

Plataforma Modular de Monitoramento Agroecológico na Amazônia utilizando Rede Sensorial e Infraestrutura de Dados Local

Aguinaldo Braga, Alessandro Torres, Alexandre Campos, André Falcão, Gabriel Malcher, Gracieide Barbosa, Jean Lobo, Messias Andrade e Silvano Batista

Resumo— Este artigo apresenta uma plataforma modular de monitoramento agroecológico na Amazônia, baseada em nós sensores de baixo custo e infraestrutura de dados inteiramente local, sem dependência de nuvem. O protótipo emprega ESP32-S3 com sensores de temperatura e umidade do ar (AHT10) e umidade do solo (capacitivo), com ciclos de 5.000 ms, armazenamento em InfluxDB e visualização em Grafana via Docker Compose. Um módulo Python rastreia fases lunares, integrando saberes tradicionais amazônicos ao monitoramento digital. Resultados preliminares confirmam viabilidade técnica e potencial social para conservação do solo e prevenção de queimadas em áreas vulneráveis da Amazônia.

Palavras-Chave— Agroecologia, Monitoramento Ambiental, Internet das Coisas, Redes de Sensores, Processamento na Borda, Saberes Tradicionais, Sustentabilidade.

Abstract— This paper presents a modular agroecological monitoring platform for the Amazon, built on low-cost sensor nodes and a fully local data infrastructure. An ESP32-S3 microcontroller acquires temperature, air humidity (AHT10), and soil moisture (capacitive sensor) at 5,000 ms intervals. Data are stored in InfluxDB via Docker Compose and visualized in real time with Grafana, with no cloud dependency. A complementary Python module tracks lunar phases, bridging ancestral agricultural knowledge with digital monitoring. Preliminary results confirm technical feasibility and social potential for sustainable practices, soil conservation, and wildfire prevention in vulnerable Amazon areas.

Keywords— Agroecology, Environmental Monitoring, Internet of Things, Sensor Networks, Edge Computing, Traditional Knowledge, Sustainability.

Aguinaldo Alves Braga Neto, Departamento de Engenharia Elétrica e Telecomunicações, Universidade Federal do Amazonas (UFAM), Manaus, e-mail: agnbraga@hotmail.com; Alessandro Vinícius Torres do Couto, Curso de Análise e Desenvolvimento de Sistemas, Centro Universitário Fametro, Manaus, e-mail: alessandrocouto.ti@gmail.com; Alexandre Roberto da Silva Campos, Departamento de Engenharia Elétrica e Telecomunicações, Universidade Federal do Amazonas (UFAM), Manaus, e-mail: alexandrecampos13@gmail.com; André Luiz Falcão O. da Silva, Curso de Análise e Desenvolvimento de Sistemas, Centro Universitário Fametro, Manaus, e-mail: dev.alfos@proton.me; Gabriel Benoliel Malcher, Curso de Análise e Desenvolvimento de Sistemas, Centro Universitário Fametro, Manaus, e-mail: gabrielbenolielmalcher@gmail.com; Gracieide Guimarães Barbosa, Curso de Análise e Desenvolvimento de Sistemas, Centro Universitário Fametro, Manaus, e-mail: gracieidebarb@gmail.com; Silvano Tavares Batista Junior, Departamento de Engenharia Elétrica e Telecomunicações, UFAM, Manaus-AM, e-mail: silvano.batista.jr@gmail.com; Jean Mark Lobo de Oliveira, Departamento da Computação, Centro Universitário Fametro, Manaus, e-mail: jeanmarklobodeoliveira@gmail.com; Messias Augusto Lima Belchior de Andrade, Departamento da Computação, Centro Universitário Fametro, Manaus, e-mail: messias.andrade@fametro.edu.br

I. INTRODUÇÃO

A Amazônia representa um dos maiores patrimônios naturais e culturais do planeta, não apenas por sua dimensão territorial e pela diversidade biológica, mas também pela complexidade das relações sociais e ambientais que nela se desenvolvem [1]. Trata-se de um território vivo, no qual a floresta integra a vida cotidiana de povos indígenas, comunidades ribeirinhas, agricultores familiares e outras populações tradicionais. Esses grupos construíram, ao longo de gerações, formas próprias de observação e interpretação da natureza, fundamentadas na experiência prática, na oralidade e na leitura contínua dos ciclos ambientais [2].

