

Uma Arquitetura IoT com Agente de IA para Monitoramento da Qualidade da Água em Ambientes Amazônicos

Diogo Soares Moreira¹, Gabriel Toledano Feitosa², Rafael Castilho¹, Maicon Costa¹, Paulo Victor Fernandes de Melo¹, Pedro Barreto de Souza¹, Gilmara Santos¹, Edjair Mota¹

¹ Instituto de Computação – Universidade Federal do Amazonas (UFAM)
69077-000 – Manaus, AM – Brasil

¹{diogo.soares, rcc, maicon.costa, paulo.fernandes, pedro.souza, gilmara, edjair}@icomp.ufam.edu.br

²{gabriel.feitosa}@pop-am.rnp.br

Abstract. *This paper presents a low-cost, long-range IoT architecture for monitoring water quality in the Amazon, integrating sensor nodes with LoRa communication, a cloud database, and an LLM-based AI agent, grounded in Brazilian water quality standards. The architecture was validated in a field experiment at a lake at INPA - AM, with data collection on pH, temperature, turbidity, and TDS over three days, totaling 9,769 readings. Results demonstrated the operational feasibility of the system and the effectiveness of the AI agent in producing regulatory-grounded diagnostics and pedagogical recommendations aligned with SDGs 6 and 15.*

Resumo. *Este trabalho apresenta uma arquitetura IoT de baixo custo e longa distância para monitoramento da qualidade da água na Amazônia, integrando nós sensores com comunicação LoRa, banco em nuvem e um agente de IA baseado em LLM, fundamentado em normas brasileiras de qualidade da água. A arquitetura foi validada em experimento de campo, em lago no INPA - AM, com coleta de pH, temperatura, turbidez e TDS ao longo de três dias, totalizando 9.769 leituras. Os resultados demonstraram a viabilidade operacional do sistema e a efetividade do agente de IA na geração de diagnósticos regulatórios e recomendações pedagógicas alinhadas aos ODS 6 e 15.*

1. Introdução

Os corpos hídricos amazônicos sustentam atividades sociais e econômicas fundamentais, que abrangem o consumo humano, pesca, agricultura, preservação da fauna aquática e a manutenção do equilíbrio ecológico [de Souza et al. 2014]. No entanto, esses recursos enfrentam pressões crescentes decorrentes de poluição por fatores naturais e antrópicos, colocando em risco populações ribeirinhas e ecossistemas [Rico et al. 2021].

Ademais, a gestão eficaz dos recursos hídricos está diretamente alinhada aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) definidos pela Organização das Nações Unidas (ONU). O Brasil é signatário desses objetivos. Em particular, o ODS 6 (Água

Potável e Saneamento) e o ODS 15 (Vida Terrestre) orientam ações que assegurem a disponibilidade e a gestão sustentável da água e a proteção dos ecossistemas [Organização das Nações Unidas 2015]. Neste contexto, a tecnologia desempenha papel central na viabilização dessas metas. Ela oferece soluções inovadoras para monitoramento ambiental, gestão de recursos, desenvolvimento sustentável e apoio à tomada de decisões [Bran et al. 2024].

Métodos tradicionais de monitoramento da qualidade da água apresentam limitações operacionais, como coleta manual em campo, transporte de amostras e ausência de dados em tempo real, o que inviabiliza respostas ágeis e a construção de bases de dados contínuas e atualizadas [Das and Jain 2017]. Por outro lado, o avanço da Internet das Coisas (IoT – *Internet of Things*) oferece uma alternativa promissora. Essa abordagem permite a coleta automatizada e contínua de dados, de diversas fontes, por meio de sensores de baixo custo integrados a sistemas de comunicação sem fio [López-Vargas et al. 2020]. Entre as tecnologias de comunicação sem fio disponíveis para soluções IoT, o LoRa (*Long Range*) se destaca por combinar longo alcance, baixo consumo energético e custo reduzido de implantação. Essas características são particularmente adequadas a cenários como os encontrados na região da Amazônia [Moreira et al. 2025, Rodrigues et al. 2025].

