos métodos de redução da evaporação, pretende-se realizar o monitoramento da perda de água em três condições de controle distintas para fins de comparação de eficiência e funcionalidade do sistema: um em reservatório sem cobertura, outro em reservatório com cobertura química e um último monitoramento em reservatório contendo cobertura física. Ao fim do experimento, espera-se obter valores compatíveis com os intervalos relatados para reservatórios de pequeno porte em regiões semiáridas (RIBEIRO et al., 2024).

Espera-se, assim, poder observar com clareza a correlação direta entre aumento da radiação solar e incremento da taxa de evaporação, especialmente no período entre o final da manhã e o início da tarde, além também da influência causada por dias com maior velocidade do vento, evidenciando a contribuição do termo aerodinâmico no processo evaporativo, conforme previsto na equação de Penman (1948) e em suas revisões (ALLEN et al., 1998).

5 CONCLUSÃO/CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise desenvolvida ao longo deste trabalho evidencia que o controle da evaporação em reservatórios a céu aberto empregados no processamento de ouro desempenha papel relevante na eficiência operacional e na gestão do uso da água em empreendimentos minerários. A abordagem adotada permite compreender como as perdas hídricas associadas à evaporação influenciam diretamente o desempenho do sistema de recirculação, reforçando a necessidade de estratégias específicas voltadas a esse fenômeno.

As técnicas físicas de mitigação da evaporação analisadas mostram-se compatíveis com as demandas operacionais do setor mineral, sobretudo quando consideradas alternativas de menor custo e de implementação simplificada. A avaliação dessas soluções indica que sua adoção pode reduzir a dependência de reposição hídrica externa, contribuindo para a racionalização do uso da água e para a melhoria da eficiência técnica e econômica do processo produtivo, sem comprometer as condições operacionais do empreendimento.

Ao reunir e sistematizar diferentes abordagens aplicáveis ao controle da evaporação em reservatórios industriais, o estudo amplia a compreensão sobre o desempenho dessas técnicas em contextos operacionais reais. Os resultados obtidos oferecem subsídios técnicos

que podem orientar decisões relacionadas ao planejamento e à gestão hídrica em operações de mineração de ouro, especialmente em ambientes caracterizados por condições climáticas favoráveis ao aumento das taxas de evaporação.

Cabe destacar que as análises apresentadas incluem resultados experimentais iniciais, associados a dados de monitoramento ambiental, os quais ainda se encontram em fase de ampliação e consolidação, o que limita a extrapolação dos resultados para todas as condições operacionais possíveis. Nesse sentido, a realização de estudos experimentais em escala real, bem como o acompanhamento do desempenho dessas técnicas ao longo do tempo, pode aprofundar a compreensão de seus efeitos e ampliar sua aplicabilidade. Investigações futuras que incorporem variáveis climáticas, operacionais e econômicas de forma integrada tendem a fortalecer o embasamento técnico para a adoção dessas soluções no setor mineral.

REFERÊNCIAS

AGGIUSTATUTTO, Giovanni. *DIY Arduino Rain Gauge: 12 Steps (with Pictures)*. Instructables, s.d. Disponível em: <https://www.instructables.com/DIY-Arduino-Rain-Gauge/>. Acesso em: 30 jan. 2026.

AGOSTINHO, L. L. F. **Redução da evaporação em tanques de 20 m² por filmes monomoleculares de hexadecanol e suas influências na qualidade da água**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2007. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/16851/1/2007_dis_llfagostinho.pdf. Acesso em: 17 nov. 2025.

ALLEN, Richard G.; PEREIRA, Luis S.; RAES, Dirk; SMITH, Martin. **Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements**. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Rome: FAO, 1998. Disponível em: <http://www.fao.org/3/X0490E/x0490e00.html>. Acesso em: 21 jul. 2025.

AUTORES do projeto. **Módulo-GarrafasPET**. Tinkercad, 2025. Disponível em: <https://www.tinkercad.com/things/1MwVDBVOxzh-modulos-garrafaspet> . Acesso em: 20 out. 2025.

BAKHTIAR, M. et al. **Effects of floating covers used for evaporation suppression on reservoir physical, chemical and biological water quality parameters**. Ecohydrology, v. 15, n. 8, 2022. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/eco.2470>. Acesso em: 17 nov. 2025.