Esse conjunto de saberes tradicionais configura um sofisticado sistema de percepção ecológica. A observação dos regimes de chuva, da umidade do solo, do comportamento das plantas, da variação térmica e das fases da Lua compõe um repertório de conhecimento que orienta práticas agrícolas, manejo do território e prevenção de riscos ambientais [3]. Em muitas regiões amazônicas, esse conhecimento continua sendo essencial para a tomada de decisões cotidianas, especialmente em comunidades isoladas onde o acesso a tecnologias de comunicação é limitado ou intermitente [1], [4].

Paralelamente, a intensificação de queimadas, eventos climáticos extremos e degradação do solo amplia a necessidade de ferramentas que auxiliem o monitoramento ambiental local. Soluções comerciais de monitoramento agrometeorológico já existem no mercado, mas costumam ter custo elevado e dependência de conectividade contínua, restringindo sua adoção por agricultores familiares e comunidades tradicionais da Amazônia, cuja realidade produtiva é marcada por pequena escala, orçamento limitado e infraestrutura de rede intermitente ou inexistente [4], [5]. Tecnologias de baixo custo baseadas em Internet das Coisas (IoT) surgem como alternativas promissoras, especialmente quando implementadas com processamento local paradigma denominado *edge computing* eliminando a dependência de conectividade contínua com a internet [4], [6]. A combinação entre sensores acessíveis, processamento na borda e visualização em tempo real pode ampliar significativamente a capacidade de monitoramento ambiental por comunidades e pequenos produtores [5], [7].

A. Trabalhos Relacionados

Trabalhos recentes exploram essas direções de forma isolada: parte da literatura concentra-se em arquiteturas de *edge*

computing e redes de longo alcance para monitoramento agrícola [4]–[6]; outra vertente calibra sensores de baixo custo sem integrá-los a uma infraestrutura de dados completa [8], [9]; e há estudos que discutem, em separado, a incorporação de saberes ancestrais, incluindo o calendário lunar, às práticas agrícolas, sem propor uma implementação computacional correspondente [3], [10]. O projeto *Guardiões da Floresta* distingue-se ao reunir, em uma única plataforma reprodutível e de baixo custo, aquisição de dados ambientais, infraestrutura local sem nuvem e formalização digital de um saber tradicional amazônico — integrando conhecimentos tradicionais a uma solução simples e replicável que apoia a observação ambiental, a prevenção de queimadas e a identificação de cenários críticos de umidade do solo [7], [11].

Este artigo está organizado da seguinte forma: a Seção II descreve a arquitetura e a implementação do sistema; a Seção III apresenta os resultados preliminares e discussão; e a Seção IV expõe as conclusões e perspectivas futuras.

II. ARQUITETURA E IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA

O sistema foi estruturado como uma arquitetura IoT local, composta por: (i) um nó sensor embarcado, (ii) um serviço de ingestão de dados, (iii) um banco de séries temporais, (iv) uma camada de visualização e (v) um módulo complementar para informações sobre a fase lunar. A modularidade decorre do desacoplamento entre essas camadas, implantadas como serviços containerizados independentes (Seção II-D): novos sensores podem ser incorporados ao nó embarcado sem alterar o serviço de ingestão, e o banco de dados ou a camada de visualização podem ser substituídos sem exigir a reescrita das demais partes. Essa organização privilegia simplicidade, baixo custo e operação autônoma em rede local, sendo particularmente adequada para áreas com infraestrutura limitada ou acesso instável à internet [12], [13].¹