Além disso, a Inteligência Artificial (IA) também emerge como uma camada complementar para a interpretabilidade e análise de dados. Modelos de Linguagem de Grande Escala (LLMs – *Large Language Models*), em particular, têm demonstrado capacidade de mesclar as análises de dados tradicionais (gráficas e estatísticas) com métricas para diagnósticos compreensíveis, recomendações de ações e conteúdo educativo sobre sustentabilidade [Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação and Centro de Gestão e Estudos Estratégicos 2025].

Neste cenário, este trabalho apresenta uma arquitetura IoT para monitoramento remoto da qualidade de corpos hídricos amazônicos. Ela integra quatro componentes principais: (i) nós sensores com microcontroladores para coleta de parâmetros físico-químicos; (ii) *gateway* de baixo custo para recepção e encaminhamento dos dados para a nuvem; (iii) armazenamento em nuvem; e (iv) agente de IA baseado em LLM com base de conhecimento em normas brasileiras de qualidade da água, disponibilizado por meio de aplicativo móvel. Por fim, a solução de extração de dados foi validada em experimento de campo no INPA - AM, com coleta de dados em ambiente de lago.

O restante deste artigo está organizado da seguinte forma. A Seção 2 apresenta os trabalhos relacionados. A Seção 3 descreve a arquitetura proposta e seus componentes. A Seção 4 detalha a metodologia de avaliação. As Seções 5 e 6 apresentam, respectivamente, os resultados e as conclusões.

2. Trabalhos Relacionados

O monitoramento da qualidade da água por meio de sistemas IoT tem sido objeto crescente de investigação na literatura, motivado pela Agenda ONU 2030 [Organização das Nações Unidas 2015], necessidade de soluções de baixo custo e operação remota.

2.1. Sistemass IoT para Monitoramento Hídrico e Ambiental

Plataformas de monitoramento IoT, em tempo real, e baseadas em sensores físico-químicos e transmissão via GSM/GPRS para servidores remotos, com visualização por aplicativo

móvel e emissão de alertas configuráveis tem sido previamente propostas [Monteiro 2020]. Embora demonstrem a viabilidade da solução, esta depende de infraestrutura de rede celular, que pode apresentar intermitência em regiões remotas, como as encontradas na Amazônia. De forma similar, trabalhos baseados em microcontroladores integrados a plataformas de nuvem para visualização de dados [Bentes et al. 2023] avançaram na construção de soluções de baixo custo, porém com foco restrito à coleta e exibição de dados.

No contexto de aplicações móveis estruturadas, é encontrado trabalhos na literatura que propõem o uso de aplicativos. O AquaStatistics, voltado à análise físico-química de água para piscicultura, por exemplo, foi construído como um aplicativo com inserção manual de dados [Oliveira et al. 2022]. Por outro lado, o sistema Qwater [de Araújo Gurgel et al. 2023] foca na interpretação da qualidade da água para irrigação, auxiliando na identificação de riscos de salinidade, problemas com infiltração, toxidez e problemas com o pH, através de indicadores visuais de cores, e a partir da inserção manual de dados, sem integração a sensores automáticos nem a modelos de IA para personalização nos mecanismos de análise de dados.

O LoRa tem se apresentado como alternativa promissora para comunicação de Sistemas IoT em longa distância e para monitoramento remoto, ao permitir o envio de dados entre dispositivos e um servidor centralizado, chamado *gateway*, com taxas que podem chegar a 21,9kb/s [Arratia et al. 2024]. Assim, o LoRa tem sido aplicado para contextos IoT ambientais, como aplicação para monitoramento de incêndios em florestas [Araújo 2024]. Por outro lado, é apresentado itens que impactam o uso apropriado do LoRa em ambientes remotos como temperatura, tempo de bateria dos dispositivos [Moraes et al. 2025] e altura das antenas dos dispositivos [Barbosa et al. 2024].

