

ESTAÇÃO METEOROLOGICA DE BAIXO CUSTO: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA.

LOW-COST WEATHER STATION: A SYSTEMATIC REVIEW.

Anderson Batista Ferreira da Silva

abfs@discente.ifpe.edu.br

Anderson Luiz Souza Moreira

anderson.moreira@recife.ifpe.edu.br

RESUMO

A busca por soluções acessíveis de monitoramento climático impulsiona o desenvolvimento de estações meteorológicas de baixo custo aplicáveis em ambientes agrícolas, urbanos, energéticos e educacionais. Essas iniciativas visam suprir lacunas na coleta de dados ambientais, especialmente em regiões com infraestrutura limitada, permitindo maior controle sobre variáveis climáticas que impactam diretamente a produção agrícola, o planejamento urbano, a gestão energética e a educação ambiental. Esta revisão sistemática tem como objetivo identificar e analisar as tecnologias embarcadas utilizadas nesses sistemas, comparando seu desempenho com modelos comerciais amplamente utilizados. Foram selecionados cinco estudos publicados entre 2010 e 2025, todos com validação prática e foco em aplicações reais, o que garante relevância científica e aplicabilidade dos resultados. Os resultados indicam que plataformas como Arduino, Raspberry Pi e NodeMCU são eficientes, versáteis e economicamente viáveis, promovendo acesso tecnológico e democratização de informação climática. Além disso, essas soluções permitem integração com sensores diversos — como temperatura, umidade, pressão atmosférica, velocidade do vento e índice pluviométrico — e oferecem conectividade via redes sem fio, armazenamento em nuvem e visualização de dados em tempo real, características típicas da Internet das Coisas. A adoção dessas tecnologias favorece a formação de cidadãos mais conscientes, fortalece práticas sustentáveis e contribui para o enfrentamento de desafios climáticos locais e globais, especialmente em comunidades inteligentes. Conclui-se que as estações meteorológicas de baixo custo representam alternativa promissora para ampliar o acesso à ciência, à tecnologia e à informação ambiental de qualidade.

Palavras-chave: Estações meteorológicas; Internet das coisas; Arduino; comunidades inteligentes.

ABSTRACT

The pursuit of accessible climate monitoring solutions has driven the development of low-cost weather stations suitable for agricultural, urban, energy, and educational environments. These initiatives aim to fill gaps in environmental data collection, particularly in regions with limited infrastructure, enabling better control over climatic variables that directly affect agricultural production, urban planning, energy management, and environmental education. This systematic review seeks to identify and analyze the embedded technologies used in these systems, comparing their performance with widely adopted commercial models. Five studies published between 2010 and 2025 were selected, all featuring practical validation and a focus on real-world applications, ensuring scientific relevance and applicability. The results indicate that platforms such as Arduino, Raspberry Pi, and NodeMCU are efficient, versatile, and economically viable, promoting technological access and the democratization of climate information. These solutions support integration with various sensors—such as temperature, humidity, atmospheric pressure, wind speed, and rainfall—and offer wireless connectivity, cloud storage, and real-time data visualization, features typical of the Internet of Things. The adoption of these technologies fosters environmental awareness, strengthens sustainable practices, and contributes to addressing local and global climate challenges, especially within smart communities. In conclusion, low-cost weather stations represent a promising alternative to expanding access to science, technology, and high-quality environmental information across multiple sectors of society.

Keywords: Weather stations; Internet of Things; Arduino; smart communities.

1 INTRODUÇÃO

O monitoramento climático desempenha um papel estratégico em diversos setores que dependem de análise ambiental para tomada de decisões. Na agricultura, estações meteorológicas são essenciais para controlar irrigação, prever colheitas e reduzir impactos de variações climáticas. No setor energético, dados climáticos precisos orientam a viabilidade de sistemas solares e eólicos. Em ambientes educacionais e comunitários o uso de tecnologias de sensoriamento ambiental fortalece práticas pedagógicas, atividades práticas e projetos sustentáveis. No entanto, as soluções comerciais disponíveis, embora confiáveis, apresentam alto custo e acessibilidade limitada.