A. Rede Sensorial e Aquisição de Dados

O nó sensor foi desenvolvido em torno da placa ESP32-S3 DevKitC-1. A literatura reporta, para esse microcontrolador, perfis de baixo consumo em repouso e capacidade de processamento adequada a telemetria de campo [14]. O consumo energético do protótipo foi aferido por medição direta de corrente em série no barramento de 5 V, registrando $\approx 26,6$ mA (≈ 133 mW) em operação normal do *firmware*, sem Wi-Fi ativo; a caracterização por estado (*boot*, repouso, transmissão) é trabalho futuro (Seção IV). Frente a microcontroladores mais baratos, o ESP32-S3 justifica-se pela arquitetura de dois núcleos, que acomoda leitura simultânea de sensores e futura inferência leve na borda, pela conectividade Wi-Fi/BLE nativa reservada à migração sem fio prevista (Seção IV), e por seu ecossistema de desenvolvimento maduro, que reduz a barreira de replicação por terceiros. A programação foi realizada em C++ com o *framework* Arduino, com gerenciamento de ambiente via PlatformIO.

A Fig. 1 apresenta o diagrama de pinagem do nó sensor. O AHT10, responsável pela aquisição de temperatura e umidade

relativa do ar, é inicializado pelo barramento I2C nos pinos SDA_PIN = 17 e SCL_PIN = 18. A umidade do solo é estimada por um sensor capacitivo conectado à entrada analógica SOIL_ADC_PIN = 4. A comunicação serial opera a 115.200 bit/s, com ciclos de medição a cada 5.000 ms frequência compatível com o perfil de baixo consumo computacional esperado para aplicações de monitoramento ambiental de campo [2], [14].

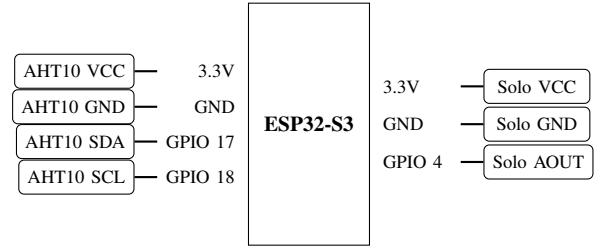


Fig. 1: Diagrama de pinagem do nó sensor.

Para a leitura da umidade do solo, o *firmware* utiliza conversão analógica com resolução de 12 bits. A fim de reduzir oscilações e ruídos típicos de sensores capacitivos de baixo custo, o algoritmo calcula a média de 10 amostras consecutivas antes de produzir a medida final, estratégia que melhora a estabilidade da variável monitorada sem introduzir complexidade excessiva na implementação embarcada [8], [15].

B. Processamento Local e Normalização das Medidas

Após a leitura bruta do sensor de solo, o sistema aplica normalização linear para converter o valor analógico em escala percentual de 0 a 100%. Os parâmetros de calibração definidos no *firmware*, listados na Tabela I, são SOIL_RAW_DRY = 4065 (solo seco) e SOIL_RAW_WET = 1150 (solo úmido). A estimativa percentual da umidade do solo é expressa por

$$S = \text{sat}_{[0,100]} \left(100 \cdot \frac{R_d - R}{R_d - R_w} \right), \quad (1)$$

em que R representa a leitura bruta do sensor, R_d o valor de referência para solo seco, R_w o valor para solo úmido, e $\text{sat}_{[0,100]}$ a saturação do resultado no intervalo $[0, 100]$. Essa abordagem é simples, interpretável e compatível com a proposta de um sistema acessível para uso local [8], [9].

No caso do AHT10, a leitura de temperatura e umidade é realizada por meio da biblioteca Adafruit AHTX0. Caso o sensor não seja detectado na inicialização, o sistema registra essa condição e mantém o envio dos demais dados, estratégia que evita interrupção completa do fluxo de monitoramento em caso de falha de subsistema.