2.2. Inteligência Artificial Aplicada ao Monitoramento Ambiental

A aplicação de IA ao monitoramento ambiental tem avançado em diversas direções, desde modelos preditivos para qualidade da água até sistemas de alerta automático baseados em séries temporais [Panduman et al. 2024, Vivekanandan et al. 2025]. Além disso, o uso de LLMs para interpretação de dados ambientais representa uma tendência emergente, motivada pela capacidade desses modelos de produzir explicações em linguagem natural a partir de dados estruturados [Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação and Centro de Gestão e Estudos Estratégicos 2025], e efetivamente alinhado a área de **Meio ambiente, clima e sustentabilidade** do Plano Brasileiro de Inteligência Artificial (PBIA 2024-2028)¹.

Contudo, ainda é apresentado como desafio e limitação a disponibilidade de dados ambientais confiáveis para treinamento de IA, gerando predição não acurada para contextos de cidades [Vivekanandan et al. 2025].

3. Arquitetura IoT Proposta

A arquitetura foi projetada como uma arquitetura IoT de quatro camadas para o monitoramento remoto e contínuo da qualidade de corpos hídricos amazônicos. A Figura 1 apresenta uma visão geral da arquitetura, ilustrando o fluxo de dados desde a coleta pelos nós sensores até a interpretação pelo agente de IA e a visualização pelo usuário final.

¹Disponível em https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/transformacaodigital/plano-brasileiro-de-inteligencia-artificial-pbia-_vf.pdf

As quatro camadas são: (i) **Percepção**, responsável pela coleta dos parâmetros físico-químicos; (ii) **Comunicação**, que realiza a transmissão dos dados via LoRa até o *gateway*; (iii) **Nuvem**, onde os dados são armazenados e gerenciados no Google Firestore; e (iv) **Aplicação**, que oferece ao usuário visualização em tempo real e análises geradas pelo agente de IA.

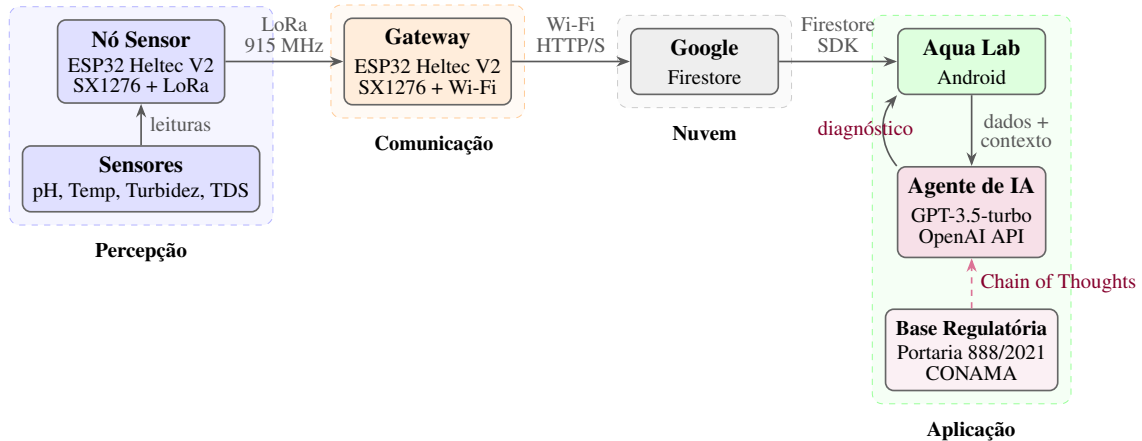


Figura 1. Arquitetura geral IoT porposta: camadas de percepção, comunicação, nuvem e aplicação, com destaque para o agente de IA e sua base de conhecimento regulatória.

As subseções a seguir detalham cada componente da arquitetura.