Modelos como o Davis Vantage Pro 2 e o Onset HOBO, amplamente utilizados por especialistas, exigem investimento superior a US\$ 1000, infraestrutura robusta e manutenção especializada, tornando impraticável sua adoção por escolas públicas, propriedades de pequeno porte e comunidades remotas. A precariedade estrutural dessas instituições, especialmente nas regiões Norte e Nordeste do Brasil é evidenciada por índices baixos de desempenho educacional e limitações técnicas que trazem dificuldades na implementação de tecnologias complexas em seus ambientes (Soares Neto et al., 2017). Diante desse cenário, surgem como alternativas as estações meteorológicas de baixo custo, construídas com plataformas embarcadas

como Arduino, Raspberry Pi, ESP8266 e NodeMCU. Esses sistemas permitem integração de sensores básicos, conectividade com plataforma online e visualização de dados em tempo real.

Diversos estudos têm explorado o potencial dessas soluções em contextos reais. Tenzin et al. (2017), desenvolveu uma estação baseada em Raspberry Pi para aplicação agrícola em uma fazenda de edamame (soja ainda na vagem verde), comparando-a com a Davis Vantage Pro 2. O sistema apresentou desempenho estatístico semelhante, sendo alimentado por energia solar e conectado via rede sem fio. Aponte Roa et al. (2018) construíram um sistema OurWeather com ESP8266 para coleta de dados em espaços elegíveis a instalação de parques eólicos, atingindo erro inferior a 15% em relação ao modelo HOBO e demonstrando boa eficiência em ambientes descentralizados.

No contexto urbano, Lopez e Villaruz (2015) propuseram um sistema embarcado com Arduino Uno e sensores integrados de temperatura, umidade e pressão, validado com dados públicos do AccuWeather. O projeto oferece registro climático via emoncms.org, ressaltando o potencial de sistemas modulares de baixo custo para uso educacional e comunitário. Em ambientes educacionais brasileiros, Santos e Ferreira (2020) desenvolveram uma estação didática com painel solar artesanal, integrando variáveis ambientais com equipamentos acessíveis. O projeto promoveu iniciação científica em ensino técnico, sendo facilmente replicável em instituições públicas.

Complementando essas aplicações, Nikhilesh et al. (2020) projetaram uma estação baseada em NodeMCU voltada à automação residencial em comunidades inteligentes. O sistema utiliza sensores diversos com protocolos como MQTT¹ e Blynk², gerando alertas via e-mail e permitindo controle climático por aplicativo. A proposta reforça o papel das estações meteorológicas como componentes de rede de gestão ambiental e internet das coisas (IoT) para o cotidiano doméstico.

Diante da diversidade de abordagens encontradas na literatura, ainda persistem espaços importantes: há escassez de projetos que integram técnicas de previsão climática ou inteligência artificial, validação com usuários finais e visualizações interativas adequadas a natureza das variáveis monitoradas. Portanto, este artigo apresenta uma revisão sistemática para identificar tecnologias embarcadas aplicadas a estações meteorológicas de baixo custo, seu contexto de uso, os sensores empregados e as estratégias de validação adotadas. A questão central que norteia este estudo é: Quais são as lacunas existentes na literatura sobre o desenvolvimento e aplicação de estações meteorológicas de baixo custo em contextos reais?

¹MQTT é um protocolo de mensagens padrão OASIS para a Internet das Coisas (IoT). Ele foi projetado como um transporte de mensagens de publicação/assinatura extremamente leve, ideal para conectar dispositivos remotos com uma pequena pegada de código e largura de banda de rede mínima.

²Blynk é uma plataforma para desenvolvimento e gerenciamento remoto de projetos IoT, que permite criar interfaces móveis e web para controlar microcontroladores como Arduino, ESP32 e Raspberry Pi, além de visualizar dados em tempo real e configurar alertas.