BARNES, G. T. **The effects of monolayers on the evaporation of water**. Advances in Colloid and Interface Science, Amsterdam, v. 25, 1986. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0001868686800029>. Acesso em: 17 nov. 2025.

BRITO, G. R.; DIAS, G. S. **Manejo e Ecologia da Catingueira**. Campina Grande: Embrapa Algodão, 2015.

CAVALCANTE, Leticia M. et al. **Avaliação de sustentabilidade da utilização de resíduos de garrafas PET enquanto material de construção**. Revista Brasileira de Energias Renováveis, Curitiba, v. 6, n. 5, p. 658-674, set./out. 2017. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10348/7901>. Acesso em: 19 out. 2025.

CHAI SUPAKITSIN, M.; CHAIRAT-UTAI, P.; JARUSIRIPOT, C. **Degradation of polyethylene terephthalate bottles after long sunlight exposure**. Songklanakarin Journal of Science and Technology, v. 41, n. 2, p. 259-264, 2019. Disponível em: <https://www.thaiscience.info/Journals/Article/SONG/10993239.pdf> . Acesso em: 03 nov. 2025.

CHEMICALBOOK. **Cetearyl alcohol - Product information**. [S. l.]: ChemicalBook, 2025. Disponível em: https://www.chemicalbook.com/ProductDetail_EN_1450864.htm. Acesso em: 17 nov. 2025.

CRAIG, V. S. J. **Monolayers at liquid-liquid interfaces**. Advances in Colloid and Interface Science, Amsterdam, v. 108-109, 2004. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0001868603001154>. Acesso em: 17 nov. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Expansão da geração solar fotovoltaica flutuante: aspectos tecnológicos e ambientais relevantes ao planejamento**. Rio de Janeiro: EPE, 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/nota-tecnica-solar-fotovoltaica-flutuante/>. Acesso em: 20 jul. 2025.

FLEXIBLE SOLUTIONS INTERNATIONAL INC. **WaterSavr — Technical Product Brochure**. Canadá, 2023. Disponível em: https://flexiblesolutions.com/wp-content/uploads/2023/02/WS_09_lowres.pdf. Acesso em: 17 nov. 2025.

GADELHA, Eduardo Maurício et al. **Soluções técnicas para redução da evaporação de água em açudes e pequenas barragens**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 2023, Curitiba. Anais [...]. Curitiba: ABRHidro, 2023. Disponível em: <https://files.abrhidro.org.br/Eventos/Trabalhos/60/PAP022310.pdf>. Acesso em: 21 jul. 2025.

GOMES, L. J. et al. **O Clima e as Plantas**. Campina Grande: Embrapa Algodão, 2020. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1153788/1/O-Clima-e-as-plantas-2020.pdf> . Acesso em: 21 jul. 2025.

GOK, A.; FAGERHOLM, C. L.; GORDON, D. A.; BRUCKMAN, L. S.; FRENCH, R. H. **Degradation of poly(ethylene terephthalate) under accelerated weathering exposures**. In: IEEE Photovoltaic Specialist Conference, 42., 2015, New Orleans. Anais [...]. New Orleans:

IEEE, 2015. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7355601>. Acesso em: 02 nov. 2025.

GONÇALVES, Edkeyse Dias et al. **Análise experimental e custos de telhados verdes comerciais e fabricados com garrafas PET para redução de cheias urbanas na Amazônia**. *Mix Sustentável*, Florianópolis, v. 7, n. 2, p. 57-66, abr. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.29183/2447-3073.MIX2021.v7.n2.57-66>. Acesso em: 18 out. 2025.

HAN, Y.; SONG, Y.; FU, J.; et al. **Reduction of water evaporation by using fatty alcohol monolayers under field conditions**. *Agricultural Water Management*, Amsterdam, v. 249, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378377421001200>. Acesso em: 17 nov. 2025.

KALIUM CHEMICAL. **Ficha de Segurança - Álcool Cetílico**. 2025. Disponível em: <https://kaliumchemical.com.br/>. Acesso em: 17 nov. 2025.

LOPES, M. P. C.; FREITAS, M. A. V.; BRANCO, D. A. C. **Water-energy nexus: Floating photovoltaic systems promoting water security and energy generation in the semiarid region of Brazil**. *Journal of Cleaner Production*, v. 276, 122057, 2020. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.122057.

MAIA, G. F. et al. **Juazeiro: um ícone da Caatinga**. Brasília: Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia, 2011.