3.1. Camada de Percepção: Nó Sensor

O nó sensor constitui a camada de percepção da arquitetura, responsável pela coleta contínua dos parâmetros físico-químicos da água. O hardware é constituído de microcontrolador ESP32 Heltec V2, que integra o módulo de rádio SX1276 com suporte a comunicação LoRa. Quatro parâmetros físico-químicos são coletados: (i) pH, para avaliação da acidez e alcalinidade; (ii) temperatura da água; (iii) turbidez; e (iv) sólidos dissolvidos totais (TDS – *Total Dissolved Solids*). A cada ciclo de coleta, os valores medidos são serializados e transmitidos via LoRa ao *gateway*, a cada 30 segundos.

3.2. Camada de Comunicação: Gateway LoRa

A camada de comunicação é responsável pela recepção dos pacotes LoRa transmitidos pelos nós sensores e pelo encaminhamento dos dados à nuvem. O *gateway* foi implementado em um ESP32 Heltec V2, configurado como receptor LoRa de canal único.

Após a recepção de um pacote LoRa, o *gateway* extrai os dados do *payload* e encaminha o registro ao Google Firestore via protocolo HTTP sobre a rede Wi-Fi local disponível.

3.3. Camada de Banco em Nuvem: Google Firestore

Os dados encaminhados pelo *gateway* são armazenados no Google Firestore, banco de dados NoSQL orientado a documentos, do Google, com suporte nativo a sincronização em tempo real com aplicativos móveis e disponibilidade de SDKs para integração direta com o ESP32 via HTTP request. Cada ponto de coleta é representado por um documento com os campos apresentados na Tabela 2, que incluem metadados de localização, classificação gerada pelo agente de IA e identificação do responsável pelo cadastro.

3.4. Camada de Aplicação: Aqua Lab e Agente de IA

A camada de aplicação é composta pelo aplicativo móvel Aqua Lab e pelo agente de IA integrado, que juntos oferecem ao usuário final uma interface unificada para visualização dos dados coletados e interpretação dos diagnósticos ambientais.

3.4.1. Aplicativo Aqua Lab

O Aqua Lab é uma aplicação nativa para Android, desenvolvida em Kotlin segundo o padrão arquitetural MVVM. O aplicativo conecta-se ao Firestore para recuperar os registros de qualidade da água em tempo real, apresentando os dados por meio de gráficos de tendência, mapa interativo de pontos de coleta com classificação cromática e histórico de medições.

3.4.2. Agente de IA Ambiental

O agente é acionado pelo aplicativo, usando a API do modelo `gpt-3.5-turbo` da OpenAI, e utilizando a estratégia de raciocínio em cadeia (*chain-of-thought*) por meio de *system prompt* estruturado, com uma requisição que combina os valores mais recentes dos sensores (pH, temperatura, turbidez e TDS), os metadados do ponto de coleta e informações meteorológicas em tempo real obtidas via API OpenWeather. A resposta é estruturada em três componentes: (i) **classificação qualitativa** da água (Ótima, Boa, Regular, Ruim ou Péssima); (ii) **análise técnica** fundamentada nas normas regulatórias; e (iii) **explicação pedagógica** com recomendações concretas de ação ambiental. O *system prompt* estrutura o raciocínio em cadeia (*chain-of-thought*) em três camadas: a **normativa**, com os limites da Portaria GM/MS nº 888/2021 [Brasil. Ministério da Saúde 2021] e das Resoluções CONAMA para pH (6,0–9,5), temperatura e turbidez; a **contextual**, com o perfil do ponto de coleta e condições ambientais locais; e a **pedagógica**, que orienta o modelo a adaptar o nível de detalhe ao perfil do usuário (pesquisador ou público geral) e a incluir recomendações alinhadas aos ODS 6 e 15.

4. Metodologia de Avaliação

A metodologia de avaliação foi estruturada a partir da validação da arquitetura em experimento de campo no (INPA - AM), com coleta real de dados de qualidade da água.

4.1. Validação em Campo em Corpo Hídrico

O experimento de campo foi conduzido no INPA - AM, ao longo de três dias consecutivos: 27 e 28 de fevereiro e 01 de março de 2025. O cenário de implantação consistiu em um lago presente, representativo de corpo hídrico de pequeno porte. O nó sensor foi posicionado diretamente sobre a superfície do lago, a aproximadamente 90 m do *gateway*.