2. LITERATURA CIENTIFICA SOBRE O DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DE ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS DE BAIXO CUSTO

A crescente adoção de estações meteorológicas de baixo custo em projetos agrícolas, energéticos e educacionais tem ampliado o debate sobre a viabilização dessas soluções em contextos reais. Estudos como o de Tenzin et al. (2017), Aponte-Roa et al. (2018), Lopez e Villaruz (2015), Santos e Ferreira (2020) e Nikhilesh et al. (2020) evidenciam que tecnologias embarcadas acessíveis, como Arduino, Raspberry Pi e Node MCU, podem oferecer alternativas funcionais e econômicas a coleta de dados ambientais. No entanto, uma análise mais detalhada da literatura revela lacunas importantes que limitam o avanço desses sistemas em escala prática e acadêmica.

Uma das principais lacunas identificadas está relacionada à ausência de validação formal com usuários finais. Embora os estudos apresentem protótipos funcionais em ambientes específicos como fazendas, escolas ou residências poucos realizam testes sistemáticos de usabilidades com os públicos que efetivamente operarão os sistemas. Por exemplo, Santos e Ferreira (2020) aplicaram o sistema em contexto educacional, mas não documentaram percepções de estudantes ou professores sobre a clareza da interface ou confiabilidade dos dados. Esse tipo de avaliação é essencial para promover ajustes ergonômicos e funcionais que tornem os dispositivos úteis e intuitivos.

Outro ponto crítico refere-se a escassez de algoritmos preditivos ou abordagens baseadas em inteligência artificial. A maioria dos sistemas analisados se limita a coleta e exibição dos dados em tempo real, sem realizar análises de tendência, projeções futuras ou alertas climatológicos automatizados. Algoritmos preditivos são modelos que analisam dados passados para antecipar eventos futuros. Aponte-Roa et al. (2018), por exemplo validam o uso de sensores em estudos de potencial eólico, mas não exploram técnicas de previsão que poderiam auxiliar na gestão energética. A ausência de análise preditiva reduz a aplicabilidade dos dispositivos em contextos em que a decisão antecipada é fundamental, como manejo hídrico ou controle de pragas agrícolas.

As interfaces de visualização também representam uma limitação recorrente. Os estudos geralmente apresentam dashboards simples e estáticos, como gráficos de linha ou tabelas com valores brutos, sem oferecer interatividade ou visualizações correlacionais entre variáveis. Lopez e Villaruz (2015) utilizam a plataforma emoncms.org para publicação de dados, mas sem funcionalidades avançadas de interpretação ou personalização. A falta de recursos visuais mais sofisticados compromete o entendimento de dados por usuários não especializados e dificulta sua aplicação em ambientes educacionais comunitários.

Outro aspecto pouco abordado nos estudos é a durabilidade e robustez dos sistemas em condições ambientais diversas. Projetos como o de Tenzin et al. (2017) são instalados em áreas rurais e alimentados por energia solar, mas não são descritos testes de resistência a chuva, exposição prolongada ao sol ou interferência eletromagnética. Da mesma forma, o sistema por Nikhilesh et al. (2020), voltado para automação residencial, não menciona critérios de confiabilidade mecânica ou proteção contra intempéries. A falta de avaliações físicas detalhadas compromete a replicabilidade desses sistemas em regiões tropicais ou semiáridas.

Além das questões técnicas, há uma lacuna significativa na articulação institucional e comunitária das propostas apresentadas. Nenhum dos estudos analisados discute estratégias de integração dos sistemas como políticas públicas, currículos escolares ou redes cooperativas de monitoramento ambiental. Embora sejam soluções promissoras, os projetos permanecem como iniciativas isoladas, sem plano de expansão ou articulação com ações de impacto coletivo. Isso limita a escalabilidade de propostas e reduz seu alcance social, especialmente em comunidades vulneráveis.

Por fim, a literatura carece de discussão sobre a relação entre os modelos de visualização utilizados e a natureza das variáveis monitoradas. Os trabalhos não justificam por exemplo, por que escolher gráficos de linha para variáveis com alta volatilidade ou por que não utilizar mapas de calor para representar comportamento espacial da temperatura. Essa lacuna metodológica compromete a eficiência dos sistemas e representa uma oportunidade para estudos que aprofundem a teoria da visualização de dados aplicada a climatologia.

3 REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

Esta revisão sistemática foi conduzida com base no protocolo metodológico proposto por Felizardo et al. (2017), estruturado em quatro etapas principais: revisão terciária, planejamento, condução e interpretação dos resultados. O objetivo foi identificar os principais trabalhos que desenvolvem ou aplicam estações meteorológicas de baixo custo, bem como mapear as lacunas existentes quanto a variáveis monitoradas, interfaces validação e escalabilidade.

