



Fonseca, A. C. N. da¹; Figueiroa, E.²; Coelho, G. P. C.²; Andrade, J. P.²; Ferreira, E. V. L.²; Ribeiro, L. A.³

¹Universidade Federal Rural de Pernambuco, Brasil

²Scinet Institute, Brasil ³Netcon Americas, Brasil

Development of an IoT Platform for Soil and Climate Monitoring in Irrigated Fruit Production in the Semi-Arid Region of Pernambuco

17th International Conference on Precision Agriculture and 11th Brazilian Congress on Precision and Digital Agriculture

13-15 July 2026

Porto Alegre, Brazil

Abstract.

Irrigated fruit farming in the semi-arid region of Pernambuco, particularly in the Petrolina hub, holds significant economic importance and is highly dependent on irrigation due to irregular rainfall and high evaporative demand. Despite technological advances, management is still often based on empirical practices and sporadic monitoring, which can compromise water-use efficiency and intensify issues such as soil salinization. In this context, this study presents the development of an Internet of Things (IoT)-based platform for integrated soil and climate monitoring, aimed at supporting decision-making in irrigated grape cultivation systems. The system architecture uses a wireless sensor network (WSN) based on the LoRaWAN protocol, suitable for agricultural environments with large spatial extent and limited connectivity infrastructure. Soil monitoring is carried out using multiparametric HC-V10 sensors, capable of measuring volumetric water content (VWC), temperature, electrical conductivity (EC), pH, and macronutrients (NPK), enabling the simultaneous acquisition of relevant physicochemical variables for agricultural management. Climate monitoring is performed in an integrated manner, combining data from a low-cost weather station developed in this study with complementary information from open-access meteorological databases. This hybrid approach provides greater robustness and continuity of time series, including variables such as precipitation, air temperature, relative humidity, solar radiation, evapotranspiration, and growing degree days. Data are collected at multiple temporal scales (real-time, 15-minute intervals, and daily data) and processed in the cloud, allowing visualization through interactive dashboards, alert generation, and automated management recommendations. A key feature is the incorporation of dynamic calibration algorithms to correct for the influence of salinity and pH on sensor readings, thereby increasing data reliability. The system is currently at Technology Readiness Level (TRL) 6, undergoing validation in a controlled environment, with a focus on variable calibration and the definition of operational parameters for future field application, including spatial monitoring strategies. Preliminary results indicate that integrating soil and climate data enhances irrigation management, promoting greater water-use efficiency and providing more robust support for decision-making under semi-arid conditions.

Keywords.

Internet of Things (IoT); Wireless sensor networks; Soil sensing; Decision-support systems; Precision irrigation

INTRODUÇÃO

O Vale do São Francisco, com destaque para os municípios de Petrolina-PE e Juazeiro-BA, consolidou-se como um polo de produção de frutas, especialmente manga e uva, abastecendo tanto o mercado interno quanto o mercado internacional. O sucesso produtivo dessa região está diretamente relacionado à irrigação, uma vez que as condições climáticas semiáridas, caracterizadas pela irregularidade das chuvas e elevada demanda evaporativa, tornam o suprimento hídrico um fator determinante para a viabilidade agrícola. Além de possibilitar o cultivo em larga escala, a irrigação contribui para o aumento da produtividade, da qualidade dos frutos e da geração de emprego e renda, fortalecendo as economias locais. Entretanto, a sustentabilidade desse modelo produtivo depende do uso eficiente dos recursos hídricos, uma vez que desafios relacionados à disponibilidade de água, aos custos de produção e aos impactos ambientais exigem estratégias de manejo cada vez mais eficientes e tecnicamente embasadas (Vieira & Almeida, 2022).

Apesar do potencial produtivo da fruticultura irrigada no semiárido, a eficiência do manejo hídrico permanece como um dos principais desafios para a sustentabilidade dos sistemas agrícolas da região. No caso da viticultura, o manejo da água é influenciado por uma complexa interação entre fatores climáticos e edáficos, incluindo temperatura, precipitação, evapotranspiração, teor de água no solo e distribuição do sistema radicular, os quais afetam diretamente o crescimento das plantas, a produtividade e a qualidade dos frutos. Entretanto, a adoção dessas práticas depende do acesso a informações confiáveis e atualizadas sobre as condições climáticas, o estado hídrico do solo e da planta, bem como de ferramentas capazes de auxiliar produtores e técnicos na interpretação desses dados e na tomada de decisões relacionadas ao manejo da irrigação (Gutiérrez et al., 2025).

Apesar dos avanços obtidos no manejo da irrigação, grande parte dos sistemas produtivos ainda depende de métodos convencionais de monitoramento, frequentemente caracterizados por avaliações pontuais e limitada capacidade de resposta às variações espaciais e temporais das condições de cultivo. Além disso, a crescente variabilidade climática impõe desafios adicionais ao manejo da irrigação, exigindo estratégias mais dinâmicas e adaptativas do que aquelas tradicionalmente empregadas. Outro fator limitante está relacionado à fragmentação das informações utilizadas na tomada de decisão, uma vez que dados de solo, clima e irrigação são frequentemente obtidos e analisados de forma isolada, dificultando uma compreensão integrada das condições do sistema produtivo. Como consequência, decisões de manejo ainda são frequentemente baseadas em critérios empíricos, o que pode levar ao uso ineficiente da água e à redução da sustentabilidade agrícola. Nesse cenário, a integração de múltiplas fontes de dados em plataformas capazes de fornecer informações consolidadas e recomendações operacionais tem sido apontada como uma estratégia promissora para reduzir incertezas e aumentar a eficiência da tomada de decisão em sistemas irrigados.