Os parâmetros LoRa no *gateway* foram configurados de forma fixa durante o experimento, conforme a Tabela 1, priorizando a confiabilidade da entrega.

Cada *payload* transmitido pelo nó sensor contém uma estrutura de dados com os campos apresentados na Tabela 2, que é posteriormente armazenada no Firebase Firestore. A estrutura de dados foi projetada para suportar múltiplos pontos de coleta e diferentes tipos de corpos hídricos, como lagos, igarapés, rios e reservatórios.

Tabela 1. Parâmetros LoRa utilizados no experimento de campo.

Parâmetro	Valor
Fator de Espalhamento (SF)	10
Largura de Banda (BW)	125 kHz
Potência de Transmissão (TP)	20 dBm
Taxa de Codificação (CR)	4/5
Frequência	915 MHz

Tabela 2. Campos do documento armazenado no Google Firestore por ponto de coleta.

Campo	Tipo	Descrição
nome	string	Nome identificador do ponto de coleta
pontoIdNuvem	string	Identificador único do ponto no Firestore
endereco	string	Endereço textual do ponto de coleta
latitude	double	Coordenada geográfica de latitude do nó
longitude	double	Coordenada geográfica de longitude do nó
status	string	Status operacional do ponto (<i>Ativo, Inativo</i>)
classificacao	string	Classificação qualitativa da água (<i>Ótima, Boa, Regular, Ruim, Péssima</i>)
userId	string	Identificador do usuário responsável pelo cadastro

4.2. Avaliação do Agente de IA

o Agente de IA foi avaliado de modo empírico, comparando-se as amostras de resultados e do experimento em campo, combinando-as e avaliando o resultado textual, comparando-o com dados e avaliações esperadas, dispostas nas normas e portarias utilizadas pelo Agente.

5. Resultados e Discussão

Esta seção apresenta os resultados da validação experimental da arquitetura proposta, conduzida em três frentes: (i) operação do nó sensor em campo; (ii) análise dos parâmetros físico-químicos coletados; e (iii) exemplos de diagnósticos gerados pelo agente de IA.

5.1. Operação do Nó Sensor em Campo

O experimento de campo contou com presença de vegetação marginal e árvores no percurso do sinal LoRa, conforme ilustrado na Figura 2, que apresenta o nó sensor implantado próximo a uma pequena ilha, no meio do lago. O dispositivo foi acondicionado em caixa de proteção impermeável fixada sobre estrutura de tubulação PVC como bóia, com antena posicionada externamente.

Ao longo dos três dias de operação contínua, o sistema registrou 9.769 leituras distribuídas entre os quatro sensores implantados: 2.473 para temperatura, 2.473 para turbidez, 2.473 para TDS e 2.350 para pH. A diferença apresentada para o pH está relacionada a perda de pacotes entre o nó sensor e o *gateway*.

5.2. Análise dos Parâmetros Coletados

De modo a facilitar a visualização e análise preliminar dos dados, a Figura 3 apresenta a distribuição diária dos valores de pH e temperatura coletados nos três dias de experimento,



Figura 2. Nó sensor implantado na superfície do lago, no INPA - AM. A caixa impermeável condiciona o ESP32 Heltec V2 e chips dos sensores físico-químicos, com a antena LoRa posicionada na parte superior da caixa.