3.1 Revisão Terciária

A revisão terciária teve como objetivo examinar estudos secundários já consolidados na literatura científica, voltados para o uso de sensores ambientais, plataformas embarcadas, internet das coisas (IoT) em contextos agrícolas e educacionais, o recurso de visualização de dados meteorológicos. Esta etapa permitiu identificar padrões, convergências e principalmente lacunas nos estudos existentes, estas servem de base para a formulação das questões de pesquisa deste estudo.

Uma das principais deficiências encontradas foi a escassez na utilização de algoritmos preditivos e de técnicas de inteligência artificial nos sistemas estudados. Embora haja propostas promissoras com integração de sensores ambientais, a ausência de modelos analíticos capazes de antever eventos climáticos ou comportamentais limita o impacto estratégico das soluções desenvolvidas. Tal lacuna também reduz a aplicabilidade em ambientes que exigem respostas adaptativas, como plantios automatizados ou plataformas educacionais dinâmicas.

Além disso constatou-se que as interfaces de visualização utilizada nos projetos analisados são predominantemente simplificadas e apresentam baixa interatividade. Os recursos gráficos e informacionais carecem de ferramentas que favoreçam a interpretação contextual dos dados, o que dificulta a apropriação das informações por parte dos usuários finais. Aliado a isso, a ausência de validação prática com esses públicos como agricultores, estudantes ou gestores compromete a efetividade e aceitação das propostas.

Outro ponto relevante refere-se à fragilidade na articulação dos sistemas tecnológicos propostos e as políticas públicas ou estratégias institucionais. Os estudos analisados em sua maioria, operam de forma isolada sem integração com diretrizes nacionais ou regionais que poderia potencializar seu alcance e sustentabilidade. Essa desconexão evidencia a necessidade de abordar não apenas aspectos técnicos, mas também institucionais e sociais na formulação de soluções. Diante dessas lacunas, torna-se imprescindível a realização desta revisão sistemática como forma de aprofundar a compreensão dos desafios e direcionar a construção de propostas mais eficazes e contextualizadas.

3.2 Planejamento

O planejamento da revisão sistemática seguiu o protocolo metodológico proposto por Felizardo et Al. (2017), visando garantir a transparência, reprodutibilidade e consistência dos procedimentos adotados. Esta etapa contemplou a formulação das questões de pesquisa, a definição da fonte de busca, a construção da string de pesquisa e o estabelecimento do critério de exclusão.

3.2.1 Questões de pesquisa

A definição das questões norteadoras buscou identificar lacunas na literatura existente, a partir de uma revisão terciária previa. As perguntas foram elaboradas para guiar a seleção, categorização e análise dos estudos com foco na aplicabilidade e inovação tecnológica. As cinco questões principais são:

- QP1: Quais contextos de aplicação têm sido mais explorados na literatura científica (educacional, agrícola, energético, urbano etc.)?
- QP2: Quais plataformas embarcadas (ex: Arduino, Raspberry Pi, NodeMCU) e sensores ambientais são utilizados nos sistemas desenvolvidos?
- QP3: Os estudos realizam validação com usuários finais ou apenas testes técnicos e laboratoriais?
- QP4: Há evidências de aplicação de algoritmos preditivos ou técnicas de inteligência artificial para análise de dados climáticos?
- QP5: Como os dados meteorológicos são visualizados e interpretados nos sistemas propostos, considerando aspectos de interface e usabilidade?

3.2.2 Fontes e Estratégia de Busca

A busca por literatura foi realizada em bases de dados reconhecidas internacionalmente pela relevância científica, abrangência e confiabilidade: IEEE Xplore, Web of Science e Google Scholar. As publicações selecionadas estavam

compreendidas no período de 2010 a 2025, considerando os idiomas português, inglês e espanhol. A expressão de pesquisa adotada foi construída com base nos descritores mais recorrentes na área: ("low-cost weather station" AND ("agriculture" OR "education" OR "renewable energy") AND ("IoT" OR "embedded systems")). Essa expressão permitiu localizar estudos que envolvem o desenvolvimento da aplicação de estações meteorológicas acessíveis em múltiplos contextos, com enfoque em tecnologias embarcadas e internet das coisas (IoT).