O avanço das tecnologias digitais têm impulsionado novas abordagens para o monitoramento e manejo de sistemas agrícolas, especialmente em cenários onde a eficiência no uso dos recursos naturais é fundamental para a sustentabilidade da produção. Nessa conjuntura, a Internet das Coisas (IoT), associada ao uso de sensores e ferramentas de análise de dados, possibilita o monitoramento contínuo de variáveis ambientais e agronômicas, fornecendo informações em tempo real sobre as condições de solo, clima e cultivo (Alvar & Vijayasuria, 2024). Esses sistemas permitem integrar informações provenientes de sensores, bases históricas e condições ambientais, gerando recomendações relacionadas à irrigação, fertilização e manejo das culturas. Ao considerar simultaneamente diferentes variáveis do sistema produtivo,

essas ferramentas favorecem a adoção de práticas de manejo específicas para cada local, aumentando a eficiência do uso dos recursos e reduzindo incertezas na tomada de decisão (Molin et al., 2019).

Adicionalmente, sistemas automatizados e modelos baseados em aprendizado de máquina têm ampliado a capacidade de previsão das necessidades hídricas das culturas, contribuindo para a otimização do uso da água, a redução de desperdícios e o aumento da produtividade agrícola (Sobya et al., 2025; Dilip et al., 2026). A combinação entre monitoramento em tempo real, análise preditiva e integração de dados representa uma alternativa promissora para o aprimoramento da gestão agrícola em ambientes irrigados. Portanto, o desenvolvimento de soluções cada vez mais integradas e acessíveis tem ampliado o potencial dessas tecnologias para promover sistemas agrícolas mais produtivos, eficientes e sustentáveis.

Diante da crescente demanda por estratégias que promovam o uso eficiente da água e aprimorem a tomada de decisão em sistemas agrícolas irrigados, torna-se necessária a adoção de ferramentas capazes de integrar informações provenientes de diferentes fontes em um ambiente único e de fácil interpretação. Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo desenvolver uma plataforma digital para monitoramento e apoio à tomada de decisão na cultura da videira, integrando dados climáticos, edáficos e agrônômicos em uma interface interativa. A plataforma foi concebida para disponibilizar informações relevantes ao manejo da irrigação e das condições de cultivo, contribuindo para uma gestão mais eficiente dos recursos hídricos e para o fortalecimento das práticas de agricultura de precisão no contexto da viticultura irrigada do semiárido brasileiro.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de aplicação da plataforma

A área de estudo corresponde à Fazenda FP Fittipaldi, localizada no município de Petrolina, Pernambuco, Brasil ($9^{\circ}20'55''$ S; $40^{\circ}39'52''$ W), inserida na região do Vale do São Francisco, um dos principais polos de produção de uvas de mesa do país (Fig 1). A propriedade foi adotada como área de referência para o desenvolvimento e futura implementação da plataforma digital proposta neste estudo, uma vez que representa um sistema produtivo característico da viticultura irrigada do semiárido brasileiro.

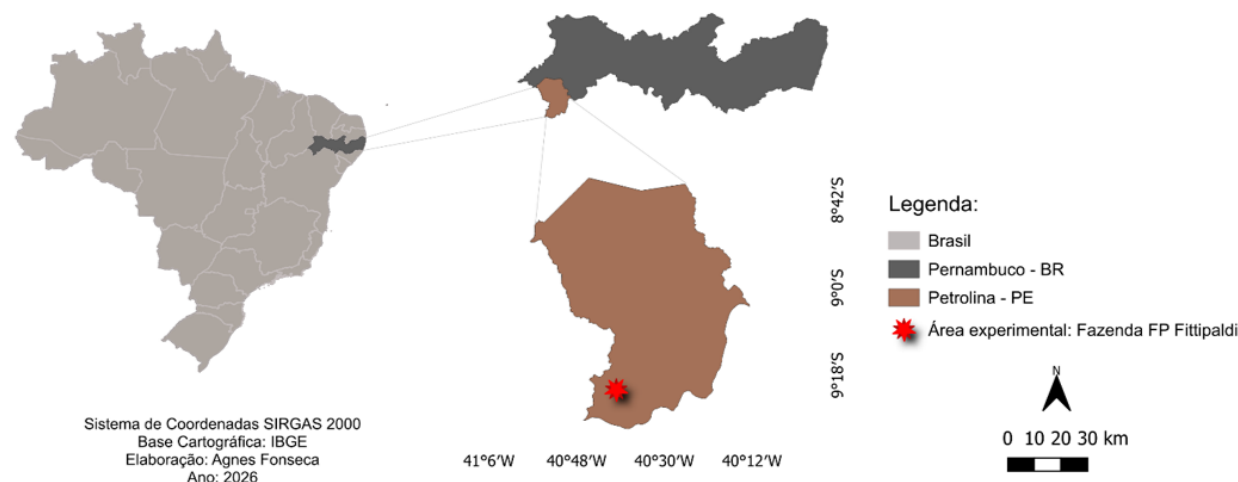


Fig. 1 Localização da área experimental utilizada para o desenvolvimento da plataforma de monitoramento agrícola em Petrolina, Pernambuco, Brasil. Fonte: Elaborado pelos autores a partir de dados do IBGE e QGIS (2026).

Situada no semiárido nordestino, a região apresenta clima caracterizado por elevadas temperaturas e baixa precipitação ao longo do ano. As temperaturas médias variam entre 24 °C e 30 °C, podendo ultrapassar 35 °C nos períodos mais quentes, enquanto a precipitação anual situa-se entre 600 e 800 mm, concentrando-se predominantemente entre os meses de novembro e março (Silva et al., 2024; Santos Júnior et al., 2023). Essas condições tornam a irrigação indispensável para a produção agrícola e reforçam a necessidade de monitoramento contínuo das variáveis ambientais relacionadas ao manejo da cultura.