MCJANNET, D.; COOK, F. J.; BURN, S. **Evaporation reduction by monolayers: overview, modelling and effectiveness**. Technical Report. Queensland: Urban Water Security Research Alliance, 2008. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/235711983>. Acesso em: 21 out. 2025.

MEDEIROS, Andréia Dias de. **Análise da gestão das águas de reservatórios no Seridó do estado do Rio Grande do Norte**. 2017. 101 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências Exatas e da Natureza, Programa de Pós-Graduação em Geografia, João Pessoa, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/19092>. Acesso em: 13 jan. 2026.

OLIVEIRA, Paulo Abrantes de; CURI, Rosires Catão; SANTOS, Valterlin da Silva; ABRANTES, Georgia Graziela Aragão de. **Técnicas modernas para a redução da evaporação em reservatórios de água em regiões semiáridas**. *RIMA - Revista Interdisciplinar e do Meio Ambiente*, v. 1, n. 1, 2019. DOI: 10.52664/rima.v1.n1.2019.e1. Acesso em: 13 jan. 2026.

PANJABI, K.; RUDRA, R.; GOEL, P. **Evaporation retardation by monomolecular layers: an experimental study at the Aji Reservoir (India)**. *Open Journal of Civil Engineering*, v. 6, n. 3, 2016. Disponível em: <https://www.scirp.org/journal/paperinformation.aspx?paperid=71133>. Acesso em: 17 nov. 2025.

PENMAN, H. L. **Natural evaporation from open water, bare soil and grass**. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, v. 193, n. 1032, p. 120-145, 1948.

PJOES. **Using Windbreaks for Decreasing Lake and Reservoir Evaporation: A Case Study from Iran.** Polish Journal of Environmental Studies, v. 28, n. 4, p. 1-10, 2019. Disponível em: <https://www.pjoes.com/Using-Windbreaks-for-Decreasing-Lake-and-Reservoir-Evaporation-nA-Case-Study-from,89984,0,2.html>. Acesso em: 21 jul. 2025.

RIBEIRO, F. M. et al. **Evaporação em pequenos reservatórios, com diferentes coberturas, na região do Semiárido brasileiro.** ResearchGate, 2024. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/380901414_Evaporacao_em_pequenos_reservatorio_s_com_diferentes_coberturas_na_regiao_do_Semiarido_brasileiro. Acesso em: 21 jul. 2025.

REVISTA PESQUISA FAPESP. **Usinas solares flutuantes.** s.d. Disponível em: <https://revistapesquisa.fapesp.br/usinas-solares-flutuantes/>. Acesso em: 21 jul. 2025.

RODRIGUES, A. A. M. **Crescimento e produtividade da Mimosa tenuiflora (Willd.) Poir. (jurema-preta) em plantios homogêneos aos 7 anos de idade.** 2021. Repositório Institucional da UFRN. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/>. Acesso em: 21 jul. 2025.

ROSTAMPOUR, S.; COOK, R.; JHANG, S. S.; LI, Y.; FAN, C.; SUNG, L. P. **Changes in the chemical composition of polyethylene terephthalate under UV radiation in various environmental conditions.** Preprint. Research Square, 2024. Disponível em: <https://www.researchsquare.com/article/rs-4402725/v1>. Acesso em: 02 nov. 2025.

SILVA, N. P. et al. **Ziziphus joazeiro, a Saponin-Rich Brazilian Medicinal Plant: Pharmacognostic Characterization of Bark and Leaves.** ResearchGate, 2019.

SOUZA, J. P.; MARTINS, A. L.; SILVA, R. M. **Evaporação em reservatórios hídricos: uma revisão de métodos/técnicas empíricas.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 43, e209203, 2023.

TRINDADE, Roberto de Barros Emery; BARBOSA FILHO, Olavo. **Extração de ouro: princípios, tecnologia e meio ambiente.** Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2002. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/687>. Acesso em: 13 jan. 2026.

YOUSSEF, Y. W.; KHODZINSKAYA, A. **A review of evaporation reduction methods from water surfaces.** E3S Web of Conferences, v. 97, 2019. Disponível em: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2019/23/e3sconf_form2018_05044.pdf. Acesso em: 13 jan. 2026.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Cetyl and stearyl alcohols in drinking-water: background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality.** Geneva: WHO, 2003. Disponível em: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/75398>. Acesso em: 17 nov. 2025.