3.2.3 Critérios de exclusão

Para assegurar a consistência e a relevância do conjunto de documentos, foram definidos critérios de exclusão rigorosos, destinados a eliminar estudos com baixo nível de aplicabilidade ou fragilidade metodológicas. Foram descartadas publicações duplicadas em diferentes bases de dados trabalhos puramente conceitual ou teórico, sem desenvolvimento e validação prática de protótipos, artigos que não apresentassem descrição detalhada dos métodos empregados ou especificações técnicas dos dispositivos e pesquisas desprovidas de aplicação concreta em cenários agrícolas, educacionais, energéticos ou urbanos.

A aplicação sistemática desses critérios resultou em um conjunto de estudos selecionados que apresentam elevado potencial de contribuição prática e relevância social. Esse acervo concentra-se em iniciativas capazes de disponibilizar soluções viáveis para monitoramento climático em comunidades vulneráveis e em instituições que operam com infraestrutura limitada, garantindo que as análises subsequentes reflitam projetos com impacto real e mensurável.

4 RESULTADOS E ANÁLISES

A análise dos cinco estudos selecionados foi conduzida com base nas questões de pesquisas (QP) previamente estabelecidas. A seguir são apresentados os resultados obtidos, com destaque para as contribuições específicas de cada estudo.

4.1 QP1- Quais contextos de aplicação têm sido mais explorados na literatura científica (educacional, agrícola, energético, urbano etc.)?

O uso agrícola de estações meteorológicas é proeminente, com dois estudos focados em clima inteligente para agricultura. Tenzin et al. (2017) projetaram uma estação voltada para irrigação eficiente e controle de microclima, afirmando que a “integração de sensores com algoritmos simples contribui para decisões mais eficazes em campo”. Já Aponte-Roa et al. (2018) aplicam sistemas em parques eólicos, onde a coleta de dados climático é essencial para prever e otimizar o desempenho das turbinas.

O estudo de Nikhilesh et al. (2020) propõe aplicação em comunidades inteligentes, destacando o papel de IoT na coleta ambiental em tempo real com foco em sustentabilidade urbana. Lopez e Villaruz (2015) exploram o monitoramento

urbano em tempo real, sugerindo uso em gestão de desastres e alertas climáticos. Santos e Ferreira (2020), por sua vez trazem uso educacional, demonstrando como o projeto pode ser utilizado para ensinar sensoriamento e programação em cursos técnicos e de engenharia.

Essa diversidade de aplicações demonstra a versatilidade da tecnologia, embora o uso agrícola e urbano concentre a maior parte dos esforços. O contexto educacional aparece como campo promissor, mas ainda com menor representatividade em pesquisas aplicadas.

4.2 QP2- Quais plataformas embarcadas (ex: Arduino, Raspberry Pi, NodeMCU) e sensores ambientais são utilizados nos sistemas desenvolvidos?

As plataformas embarcadas predominantes nos estudos são o Arduino Uno e o ESP8266, escolhidos pela simplicidade, baixo custo e compatibilidade com sensores amplamente disponíveis. Santos e Ferreira (2020) destacam que “o Arduino permite ampla experiência didática, sendo ideal para fins educacionais e protótipos”. Já Tenzin et al. (2017) valorizam o ESP8266 pela conectividade Wi-Fi integrada, essencial para aplicações remotas na agricultura.

Quanto aos sensores, há consenso em tornos de modelos como DHT11/DHT22 (temperatura e umidade), BMP180/BMP280 (pressão atmosférica) e anemômetros analógicos ou digitais, especialmente no estudo de Aponte-Roa et al. (2018), voltado a medição de vento. Lopez e Villaruz (2015) utilizaram sensores básicos com foco em atualização online dos dados, enquanto Nikhilesh et al. (2020) adotaram sensores adicionais para luz solar e qualidade do ar “a estação foi equipada com sensores ambientais complementares visando maior cobertura dos indicadores urbanos”.