Na propriedade são cultivadas as variedades de uva de mesa Sugar Crisp e BRS Vitória, conduzidas sob sistema de irrigação localizada. Os solos da área apresentam textura predominantemente franco-arenosa a areia franca, característica que influencia diretamente a dinâmica da água no perfil do solo e exige maior atenção ao manejo da irrigação (Zega, 2024; Hura & Gulo, 2024). Dessa forma, as características climáticas, edáficas e produtivas da fazenda foram consideradas na definição dos requisitos, parâmetros e funcionalidades da plataforma, visando adequar seu desenvolvimento às demandas da viticultura irrigada.

Arquitetura do Sistema

A plataforma foi desenvolvida com uma arquitetura modular orientada a serviços, composta por frontend web, API backend, banco de dados relacional, serviços de integração, WebSocket, mensageria assíncrona e módulo de recomendações agronômicas, conforme ilustrado na Fig. 2. O frontend utiliza React, Next.js e Tailwind CSS, sendo responsável pela visualização das medições, mapas, sensores, microclima, acúmulo térmico e recomendações. O backend, implementado em NestJS com TypeScript, expõe endpoints REST, centraliza a lógica de negócio e acessa o banco PostgreSQL por meio do Prisma ORM.

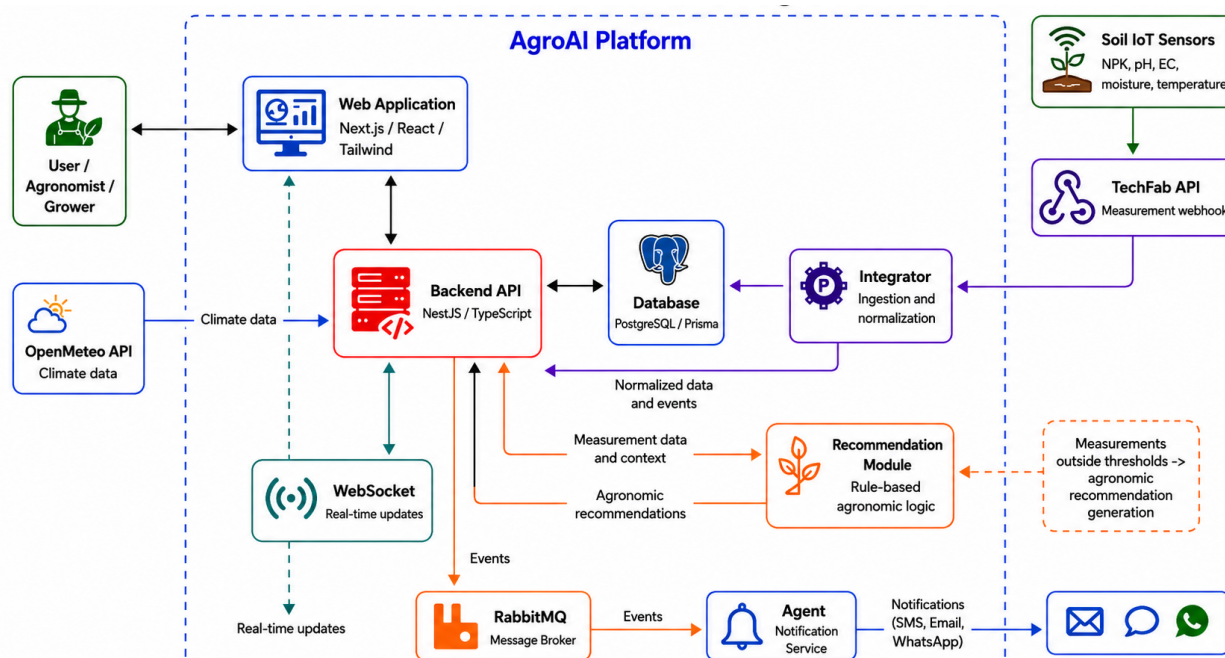


Fig. 2 Arquitetura modular da plataforma, composta por aplicação web, API backend, banco de dados, serviço de integração, comunicação contínuo via WebSocket, mensageria assíncrona e módulo de recomendações agronômicas, além das integrações com sensores IoT do solo, API climática e canais externos de notificação.

As medições oriundas dos sensores são recebidas por um serviço Integrator, que processa os dados enviados por webhook, normaliza os valores, persiste as leituras e verifica sua aderência aos limites agrônômicos configurados. As variáveis edáficas monitoradas incluem umidade volumétrica do solo (VWC), temperatura do solo, condutividade elétrica (CE), pH e

macronutrientes N, P e K. A frequência de coleta é definida conforme a dinâmica de cada variável: VWC em intervalos de 5–30 min, temperatura do solo entre 30–60 min, CE entre 6 h e 1 dia, pH com frequência diária e NPK em leituras diárias ou em dias alternados, especialmente após eventos de adubação. O modelo relacional contempla sensores, tipos de sensores, datasheets, medições e limites operacionais. A plataforma também integra dados climáticos externos, incluindo precipitação, temperatura do ar, umidade relativa, vento, radiação solar, evapotranspiração, coeficiente de cultura (Kc) e graus-dia, ampliando a contextualização das condições monitoradas.

Quando uma variável monitorada apresenta comportamento fora da faixa esperada, o sistema estrutura o contexto do evento e aciona o módulo de recomendações agrônômicas, cujo fluxo é apresentado na Fig. 3. Esse módulo é baseado em limites configurados, regras agrônômicas e conhecimento definido por especialistas, utilizando informações como medições recentes, localização do sensor, estágio da cultura e contexto histórico para gerar recomendações agrônômicas acionáveis. Tais recomendações podem apoiar decisões relacionadas à irrigação, correção do solo e manejo nutricional. Eventos críticos também podem ser publicados em filas RabbitMQ e consumidos por um Agent de notificações, responsável por encaminhar alertas por canais externos. A implantação é realizada com Docker e Docker Compose em ambiente AWS, com versionamento das imagens, separação entre ambientes e mecanismos de logging para rastreabilidade e operação contínua.