C. Encapsulamento e Envio dos Dados

As medidas são encapsuladas em mensagens JSON transmitidas via interface serial USB. Cada pacote inclui os campos *device_id*, *seq*, *t*, *ha*, *s* e *soil_raw*, correspondentes à identificação do dispositivo, número sequencial da amostra, temperatura do ar, umidade relativa do ar, umidade do solo

¹O código-fonte do projeto está disponível em: <https://github.com/Alfos-dev/guardioes-da-floresta-iot>

TABELA I: Parâmetros de Configuração para Reprodutibilidade

Parâmetro	Valor / Critério de escolha
Ciclo de medição	5.000 ms, compromisso entre resolução temporal e volume de escrita no InfluxDB
Barramento AHT10	I2C, SDA=17, SCL=18, pinagem livre de conflito com periféricos padrão da DevKitC-1
ADC do solo	12 bits, média de 10 amostras, reduz ruído sem custo computacional relevante
Taxa serial	115.200 bit/s, padrão suportado pelo monitor do PlatformIO sem perdas de pacote
SOIL_RAW_DRY	4065, calibrado empiricamente para o solo de teste (Seção III)
SOIL_RAW_WET	1150, calibrado empiricamente para o solo de teste (Seção III)

percentual e leitura analógica bruta, respectivamente. O formato JSON simplifica a integração com serviços de *backend*, facilita inspeção e depuração, e permite rastreabilidade básica da aquisição por meio do contador sequencial [14].

D. Infraestrutura Local de Software

O servidor local é executado em um computador de baixo custo (mini PC ou Raspberry Pi, detalhado na Tabela II), no qual o projeto utiliza uma infraestrutura organizada com Docker Compose, responsável por instanciar quatro serviços principais, cada um em um contêiner independente: *influxdb*, *grafana*, *serial_bridge* e *moon_service*. Essa containerização é o mecanismo concreto que viabiliza a modularidade da arquitetura: cada serviço pode ser atualizado, substituído ou reiniciado isoladamente, sem interromper os demais. O InfluxDB, disponibilizado na porta 8086, é empregado como banco de dados de séries temporais, tecnologia reconhecida por seu alto desempenho em ingestão e consulta de dados gerados por dispositivos IoT [16], inclusive em aplicações voltadas ao armazenamento de séries agroclimáticas na Amazônia Legal [17]. O Grafana, acessado pela porta 3000, provê a camada de visualização para criação de *dashboards* e acompanhamento das medições em tempo real [16].

O serviço *serial_bridge*, implementado em Python, lê a porta serial, interpreta as mensagens JSON e grava os dados no InfluxDB. O campo *device_id* é armazenado como *tag*, enquanto *t*, *ha*, *s* e *soil_raw* são armazenados como campos numéricos. O serviço implementa tentativas periódicas de reconexão à interface serial em caso de indisponibilidade do dispositivo, contribuindo para maior robustez operacional [13].

A característica central da arquitetura, funcionamento local e autônomo, torna o sistema especialmente adequado para contextos amazônicos, rurais ou periféricos, nos quais a conec-

tividade pode ser limitada, intermitente ou economicamente inviável. O processamento, armazenamento e visualização são executados inteiramente na rede local, sem dependência de serviços em nuvem [4], [12].

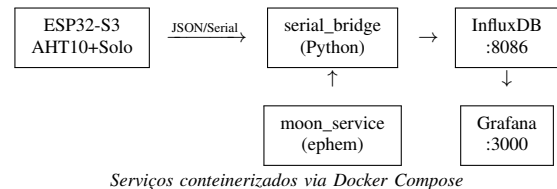
E. Serviço Complementar de Fase Lunar

O sistema incorpora um serviço complementar para acompanhamento das fases da Lua, implementado em Python com a biblioteca *ephem*. Este módulo realiza atualizações periódicas no banco de dados, gravando os campos *illumination* e *phase*, além de uma *tag* de localização geográfica.