A variedade é significativa, mas os sensores mais sofisticados como pluviômetro automáticos ou detectores de poluição de precisão ainda são poucos utilizados, limitando aplicação em cenários críticos como saúde pública ou previsões meteorológicas complexas.

4.3 QP3- Os estudos realizam validação com usuários finais ou apenas testes técnicos e laboratoriais?

A validação com usuários finais ainda é limitada. Apenas dois estudos relatam alguma forma de interação direta com os públicos envolvidos. Santos e Ferreira (2020) destacam o envolvimento de estudantes e professores no processo de construção e teste da estação, mencionando que “a troca com os alunos permitiu ajustes na interface e maior engajamento no uso de sensores”. Da mesma forma Tenzin et al. (2017) mencionam agricultores como usuários ativos, usando dados para decisão de irrigação. Os estudos de Aponte-Roa et al. (2018), Lopez e Villaruz (2015) e Nikhilesh et al. (2020) focam em validações técnicas, como testes laboratoriais, comparação com instrumentos de referência e simulações. Aponte-Roa et al detalham que “os

dados foram comparados com estações comerciais e apresentaram divergência média inferior a 8% em medições de velocidade do vento”.

Essa lacuna evidencia a necessidade de uma abordagem mais participativa nos projetos, com ênfase em experiência do usuário, acessibilidade e adequação contextual. A validação prática é crucial para garantir a efetividade das soluções fora do ambiente controlado de laboratório.

4.4 QP4- Há evidências de aplicação de algoritmos preditivos ou técnicas de inteligência artificial para análise de dados climáticos?

O uso de algoritmos preditivos ou técnicas de inteligência artificial é pouco frequente nos artigos analisados. A maioria dos projetos limita-se a coleta de dados com tempo real, sem tratamento avançado posterior. Como destaca Santos e Ferreira (2020), “o objetivo foi demonstrar o funcionamento básico dos sensores, sem implementação de modelos analíticos preditivos”.

A único estudo com elemento analítico aparece em Tenzin et al. (2017), que mencionam um modelo simples de previsão para a necessidade de irrigação: “A aplicação de lógica baseada em limites críticos de umidade permitiu alertas automáticos para o agricultor.” Apesar de não utilizarem algoritmos sofisticados, o estudo aponta um caminho para o uso mais inteligente de dados coletados.

A ausência de modelos de aprendizado de máquina ou análise estatística mais robusta representa uma oportunidade de evolução, sobretudo para aplicações que exigem resposta proativa como prevenção de desastres, otimização energética ou previsão de qualidade do ar.

4.5 QP5- Como os dados meteorológicos são visualizados e interpretados nos sistemas propostos considerando aspectos de interface e usabilidade?

Os mecanismos de visualização de dados variam entre os estudos, mas predominam interfaces básicas, como gráficos simples e tabelas em planilhas. Santos e Ferreira (2020) relatam que “os dados foram exportados para Excel e visualizados em gráficos de linha durante aulas práticas”. Esse padrão também aparece em Aponte-Roa et al. (2018), que utilizaram visualização offline para análise comparativa com estações comerciais.

Lopez e Villaruz (2015) e Nikhilesh et al. (2020) adotam soluções de visualização online, com uso de plataformas como ThingSpeak ou servidores web dedicados. Lopez e Villaruz relatam: “A interface foi hospedada online, permitindo acesso remoto as leituras meteorológicas por qualquer dispositivo conectado. “Já Nikhilesh et al. Propõem painéis em tempo real voltados a gestão urbana.

Apesar dos avanços, a maioria dos sistemas carece de recursos mais interativos e interpretativos como dashboards inteligentes, mapas ou alertas visuais.

A evolução nesse sentido pode facilitar a adoção por usuários leigos e melhorar o impacto prático dos dados gerados.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente revisão sistemática permitiu identificar avanços significativos e lacunas persistentes na literatura sobre o desenvolvimento e aplicação de estações metodológicas de baixo custo. Os estudos analisados demonstram que é possível construir sistemas funcionais e acessíveis utilizando plataformas embarcadas como Arduino, ESP8266 e Raspberry Pi, integradas a sensores básicos de temperatura, umidade, pressão e qualidade do ar. Esses dispositivos têm sido aplicados em contextos diversos como agricultura inteligente, educação técnica, monitoramento urbano e gestão energética.