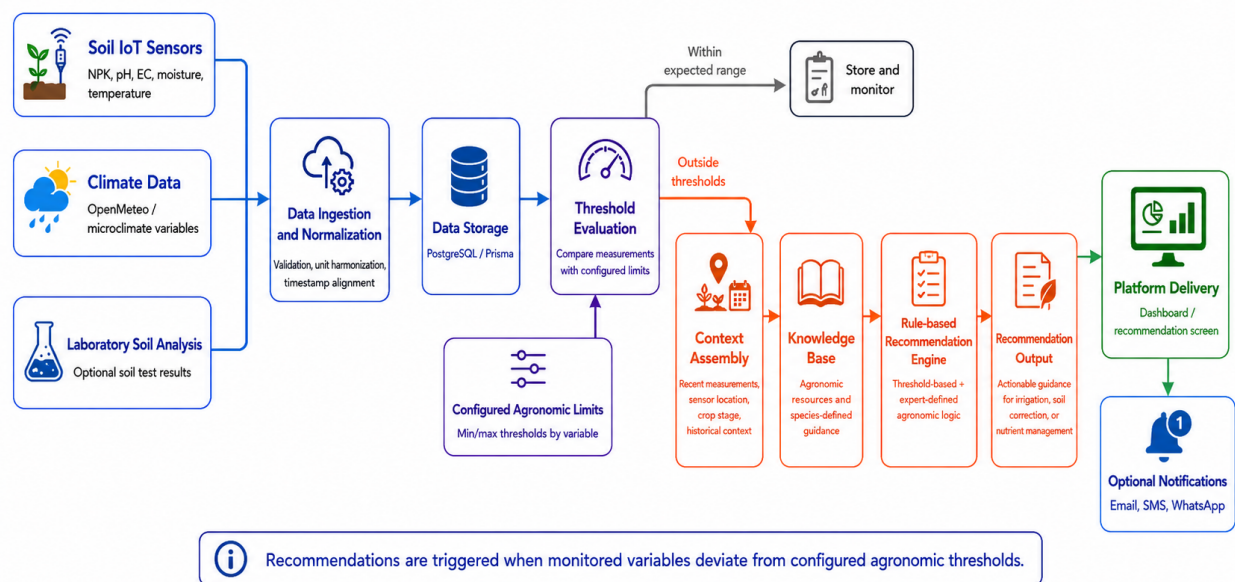


Fig. 3 Fluxo de geração das recomendações agrônômicas a partir das variáveis monitoradas, incluindo ingestão e normalização dos dados, armazenamento, avaliação de limites agrônômicos configurados, montagem de contexto, uso de base de conhecimento e geração de recomendações baseadas em regras e conhecimento especialista.

Sistema de Monitoramento de Solo

O monitoramento dos atributos do solo foi realizado utilizando um sensor multiparamétrico modelo CWT-SOIL-NPKPHCTH-S, com comunicação RS485, capaz de medir temperatura, umidade, condutividade elétrica (CE), potencial hidrogeniônico (pH) e concentrações estimadas de nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K) no solo. O equipamento possui proteção IP68 e foi desenvolvido para aplicações em agricultura de precisão e monitoramento contínuo do solo (ComWinTop, Shenzhen, China).

Essas medições permitem avaliar simultaneamente o teor de água disponível, a salinidade/fertilidade e a acidez do solo, fundamentais para manejo hídrico e adubação. Por

exemplo, a umidade volumétrica (0–100 %) indica a quantidade de água no solo e é crítica para decidir irrigações. A CE (0–20.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$) reflete a concentração de sais: altos valores indicam salinização ou excesso de fertilizantes, afetando a condutividade do solo. O pH (3–9 $\pm 0,3$) mede a acidez do solo, controlando a disponibilidade de nutrientes às plantas (solos ácidos ou alcalinos limitam absorção). As medições de N, P e K (1–1999 mg/kg) fornecem estimativas rápidas dos macronutrientes.

A escolha da frequência de coleta depende da dinâmica de cada variável. Em geral, umidade e temperatura do solo variam diuturnamente (após chuvas ou irrigação), exigindo leituras mais frequentes (ex.: a cada 5–30 minutos) para capturar flutuações rápidas e otimizar irrigação. Essas variáveis podem ser monitoradas em modo contínuo para detecção imediata de eventos em intervalos curtos em aplicações portáteis.

Mudanças acentuadas da condutividade elétrica e pH do solo ocorrem após aplicações de fertilizantes ou regimes de irrigação salina, como demonstrado por Silva et al. (2012), no seu estudo sobre águas residuais de laticínios, verificou-se que níveis mais altos de nitrogênio dos fertilizantes resultaram em aumento da CE do solo durante os períodos de seca, enquanto o pH foi maior em condições mais úmidas. Leituras em modo intervalado (p.ex. horárias ou diárias) geralmente são suficientes para mapear tendências de salinidade e acidez sem sobrecarga de dados.

Os nutrientes N, P e K do solo também variam gradualmente, sobretudo após adubações, de modo que amostragens diárias ou mesmo em dias alternados podem ser adequadas. Avanços recentes nos sensores de NPK têm possibilitado o acompanhamento em tempo real dos nutrientes do solo, diminuindo a necessidade de coletas e análises tradicionais realizadas em laboratório (Dattatreya et al., 2024). A disponibilidade imediata dessas informações permite identificar alterações nas condições do solo e realizar intervenções de manejo de maneira mais ágil.

Tabela 1 Variáveis monitoradas pela plataforma de monitoramento agrícola, frequência de leitura, modo de aquisição dos dados e justificativa agronômica.