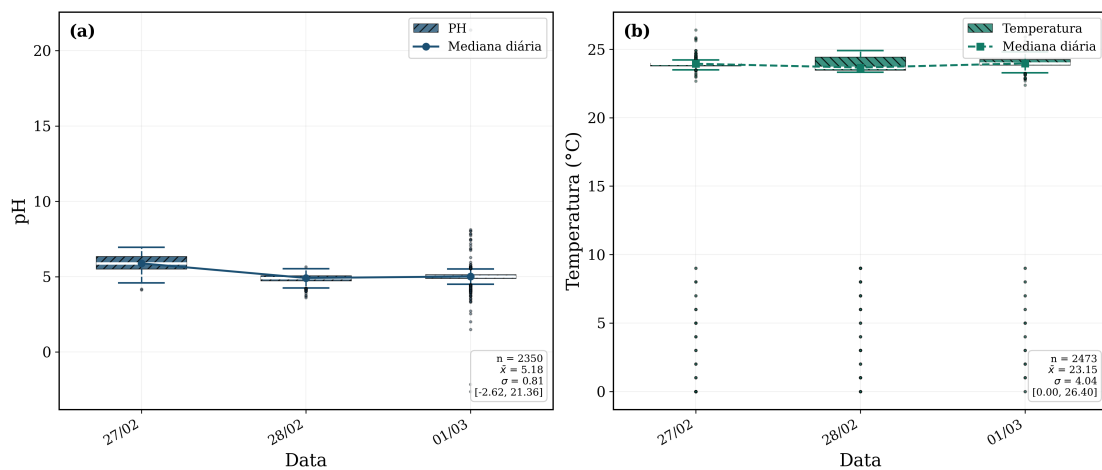


Figura 3. Distribuição diária de pH (a) e temperatura (b) durante os três dias de experimento.

por meio de boxplot. O uso desses dois parâmetros são apresentados pois apresentam os dois principais sensores, entre os quatro utilizados.

Para o pH, foram registradas 2.350 leituras com média de $\bar{x} = 5,18$, com valores variando entre $-2,62$ e $21,36$, evidenciando os outliers presentes na coleta, contudo, sendo abstraídos pela média. Os valores médios observados situaram-se abaixo da faixa de neutralidade (pH 7,0), indicando caráter moderadamente ácido, característico de corpos d'água amazônicos com presença de matéria orgânica dissolvida [da Silva et al. 2013]. Valores negativos e acima de 14 detectados correspondem a leituras anômalas do sensor, decorrentes de instabilidade durante a imersão, ou falhas na sonda do sensor e devem ser tratados como outliers.

Para a temperatura, a média foi de $\bar{x} = 23,15$ °C. A dispersão observada nos outliers inferiores, com valores próximos a 0 °C, é atribuída a leituras transitórias durante a inicialização do sensor. Este comportamento se repetiu nos demais sensores, mas sem

afetar o resultado médio.