A inclusão desse módulo possui valor técnico, simbólico e metodológico. Em diversas comunidades amazônicas, as fases lunares são tradicionalmente associadas ao plantio, à colheita, ao comportamento da água e ao acompanhamento de ciclos ambientais [3], [10]. Ao incorporar esse elemento ao sistema, o projeto estabelece uma ponte entre observação ancestral e monitoramento digital, ampliando a capacidade de interpretação contextual dos dados coletados [3], [10].

F. Síntese da Arquitetura

A Fig. 2 sintetiza o fluxo operacional completo: (1) o ESP32-S3 realiza aquisição periódica das grandezas ambientais; (2) os dados são transmitidos via serial em JSON; (3) o *serial_bridge* recebe e grava no InfluxDB; (4) o Grafana consulta o banco e apresenta os dados em *dashboards*; (5) paralelamente, o *moon_service* atualiza dados complementares de fase lunar. Essa cadeia forma uma solução de monitoramento modular, de baixo custo e passível de expansão incremental.


 Fig. 2: Arquitetura do sistema *Guardiões da Floresta*.

III. RESULTADOS PRELIMINARES E DISCUSSÃO

Os resultados preliminares do projeto *Guardiões da Floresta* confirmam a viabilidade técnica da proposta como ferramenta de monitoramento ambiental de baixo custo. A integração entre nó sensor, serviço de ingestão, banco de séries temporais e *dashboard* mostrou-se funcional para coleta, armazenamento e visualização contínua das variáveis ambientais monitoradas. O uso de arquitetura modular favorece manutenção, replicação do protótipo e evolução incremental do sistema.

Do ponto de vista da infraestrutura de *software*, a containerização via Docker Compose demonstrou-se eficaz para orquestrar os serviços locais em *hardware* de propósito geral, confirmando abordagens descritas na literatura para nós de borda de baixo custo [13]. O InfluxDB apresentou desempenho adequado para a taxa de ingestão do protótipo (uma amostra a cada 5 segundos), com latências de gravação inferiores a

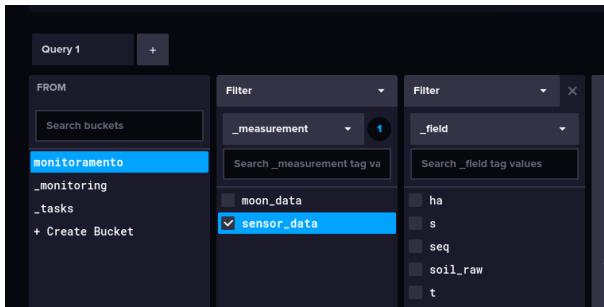
50 ms, valor consistente com os *benchmarks* reportados para implantações containerizadas em escala equivalente [16].

Os valores de calibração do sensor de solo ($SOIL_RAW_DRY = 4065$ e $SOIL_RAW_WET = 1150$) foram determinados empiricamente para o tipo de solo testado; a literatura indica que esses parâmetros podem variar significativamente conforme a composição orgânica do solo e as condições ambientais locais [8], [9].

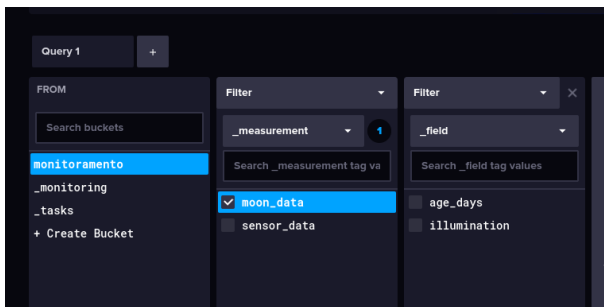
A Fig. 3 apresenta evidências experimentais do sistema em operação. A Fig. 3(a) apresenta uma amostra do fluxo de mensagens JSON capturado via PlatformIO Device Monitor, confirmando a aquisição contínua pelo ESP32-S3 com temperatura média de $25,8^{\circ}\text{C}$, umidade relativa de aproximadamente 72% e leituras brutas do sensor de solo em torno de 4.070, valores próximos ao limite de solo seco ($SOIL_RAW_DRY = 4065$), consistentes com o ambiente de teste em laboratório. As Figs. 3(b) e 3(c) confirmam a ingestão bem-sucedida dos dados no InfluxDB, evidenciando o reconhecimento automático dos campos *sensor_data* (campos *ha*, *s*, *seq*, *soil_raw*, *t*) e *moon_data* (campos *age_days*, *illumination*) no banco de dados local.