Variável	Frequência	Modo de Leitura	Justificativa
Umidade do Solo	5–30 min	Contínua (ou curta)	Variações rápidas (chuva/irrigação)
Temperatura	30–60 min	Contínua	Ciclo diurno influenciando germinação e microrganismos
CE (condutividade)	6 h – 1 dia	Intervalada	Variações moderadas; indica salinidade/fertilidade
pH do Solo	1 dia	Intervalada	Mudança lenta; controla disponibilidade de nutrientes
N, P, K	1 dia	Intervalada	Alterações após adubação; insumos macro (usar leituras como referência)

Monitoramento Climático

O monitoramento climático foi estruturado a partir de uma abordagem híbrida, combinando medições locais obtidas por uma estação de baixo custo com dados meteorológicos provenientes de bases abertas. As medições coletadas pela estação são associadas a recursos específicos na API da plataforma, como temperatura, umidade, precipitação, pressão, radiação solar, velocidade do vento e direção do vento. Essa padronização permite que os dados sejam armazenados como séries temporais, vinculados ao ponto de monitoramento e disponibilizados para dashboards, análises históricas e integração com outros sistemas. A frequência de coleta pode ser configurada conforme a dinâmica da variável monitorada, permitindo intervalos menores

para variáveis de maior variabilidade, como temperatura, umidade e radiação solar.

Além dos dados locais, o sistema incorpora informações de bases meteorológicas abertas por meio de rotinas automatizadas no backend. A arquitetura da plataforma inclui serviços agendados capazes de consultar APIs externas, como OpenMeteo, processar dados meteorológicos diários, calcular variáveis derivadas, como grau-dia, e persistir essas informações no banco de dados. Essa camada complementa as medições locais com dados regionais, históricos ou estimados, ampliando a robustez da análise climática.

As medições de temperatura do ar, umidade relativa e precipitação foram obtidas por meio de um pluviômetro profissional de báscula modelo PL-1 integrado a sensor DHT22. A precipitação é medida pelo mecanismo de báscula, no qual cada basculamento corresponde a um volume conhecido de água, gerando pulsos contabilizados pelo sistema. O equipamento apresenta resolução de 0,25 mm, equivalente a quatro pulsos por milímetro de chuva, permitindo o acompanhamento de eventos pluviométricos e sua correlação com a umidade do solo. A temperatura do ar é registrada com resolução de 0,1 °C e a umidade relativa com resolução de 1%, contribuindo para a caracterização das condições atmosféricas locais.

A velocidade e a direção do vento foram monitoradas por um anemômetro de conchas associado a uma biruta eletrônica. O anemômetro opera pela rotação das conchas provocada pelo escoamento do ar, gerando pulsos elétricos proporcionais à velocidade do vento. A direção é obtida por sensor resistivo, permitindo a identificação angular do vento em uma faixa de 0° a 360°. Essas informações são relevantes para análises de evapotranspiração, dispersão de partículas, balanço energético e identificação de condições climáticas adversas.

Um dos diferenciais do sistema foi o desenvolvimento de um piranômetro de baixo custo para monitoramento experimental da radiação solar. O protótipo foi baseado em um fotodiodo BPV10NF, utilizado como elemento sensor para converter a radiação incidente em corrente elétrica. Essa corrente é convertida em variação de tensão por meio de um resistor de carga de 33 Ω e, em seguida, condicionada pelo módulo HX711, que atua como amplificador e conversor analógico-digital. O sinal digitalizado é lido pelo microcontrolador ESP32 Heltec V3, responsável pela aquisição, tratamento básico e envio das leituras à infraestrutura da estação meteorológica.

Dessa forma, a abordagem híbrida adotada combina a resolução espacial das medições obtidas diretamente em campo com a abrangência temporal e regional das bases abertas. Enquanto a estação meteorológica de baixo custo registra as condições microclimáticas específicas da área monitorada, os dados externos permitem contextualizar essas medições, apoiar comparações, preencher lacunas operacionais e fortalecer análises voltadas ao manejo agrícola. Essa integração torna o monitoramento climático mais completo, permitindo avaliar eventos de chuva, variações térmicas, disponibilidade de radiação, comportamento do vento e sua relação com as condições de solo e cultivo.

Integração e Processamento de Dados

Os dados de solo e clima foram integrados à plataforma, voltada ao monitoramento ambiental em condições de campo. As variáveis climáticas foram obtidas por meio de uma estação meteorológica de baixo custo, composta por sensores para precipitação, temperatura do ar, umidade relativa, velocidade e direção do vento e radiação solar. As variáveis de solo foram coletadas pelo sensor multiparamétrico NPKPHCTH-S, responsável pela medição de umidade, temperatura do solo, condutividade elétrica, pH e concentrações de nitrogênio, fósforo e potássio.

Os dados coletados em campo foram integrados à plataforma por meio de um fluxo estruturado de aquisição, transmissão, armazenamento e disponibilização das informações. Após a aquisição, os dados foram transmitidos por uma infraestrutura IoT com comunicação LoRa e encaminhados para a plataforma em nuvem.

Cada medição foi organizada de forma padronizada, contendo informações como identificação do dispositivo, variável monitorada, valor medido, unidade, registro temporal e nível de severidade. Essa estrutura permitiu integrar os dados meteorológicos e de solo em um banco de dados unificado, mantendo o histórico das medições por sensor, variável e ponto de monitoramento.

Na etapa de processamento, as medições recebidas foram validadas, organizadas e armazenadas no backend da aplicação. Quando necessário, os dados passaram por tratamentos básicos antes do registro, como ajustes de valores inconsistentes e verificação de limites previamente definidos. Caso alguma variável ultrapassasse faixas configuradas, o sistema poderia gerar eventos de alerta para apoiar o acompanhamento das condições ambientais.