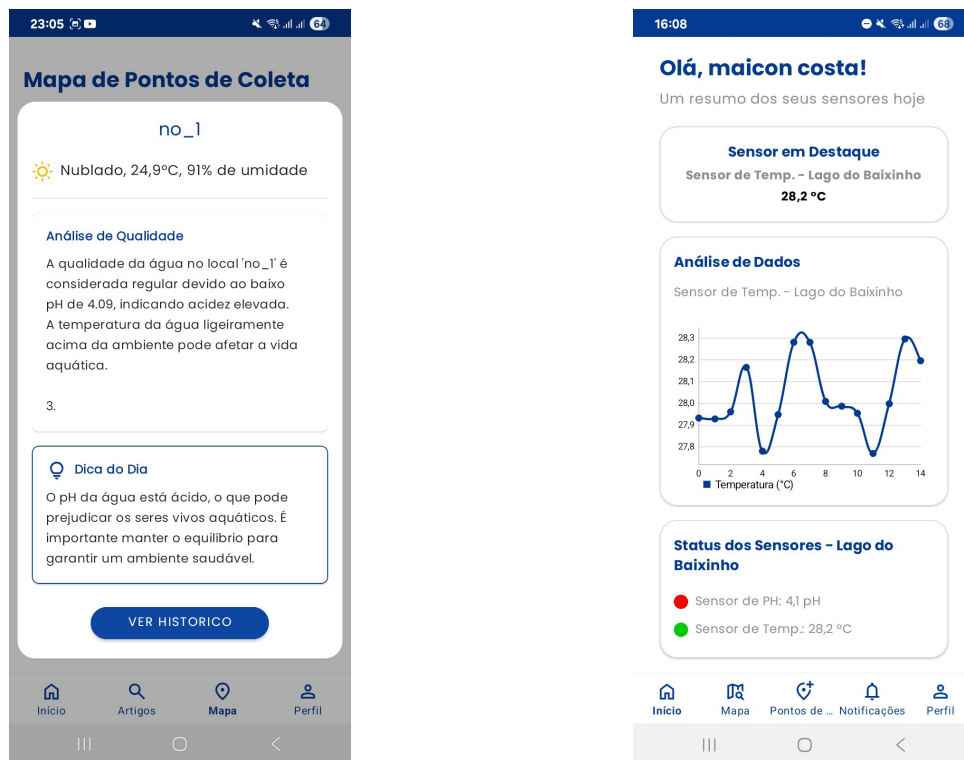


Figura 4. Diagnóstico gerado pelo agente de IA no aplicativo Aqua Lab: classificação Regular, análise técnica fundamentada na Portaria 888/2021 e recomendação pedagógica sobre equilíbrio do pH no ecossistema aquático.

5.3. Diagnósticos do Agente de IA

A Figura 4 ilustra um exemplo de diagnóstico gerado pelo Agente, durante o terceiro dia do experimento, com pH medido de 4,09, temperatura da água de 24,9°C e umidade relativa de 91% (dado climático). O agente classificou a água como **Regular**, identificando a acidez elevada como fator crítico, abaixo do limiar de 6,0 estabelecido pela Portaria GM/MS nº 888/2021 [Brasil. Ministério da Saúde 2021], sinalizando impacto a fatores como potabilidade. A camada pedagógica produz uma *Dica do Dia* em linguagem acessível, reforçando a importância do equilíbrio do pH para a saúde do ecossistema aquático. A avaliação empírica das respostas geradas indicou aderência aos parâmetros normativos e coerência com os valores medidos pelos sensores, demonstrando a viabilidade do Agente em produzir uma saída interpretável, em especial para usuários não especialistas em parâmetros físico-químicos da água.

6. Conclusão

Este trabalho apresentou uma proposta de arquitetura IoT de quatro camadas para monitoramento remoto e contínuo da qualidade de corpos hídricos amazônicos, integrando nós sensores baseados no microcontrolador ESP32 Heltec com comunicação LoRa, armazenamento em nuvem via Google Firestore e um agente de IA fundamentado em LLM e base de conhecimento regulatória. A validação experimental conduzida no INPA - AM, ao longo de três dias consecutivos, demonstrou a viabilidade operacional da arquitetura

em ambiente hídrico real, com 9.769 leituras registradas. Os resultados evidenciaram o caráter moderadamente ácido do lago monitorado, com pH médio de 5,18, e a estabilidade térmica em torno de 23 °C são característicos de corpos d'água amazônicos com matéria orgânica dissolvida, e que o agente de IA é capaz de traduzir essas leituras em diagnósticos regulatórios e recomendações acionáveis alinhadas aos ODS 6 e 15, mesmo para usuários não especialistas.

Como trabalhos futuros, pretende-se incorporar técnicas de RAG (*Retrieval-Augmented Generation*) ao agente de IA, ampliando a base de conhecimento com documentos técnicos sobre qualidade da água na Amazônia e laudos de órgãos regulatórios. Adicionalmente, planeja-se expandir o conjunto de parâmetros monitorados, incorporando oxigênio dissolvido e ORP (*Oxidation-Reduction Potential*), entre outros desafios relacionados a conectividade LoRa e o uso de múltiplos nós sensores.