seq	t ($^{\circ}\text{C}$)	ha (%)	soil_raw
55	25.83	72.40	4057
58	25.84	72.74	4052
61	25.83	72.66	4078
64	25.86	72.75	4095
67	25.85	72.84	4080
70	25.84	73.07	4059
73	25.85	73.17	4079
76	25.88	73.18	4051

(a) Amostra do fluxo JSON do nó sensor (saída do PlatformIO Device Monitor), campos *seq*, *t*, *ha* e *soil_raw*.



(b) *sensor_data* no InfluxDB.



(c) *moon_data* no InfluxDB.

Fig. 3: Evidências experimentais de aquisição e ingestão: (a) amostra do fluxo JSON do nó sensor; (b),(c) dados reconhecidos pelo InfluxDB local.

Complementarmente à verificação pontual dos registros no InfluxDB, a Fig. 4 apresenta o *dashboard* do Grafana em operação, exibindo a série temporal de temperatura, umidade relativa do ar e umidade do solo coletada durante o ensaio em laboratório. A visualização em tempo real permite acompanhar a evolução das variáveis ambientais ao longo do período de monitoramento e ilustra, de forma mais direta que os registros tabulares do banco de dados, a proposta de uso do sistema por usuários finais.

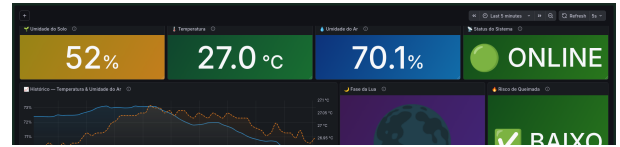


Fig. 4: Painel do Grafana com valores instantâneos e série temporal de temperatura e umidade do ar coletadas durante o ensaio.

O módulo de rastreamento de fases lunares integrou-se ao fluxo de dados sem impacto mensurável na latência do sistema principal. A disponibilização simultânea de dados instrumentais e calendário lunar nos *dashboards* do Grafana possibilita que usuários de comunidades tradicionais correlacionem, de forma visual e imediata, as leituras de umidade e temperatura com as fases da Lua, prática historicamente associada ao manejo agrícola em contextos amazônicos [3], [10].

A implementação atual apresenta limitações inerentes a um protótipo experimental. O fluxo de dados entre o nó sensor e o servidor é realizado por comunicação serial UART sobre cabo USB, opção adotada nesta fase por simplificar a depuração e dispensar o pareamento de rede, mas que restringe a mobilidade em campo; o ESP32-S3 dispõe nativamente de rádios Wi-Fi e Bluetooth Low Energy não utilizados neste protótipo, cuja migração, ou para LoRa/LoRaWAN, é trabalho futuro (Seção IV).

A Tabela II apresenta a estimativa de custo total do *hardware*, demonstrando que o sistema pode ser replicado por menos de R\$ 550,00, valor acessível para comunidades e pequenos produtores rurais [5]. Essa estimativa contempla apenas os componentes de *hardware* do protótipo e não constitui um levantamento formal de preços de soluções comerciais equivalentes, limitação assumida deste trabalho. Como referência indireta, estudos que comparam protótipos de IoT agrícola de baixo custo a soluções comerciais reportam economias da ordem de R\$ 700,00 por unidade [18], sugerindo que a faixa de custo obtida é compatível com a tendência da literatura. A Tabela III, a seguir, complementa essa análise com uma comparação direta frente a produtos comerciais nomeados de preço público.