Os dados processados foram disponibilizados em dashboards digitais, com gráficos, indicadores e visualizações temporais das variáveis monitoradas. Dessa forma, os registros brutos dos sensores foram transformados em informações estruturadas, permitindo interpretar a relação entre clima e solo, acompanhar mudanças no ambiente ao longo do tempo e apoiar decisões relacionadas ao manejo agrícola, irrigação e monitoramento das condições de campo.

Por fim, as informações foram disponibilizadas aos usuários por meio de dashboards interativos contendo gráficos, indicadores e visualizações temporais. Essa abordagem possibilita transformar os dados brutos coletados em campo em informações estruturadas e de fácil interpretação, apoiando a tomada de decisão e o manejo agrícola baseado em dados.

Sistema de Suporte à Decisão

O sistema de apoio à decisão foi estruturado para transformar os dados de clima e solo em alertas, recomendações indicativas e visualizações voltadas ao manejo agrícola. Após a coleta em campo, as medições são enviadas à plataforma e organizadas em uma estrutura de telemetria composta por identificação do dispositivo, variável monitorada, valor medido, unidade, registro temporal, nível de severidade e, quando aplicável, identificador de alerta.

A avaliação das condições de campo é realizada a partir de limites configuráveis associados às variáveis monitoradas. No módulo de solo, as faixas consideradas pelo sistema incluem umidade do solo de 0 a 100%, condutividade elétrica de 0 a 20.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, pH entre 3 e 9 e concentrações de nitrogênio, fósforo e potássio entre 1 e 1999 mg/kg. A umidade do solo é utilizada para identificar situações de déficit ou excesso hídrico, enquanto a condutividade elétrica atua como indicador indireto da concentração de sais, auxiliando na detecção de possíveis riscos de salinização. Alterações no pH e nos teores de N, P e K também podem indicar desequilíbrios relacionados à fertilidade do solo.

Quando uma medição ultrapassa os limites definidos para determinada variável, o sistema atribui um nível de severidade ao evento e aciona o fluxo de alerta. Esse processo é realizado por meio da camada de integração, responsável por receber os dados, aplicar tratamentos quando necessário, registrar as medições no banco de dados e encaminhar eventos críticos aos serviços de notificação. Dessa forma, alertas relacionados a déficit hídrico, excesso de umidade, salinidade, alterações de pH ou variações nutricionais podem ser comunicados ao usuário de forma automatizada.

As recomendações automáticas são geradas de forma indicativa, associando o tipo de alerta a possíveis ações de manejo. Por exemplo, valores baixos de umidade do solo podem indicar a necessidade de avaliar a irrigação; valores elevados de condutividade elétrica podem sugerir investigação de acúmulo de sais; e alterações em pH ou nutrientes podem apoiar decisões relacionadas à correção e ao manejo da fertilidade do solo. Essas recomendações não substituem a avaliação técnica em campo, mas funcionam como apoio inicial para priorizar intervenções e orientar a interpretação dos dados.

As informações processadas são disponibilizadas em dashboards digitais, mapas de sensores, séries temporais e visualizações de acompanhamento em tempo real. Assim, a plataforma deixa de atuar apenas como um sistema de monitoramento e passa a operar como uma ferramenta de apoio à decisão, permitindo que o usuário acompanhe tendências, identifique eventos críticos e tome decisões mais rápidas e fundamentadas sobre irrigação, salinidade, fertilidade do solo e condições ambientais da área monitorada. A lógica de operação do sistema de apoio à decisão, desde a coleta dos dados em campo até a geração de recomendações e notificações ao usuário, é apresentada na Fig. 5.