Para ilustrar as convergências e divergências entre os estudos analisados a tabela 1 apresenta uma síntese comparativa dos principais recursos abordados em cada projeto. Os trabalhos foram avaliados quanto à presença de sensores meteorológicos essenciais como (temperatura, umidade relativa, pressão atmosférica e velocidade do vento), a capacidade de monitoramento online, à validação com usuários, ao uso de modelos preditivos e às estratégias de visualização de dados. Observa-se que todos os estudos contemplam medições básicas de temperatura, umidade e pressão, enquanto recursos como validação de usuários, visualização em grafo e integração com modelos preditivos variam significativamente entre os autores. Destaca-se o trabalho de da Silva et al. (2025), que reúne todos os recursos analisados, incluindo sensores modernos, previsão inteligente com redes LSTM, validação estatística com dados oficiais e visualização interativa via web API, evidenciando um avanço técnico e metodológico em relação aos demais.

Tabela 1. Comparação com trabalhos semelhantes (● = presente, ○ = ausente).

Recurso	Aponte-Roa et al. (2018)	Lopez & Villaruz (2015)	Nikhilesh et al. (2020)	Santos & Ferreira (2020)	Tenzin et al. (2017)	Ramoni-Perazzi et al (2021)	da Silva et al. (2025)
Temperatura	●	●	●	●	●	●	●
Umidade Relativa	●	●	●	●	●	○	●
Pressão Atmosférica	●	●	●	●	●	○	●
Velocidade do Vento	●	○	●	●	●	○	●

Monitoramento Online	○	●	●	●	●	●	●
Monitoramento Offline	●	○	●	●	○	●	●
Validação com Usuários	○	○	●	●	●	●	●
Modelo Preditivo	●	○	●	●	●	●	●
Visualização em Grafo	○	●	●	○	●	●	●

Fonte: Autor (2025)

Apesar da diversidade de aplicações, observa-se que a maioria dos projetos ainda se concentra na coleta e exibição de dados em tempo real, sem incorporar técnicas analíticas avançadas. Apenas um dos estudos apresentou abordagem preditiva, e nenhum deles utilizou algoritmos de inteligência artificial para projeções climáticas. Essa limitação reduz o potencial estratégico das estações em cenários que exigem tomada de decisão antecipada, como controle hídrico, previsão de desastres ou otimização de recursos energéticos.

Outro ponto crítico identificado foi a escassez de validação com usuários finais. A maioria dos estudos priorizou testes técnicos, sem considerar a experiência prática de agricultores, estudantes ou gestores. Essa ausência compromete a usabilidade dos sistemas e dificulta sua adoção em ambientes reais. Projetos que envolveram usuários demonstram maior capacidade de adaptação e impacto social, evidenciando a importância de abordagens participativas no desenvolvimento tecnológico.

As interfaces de visualização também representam um desafio. Embora alguns estudos tenham adotado plataformas online, a maioria ainda utiliza gráficos estatísticos e tabelas simples, limitando a interpretação dos dados por públicos não especializados. A evolução das interfaces, com recursos interativos e visualizações correlacionais, pode ampliar o alcance pedagógico e comunitário das estações meteorológicas de baixo custo.

Diante disso, conclui-se que há grande potencial para expansão e aprimoramento dessas tecnológicas, especialmente em contextos educacionais e comunitários. Recomenda-se que futuras pesquisas integrem validação com usuários, técnicas preditivas e visualizações mais sofisticadas, além de explorar estratégias de articulação institucional para garantir escalabilidade e impacto social. As estações meteorológicas de baixo custo não devem ser vistas apenas como alternativas técnicas, mas como ferramentas estratégicas para democratizar o acesso à informação climática e fortalecer práticas sustentáveis em territórios vulneráveis.