TABELA II: Estimativa de Custo dos Componentes de *Hardware* (valores referentes à data de aquisição, maio de 2026)

Componente	Qtd.	Custo Est. (R\$)
ESP32-S3 DevKitC-1	1	45,00
Sensor AHT10	1	8,00
Sensor capacitivo de solo	1	6,00
Cabo USB-C	1	5,00
Mini PC / Raspberry Pi	1	350,00
Roteador Wi-Fi	1	120,00
Jumpers e protoboard	1	8,00
Total estimado		542,00

Os valores da Tabela II refletem os preços pagos na aquisição dos componentes (maio de 2026) em varejo *on-line* e podem divergir de preços atuais. A Tabela III nomeia soluções com preço público de varejo nacional: o protótipo custa entre 9% e 14% de um componente comercial equivalente e cerca de 4% de uma estação profissional completa.

TABELA III: Comparação com Soluções Comerciais Nomeadas (varejo, ago. 2026)

Solução	Tipo	Custo (R\$)
Guardiões da Floresta (proposto)	sistema completo	542,00
HOBO MX2306 (Onset)	datalogger solo/BLE	6.012,97
Sonda HP-474AC (Delta OHM)	temperatura e umidade *	3.920,00
KestrelMet 6000 (Kestrel)	estação completa	12.999,00

*Requer instrumento HD-2301 (vendido à parte). [†]Preços consultados em ago. 2026

nos sites dos fabricantes: agrosensores.com.br (Onset, Kestrel) e loja.impac.com.br (Delta OHM).

A migração para comunicação sem fio e a validação do sensor de solo em diferentes tipos de terreno amazônico permanecem como trabalho futuro, detalhado na Seção IV.

IV. CONCLUSÕES

Este trabalho demonstrou a viabilidade técnica e o potencial social de uma plataforma modular de monitoramento agroecológico na Amazônia, fundamentada em *hardware* acessível, processamento local e integração com saberes tradicionais das comunidades. O sistema proposto, denominado *Guardiões da Floresta*, apresenta como contribuições principais: (i) uma arquitetura de *edge computing* autônoma e reproduzível para contextos de baixa conectividade; (ii) a incorporação metodológica do calendário lunar como variável complementar ao monitoramento instrumental; e (iii) a validação de uma cadeia completa de aquisição, ingestão, armazenamento e visualização em tempo real com componentes de código aberto.

Os resultados preliminares indicam que o monitoramento contínuo de umidade do solo e condições climáticas pode auxiliar na identificação de cenários críticos relacionados a ressecamento, degradação ambiental e risco de queimadas [7]. A associação dessas informações com o conhecimento ancestral das comunidades amplia a capacidade de análise ambiental local, indicando que arquiteturas abertas, de baixo custo e processamento local podem contribuir para democratizar o acesso ao monitoramento agroecológico em regiões de baixa conectividade.

Como perspectivas futuras, destacam-se: a migração da comunicação serial para LoRa/LoRaWAN para operação sem

fio em campo [1]; a expansão do conjunto de sensores (CO₂, luminosidade, precipitação); a incorporação de modelos leves de aprendizado de máquina para detecção precoce de padrões de risco; e a validação da plataforma em parceria com comunidades tradicionais amazônicas como usuárias primárias do sistema.