Referências

- Araújo, M. S. (2024). Detecção de incêndios florestais em áreas remotas através de redes lora.
- Arratia, B., Rosas, E., Furones, Á. M., Perles-Ivars, Á., Posadas-Yagüe, J.-L., Cecilia, J. M., and Manzoni, P. (2024). An adaptive lora-based edge architecture for data sensing and collection in natural parks. In *2024 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, pages 1–6. IEEE.
- Barbosa, B. S. d. S., Cruz, H. A., Macedo, A. S., Cardoso, C. M., Fernandes, F. C., Eras, L. E., Araújo, J. P. d., Calvacante, G. P., and Barros, F. J. (2024). Application of artificial neural networks for prediction of received signal strength indication and signal-to-noise ratio in amazonian wooded environments. *Sensors*, 24(8):2542.
- Bentes, A. L. P. et al. (2023). Sumaúma: estação de monitoramento de plantas domésticas utilizando android e esp32.
- Bran, E., Rughiniş, R., Turcanu, D., and Radovici, A. (2024). Ai leads, cybersecurity follows: Unveiling research priorities in sustainable development goal-relevant technologies across nations. *Sustainability*, 16(20):8886.
- Brasil. Ministério da Saúde (2021). Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021. Diário Oficial da União.
- da Silva, M. d. S. R., Miranda, S. Á. F., Domingos, R. N., Silva, S. L. R., and Santana, G. P. (2013). Classificação dos rios da amazônia: uma estratégia para preservação desses recursos. *Holos Environment*, 13(2):163–174.
- Das, B. and Jain, P. (2017). Real-time water quality monitoring system using internet of things. In *2017 International conference on computer, communications and electronics (Comptelix)*, pages 78–82. IEEE.
- de Araújo Gurgel, P. H., da Silva Dias, N., de Medeiros, A., et al. (2023). Qwater: Aplicativo para interpretar a qualidade da água de irrigação.
- de Souza, J. R., de Moraes, M. E. B., Sonoda, S. L., and Santos, H. C. R. G. (2014). A importância da qualidade da água e os seus múltiplos usos: caso rio almada, sul da bahia, brasil. *REDE-Revista Eletrônica do Prodemá*, 8(1).

- López-Vargas, A., Fuentes, M., and Vivar, M. (2020). Challenges and opportunities of the internet of things for global development to achieve the united nations sustainable development goals. *IEEE Access*, 8:37202–37213.
- Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação and Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (2025). IA para o Bem de Todos: Plano Brasileiro de Inteligência Artificial. Technical report, MCTI/CGEE, Brasília, DF.
- Monteiro, L. N. (2020). Sistema de monitoramento da qualidade da água em tempo real.
- Moraes, N. T. F. et al. (2025). Rede lora: análise de desempenho de uma rede de internet das coisas em um cenário florestal.
- Moreira, D. S., Santos, G., Yanai, A. E., Souza, P. B. d., Melo, P. V. F. d., and Mota, E. (2025). Lorabb: An algorithm for parameter selection in lora-based communication for the amazon rainforest. *Sensors*, 25(4).
- Oliveira, P. I. C. et al. (2022). Desenvolvimento de um aplicativo mobile para suporte às análises físico-químicas de água para piscicultura.
- Organização das Nações Unidas (2015). Objetivo de desenvolvimento sustentável 6: Água potável e saneamento. Acesso em: 22 fev. 2026.
- Panduman, Y. Y. F., Funabiki, N., Fajrianti, E. D., Fang, S., and Sukaridhoto, S. (2024). A survey of ai techniques in iot applications with use case investigations in the smart environmental monitoring and analytics in real-time iot platform. *Information*, 15(3):153.
- Rico, A., de Oliveira, R., de Souza Nunes, G. S., Rizzi, C., Villa, S., López-Heras, I., Vighi, M., and Waichman, A. V. (2021). Pharmaceuticals and other urban contaminants threaten amazonian freshwater ecosystems. *Environment International*, 155:106702.
- Rodrigues, M., Dos Santos, A., Lima, H., Nogueira, W., and de Lucena Junior, V. (2025). Tracking boats on amazon rivers—a case study with the lora/lorawan. *Sensors*, 25(2):496.
- Vivekanandan, V., Sureshkumar, R., Manikandan, S., Ram Kumar, R., Das, M. S., Kumar, G. R., and Nandakumar, S. (2025). Environmental monitoring and sustainability: Llms for climate-responsive urban design. In *Large Language Models for Sustainable Urban Development*, pages 89–109. Springer.