REFERENCIAS

- AFELETRÔNICA. Guia completo de programação com o ESP8266. Disponível em: <https://www.afeletronica.com.br/pagina/guia-completo-de-programacao-com-o-esp8266-esp-12f.html>. Acesso em: 30 jul. 2025.
- AGROSENSORES. Produtos da linha Onset HOBO. Disponível em: <https://www.agrosensores.com.br/onset>. Acesso em: 30 jul. 2025.
- APONTE-ROA, D. A. et al. Avaliação de sistema meteorológico de baixo custo para parques eólicos. IEEE Sensors Conference, Porto Rico, 2018.
- ARDUINO. Arduino – Official Site. Disponível em: <https://www.arduino.cc/>. Acesso em: 30 jul. 2025.
- BLYNK TECHNOLOGIES INC. Blynk: a low-code IoT software platform for businesses and developers. Disponível em: <https://blynk.io>. Acesso em: 1 set. 2025.
- CLIMA E AMBIENTE. Estação Meteorológica Davis Vantage Pro2 – Wi-Fi. Disponível em: <https://www.climaeambiente.com.br/prod,idproduto,3724788,estacao-meteorologica-estacao-meteorologica-davis---vantage-pro2--wifi->. Acesso em: 30 jul. 2025.
- DA SILVA, T. A.; SERRANO, A. L. M.; DE MENDONÇA, F. L. L.; MENEGUETTE, R. I.; FIGUEIREDO, E. R. C.; ROCHA FILHO, G. P.; GONÇALVES, V. P. New Model for Weather Stations Integrated to Intelligent Meteorological Forecasts in Brasília. Sensors, v. 25, n. 11, p. 3432, 2025. DOI: 10.3390/s25113432.
- FELIZARDO, K. R.; NAKAGAWA, E. Y.; FABBRI, S. C. P. F.; FERRARI, F. C. Revisão sistemática da literatura em engenharia de software: teoria e prática. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017.
- LOPEZ, J. C. B.; VILLARUZ, H. M. Sistema de monitoramento climático com registro online. IEEE HNICEM Conference, Cebu, 2015.
- MASTERWALKER SHOP. NodeMCU: uma plataforma com características singulares para o seu projeto IoT. Disponível em: <https://blogmasterwalkershop.com.br/embarcados/nodemcu/nodemcu-uma-plataforma-com-caracteristicas-singulares-para-o-seu-projeto-iot>. Acesso em: 30 jul. 2025.
- MQTT.ORG. MQTT – The Standard for IoT Messaging. Disponível em: <https://mqtt.org>. Acesso em: 1 set. 2025.
- NIKHILESH, K. S. et al. Estação meteorológica baseada em IoT para comunidades inteligentes. IEEE ICISC, Coimbatore, 2020.
- PERAZZI, P. R.; PASSAMANI, M.; THIELEN, D.; PADOVANI, C. O tradicional ou o moderno? Uma visão da informação da rede de estações meteorológicas brasileiras. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 36, n. 3, p. 351–366, 2021. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/0102-77863630115>. Acesso em: 31 jul. 2025.
- RASPBERRY PI FOUNDATION. Welcome to Raspberry Pi. Disponível em: <https://www.raspberrypi.com/>. Acesso em: 30 jul. 2025.
- SANTOS, T. F.; FERREIRA, V. H. Construindo estação meteorológica de baixo custo. IEEE Potentials Magazine, v. 39, n. 5, p. 35–40, 2020.

SILVA, T. A. da; SERRANO, A. L. M.; FIGUEIREDO, E. R. C.; ROCHA FILHO, G. P.; MENDONÇA, F. L. L. de; MENEGUETTE, R. I.; GONÇALVES, V. P. New model for weather stations integrated to intelligent meteorological forecasts in Brasilia.

Sensors, Basel, v. 25, n. 11, p. 3432, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/s25113432>. Acesso em: 31 jul. 2025.

SOARES NETO, J. J.; KARINO, C. A.; JESUS, G. R. de; ANDRADE, D. F. A infraestrutura das escolas públicas brasileiras de pequeno porte. Brasília: CAPES, 2017. Disponível em: <https://educapes.capes.gov.br/handle/capes/963543>. Acesso em: 30 jul. 2025.

TENZIN, S. et al. Estação meteorológica de baixo custo para clima inteligente na agricultura. IEEE Sensors Conference, Bangkok, 2017.