REFERÊNCIAS

- [1] M. A. Silva, J. R. Souza, and R. C. Oliveira, "Low-power wide-area networks for environmental monitoring in the Amazon rainforest: Challenges and architectural directions," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 24150–24165, Jan. 2024.
- [2] T. L. Santos and G. M. Ferreira, "IoT-based microclimate monitoring systems in equatorial regions: Design and deployment in isolated communities," *Sensors*, vol. 24, no. 3, p. 892, Feb. 2024.
- [3] C. M. Ramos and S. P. Andrade, "Agroecological transitions and environmental monitoring tech: Bridging ancestral knowledge and modern telemetry," *Agroecology and Sustainable Food Systems*, vol. 48, no. 3, pp. 315–333, Mar. 2024.
- [4] R. N. Costa, L. H. Maciel, and P. S. Silva, "Edge-centric IoT frameworks for rural areas with constrained backhaul connectivity," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 11, no. 6, pp. 10234–10245, Mar. 2024.
- [5] A. Kumar and S. Varma, "Edge computing for agricultural monitoring: A bandwidth-efficient IoT approach for real-time sensor data analysis," in *Proc. 8th Int. Conf. Computing Methodologies and Communication (ICCMC)*, IEEE, pp. 312–318, July 2025.
- [6] J. P. Lima *et al.*, "Wireless sensor nodes for agroecological systems: A study on signal propagation under dense tropical canopy," *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 20, no. 2, pp. 45–58, May 2024.
- [7] L. F. Alves and R. M. Mendes, "Early warning systems based on local IoT networks for wildfire prevention in high-vulnerability tropical ecosystems," *Climate Risk Management*, vol. 44, p. 100599, Apr. 2024.
- [8] S. Abdel-Hafiz, "Calibration of low-cost capacitive soil moisture sensors for smart irrigation management applications," *MDPI Sensors*, vol. 25, no. 2, p. 343, Jan. 2025.
- [9] L. B. Zhang, "Characterization and linear interpolation calibration protocols for capacitive moisture sensors under highly variable organic soils," *Geoderma*, vol. 442, p. 116785, Apr. 2024.
- [10] M. A. G. B. Castro and T. J. Pinheiro, "The integration of astronomical-lunar cycles within computational models for family farming support applications," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 218, p. 108670, Mar. 2024.
- [11] J. E. Santos, "Sistemas digitais locais aplicados à conservação e manejo ecológico de solos amazônicos," *Cadernos de Agroecologia*, vol. 19, no. 1, pp. 88–97, Jan. 2024.
- [12] M. G. Al-Khafaji, "Decentralized edge architectures: Operating local IoT data nodes without continuous cloud synchronization," *Computer Networks*, vol. 245, p. 110370, May 2024.
- [13] O. R. Taylor, "Deploying light-weight containerized data infrastructure on single-board computers at the network edge using Docker Compose," *Software: Practice and Experience*, vol. 54, no. 4, pp. 712–729, Apr. 2024.
- [14] J. M. Rodriguez and A. Fischer, "Performance evaluation of ESP32-S3 microcontroller for multi-sensor edge data processing and serialization," *Microprocessors and Microsystems*, vol. 104, p. 104980, Mar. 2024.
- [15] H. C. Chen and Y. T. Lin, "Moving average and low-pass digital filtering algorithms embedded in low-cost microcontrollers for agricultural sensor noise reduction," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 73, pp. 1–12, Feb. 2024.
- [16] N. C. Benti, T. G. Assefa, and D. W. Gari, "Performance evaluation of InfluxDB and Grafana containerized environments for real-time industrial IoT time-series data visualization," *Journal of Big Data*, vol. 11, no. 1, pp. 14–32, Jan. 2024.
- [17] E. S. Gadelha and F. B. Lopes, "Bases de dados temporais aplicadas ao armazenamento de séries analíticas de variáveis agroclimáticas na Amazônia Legal," *Rev. Bras. Eng. Agrícola Ambiental*, vol. 28, no. 8, pp. 540–549, Aug. 2024.
- [18] G. O. Silva, L. O. Geisenhoff, R. C. Santos, A. C. Sanches, E. P. Gomes, and C. A. C. Machado, "IoT para uso agrícola: desenvolvimento de dispositivo autônomo de baixo custo para monitoramento climático em tempo real," *IRRIGA*, vol. 27, no. 4, pp. 774–789, 2022.