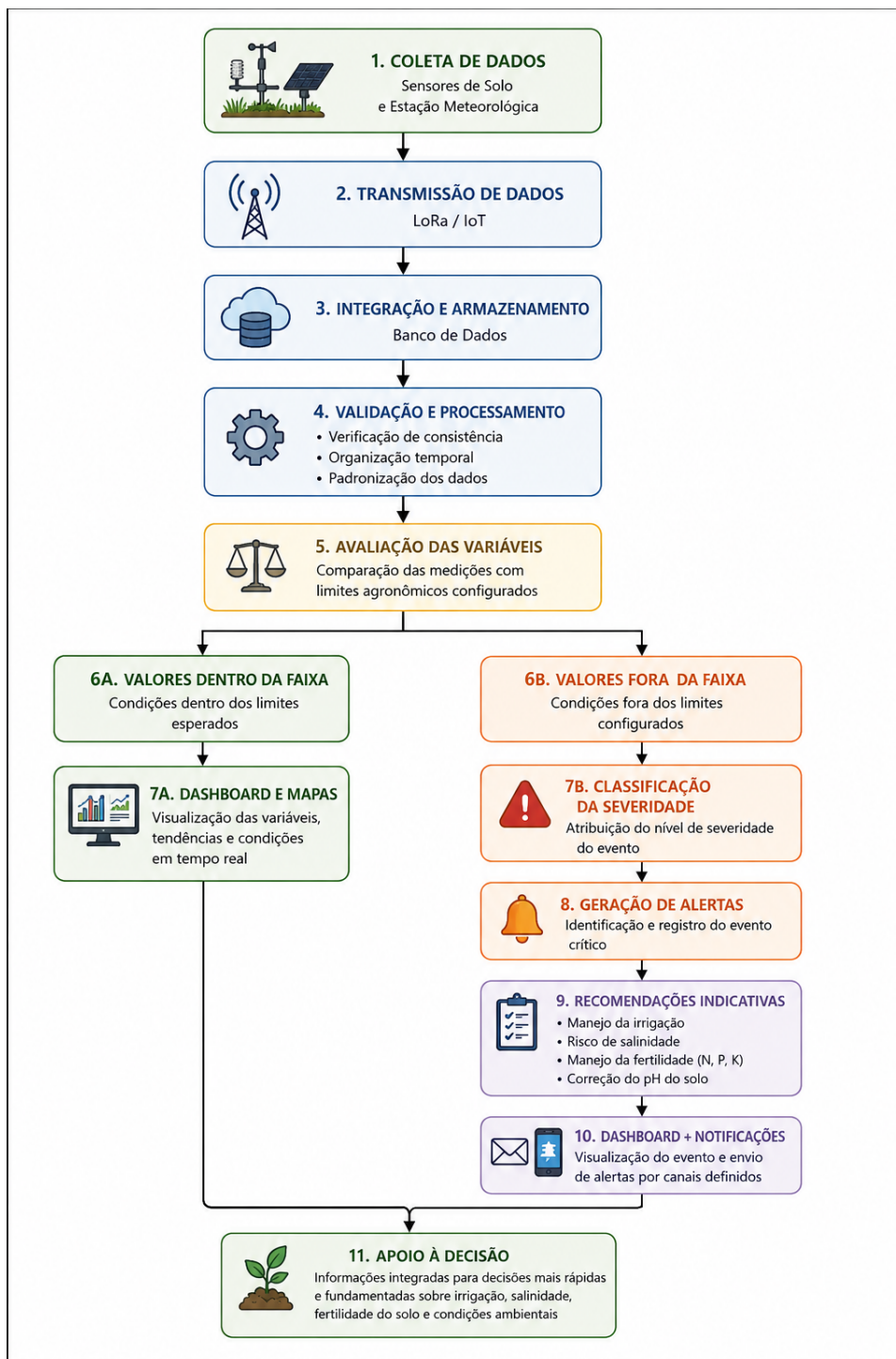


Fig. 5 Fluxograma do sistema de apoio à decisão (Decision Support System – DSS) utilizado na plataforma, descrevendo o

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Desempenho do Sistema e Validação da Plataforma

A plataforma demonstrou capacidade de integrar dados provenientes de sensores de solo e de uma estação meteorológica de baixo custo, permitindo o monitoramento contínuo das condições ambientais relevantes para a viticultura. Durante os testes de validação, o sistema recebeu, processou e armazenou informações relacionadas à umidade e temperatura do solo, condutividade elétrica, pH, nutrientes (N, P e K), precipitação e temperatura do ar, umidade relativa e evapotranspiração.

A infraestrutura de comunicação possibilitou a transmissão automática dos dados coletados em laboratório para o ambiente em nuvem, onde as informações foram organizadas em uma estrutura padronizada e armazenadas em um banco de dados centralizado. O fluxo de aquisição, processamento e disponibilização dos dados ocorreu de forma contínua durante os testes realizados, demonstrando a integração entre os módulos de monitoramento, armazenamento e visualização.

Dados de Solo e Clima

Os dados coletados durante a fase de validação permitiram observar a dinâmica temporal das variáveis monitoradas pelo sistema. A plataforma permite a visualização das variáveis monitoradas por meio de séries temporais, facilitando o acompanhamento das condições ambientais ao longo do tempo.

A integração entre informações edáficas e climáticas permitiu identificar padrões que podem auxiliar na interpretação das condições de cultivo. Em períodos caracterizados por temperaturas mais elevadas e maior demanda atmosférica, indicou um possível aumento da necessidade hídrica das plantas. De forma semelhante, alterações na condutividade elétrica apresentaram potencial para indicar mudanças na concentração de sais na solução do solo, variável de elevada importância para regiões semiáridas.

As medições de pH e nutrientes forneceram informações complementares relacionadas às condições químicas do solo. Embora a presente etapa do estudo tenha sido direcionada principalmente à validação da plataforma, os resultados demonstraram a viabilidade de integrar essas variáveis em um sistema único de monitoramento, possibilitando análises conjuntas entre fertilidade, disponibilidade hídrica e condições climáticas.

Esses resultados evidenciam o potencial da plataforma para consolidar informações provenientes de múltiplas fontes e transformá-las em indicadores úteis para o acompanhamento das condições ambientais em sistemas agrícolas.

Potencial para Suporte à Tomada de Decisão

A principal contribuição da plataforma consiste na transformação dos dados coletados em informações de apoio à tomada de decisão. A partir dos limites configurados para cada variável monitorada, o sistema foi capaz de identificar situações potencialmente críticas e associá-las a recomendações indicativas de manejo. A lógica utilizada para classificação dos eventos e geração de alertas é apresentada na Fig. 7.

VARIÁVEIS MONITORADAS E SITUAÇÕES CRÍTICAS O sistema compara as medições com limites configurados e identifica riscos			
Variável	Situação crítica (exemplos)	O que pode indicar	Ícone
 Umidade do solo	Baixa	Déficit hídrico (necessidade de irrigação)	
	Alta	Excesso de água (saturação do solo)	
 Condutividade elétrica (CE)	Alta	Risco de acúmulo de sais (salinidade)	
 pH do solo	Muito baixo ou muito alto	Desequilíbrio de acidez/ alcalinidade	
 Nutrientes (N, P, K)	Baixo ou desequilibrado	Possível deficiência ou desbalanceamento de fertilidade	
 Clima (T°, radiação, ET _o)	Alta demanda atmosférica	Maior evapotranspiração e estresse da planta	

Fig. 7 Exemplo da lógica de geração de alertas utilizada pela plataforma, relacionando variáveis monitoradas, situações críticas e potenciais interpretações agrônômicas para apoio à tomada de decisão.

No caso da umidade do solo, por exemplo, valores inferiores aos limites estabelecidos podem indicar condições de déficit hídrico, enquanto valores elevados podem sinalizar excesso de água no perfil do solo. Da mesma forma, aumentos na condutividade elétrica podem representar riscos relacionados ao acúmulo de sais, enquanto alterações nos valores de pH e nutrientes podem indicar possíveis desequilíbrios de fertilidade.

A integração dos dados climáticos amplia a capacidade analítica da plataforma, permitindo contextualizar as condições observadas em campo. Variáveis como temperatura do ar, radiação solar e evapotranspiração podem contribuir para a identificação de cenários associados ao aumento da demanda hídrica e ao estresse ambiental das plantas.

Embora as recomendações geradas não substituam avaliações técnicas especializadas, os resultados demonstram o potencial da plataforma para atuar como ferramenta de apoio à decisão, auxiliando produtores e técnicos na identificação de eventos críticos, priorização de intervenções e acompanhamento das condições de cultivo em tempo quase real.

A plataforma encontra-se atualmente em estágio de validação tecnológica (TRL 6), com testes realizados em ambiente controlado. Dessa forma, estudos futuros deverão contemplar a validação em condições reais de campo, incluindo a definição da estratégia espacial de posicionamento dos sensores, avaliação da representatividade das medições e refinamento dos parâmetros utilizados pelo sistema de apoio à decisão.

Etapas de Validação Tecnológica (TRL 6)

A plataforma desenvolvida encontra-se atualmente no estágio de validação tecnológica, correspondente ao Technology Readiness Level 6 (TRL 6). Nesse nível de maturidade, o sistema já possui seus principais componentes integrados e operacionais, sendo submetido a testes em ambiente relevante ou controlado, com o objetivo de avaliar seu desempenho, confiabilidade e capacidade de execução das funções previstas antes da implantação em condições reais de operação. O TRL 6 caracteriza-se pela demonstração de um protótipo representativo do sistema, permitindo identificar limitações, realizar ajustes e reduzir incertezas associadas à aplicação da tecnologia em campo.

Nesta etapa, os esforços estão concentrados na validação dos sensores, na verificação da consistência da comunicação entre os dispositivos e a plataforma, no ajuste das variáveis

monitoradas e na definição dos parâmetros agronômicos utilizados pelo sistema de apoio à decisão. Os testes realizados em ambiente controlado permitem avaliar a estabilidade das medições, a integridade do fluxo de dados e o funcionamento dos mecanismos de geração de alertas e recomendações, contribuindo para o aprimoramento da plataforma antes de sua utilização em escala operacional.

Embora a arquitetura tecnológica e os módulos de monitoramento já estejam implementados, a estratégia espacial de posicionamento dos sensores e a validação operacional em condições reais de cultivo serão definidas e avaliadas durante a próxima fase do projeto, correspondente aos testes de campo. Essa etapa permitirá analisar a representatividade espacial das medições, verificar o desempenho do sistema sob diferentes condições ambientais e consolidar os parâmetros necessários para sua aplicação em ambientes produtivos de viticultura.

Embora a plataforma tenha sido desenvolvida com base em informações técnicas e requisitos definidos para a viticultura irrigada do Vale do São Francisco, sua aplicação ainda se encontra em fase de desenvolvimento e implementação. Dessa forma, as funcionalidades propostas foram estruturadas e avaliadas em ambiente laboratorial, não tendo submetidas até o momento, a uma avaliação completa em condições reais de campo. Além disso, a ausência de testes em diferentes áreas produtivas limita a avaliação da variabilidade espacial dos parâmetros monitorados e da capacidade de adaptação da plataforma a distintos cenários de manejo, condições edafoclimáticas e sistemas de produção.

Nesse contexto, estudos futuros deverão contemplar a implementação da plataforma na Fazenda FP Fittipaldi, bem como sua validação em campo por meio da integração de dados provenientes de sensores, estações meteorológicas e avaliações agronômicas. Essas etapas serão fundamentais para verificar a robustez do sistema e aperfeiçoar as recomendações geradas e avaliar seu potencial como ferramenta de apoio à tomada de decisão na viticultura irrigada.

Implicações para a agricultura no semiárido

Os principais desafios enfrentados pela agricultura em regiões semiáridas e as respectivas contribuições potenciais da plataforma são apresentados na Tabela 2. A integração entre variáveis de solo e clima permite associar problemas recorrentes, como escassez hídrica e salinização, a indicadores monitorados em tempo real, fornecendo subsídios para decisões de manejo mais eficientes.

O monitoramento da umidade do solo, associado a parâmetros climáticos como temperatura do ar, radiação solar e evapotranspiração, possibilita identificar períodos de maior demanda hídrica e potenciais situações de estresse para as plantas. Dessa forma, a plataforma apresenta potencial para contribuir com estratégias voltadas ao uso mais racional da água, recurso frequentemente limitado em ambientes semiáridos.

Outro aspecto relevante refere-se ao acompanhamento da condutividade elétrica do solo. Em áreas irrigadas do Semiárido, o acúmulo de sais representa um dos principais fatores de degradação da qualidade do solo e redução da produtividade agrícola, pois a aplicação excessiva de água de irrigação, quando não acompanhada por práticas adequadas de manejo, pode favorecer o encharcamento do solo e o acúmulo de sais, especialmente em regiões onde as taxas de evaporação superam os índices de precipitação (Sanga et al., 2024).

O monitoramento contínuo dessa variável permite identificar alterações que possam indicar riscos de salinização, fornecendo informações que auxiliem na adoção de medidas preventivas e corretivas.

Além dos aspectos relacionados à água e à salinidade, a plataforma também possibilita o acompanhamento integrado de pH e nutrientes do solo, contribuindo para o manejo mais

eficiente da fertilidade. A utilização dessas informações pode favorecer práticas agrícolas mais sustentáveis, reduzindo desperdícios de insumos e permitindo intervenções mais direcionadas às necessidades da área monitorada.

Tabela 2 - Desafios da agricultura em regiões semiáridas, parâmetros monitorados pela plataforma e potenciais aplicações no suporte à tomada de decisão.

Desafio	Variável Monitorada	Benefício
Escassez hídrica	Umidade do solo + ETo	Irrigação mais eficiente
Salinização	Condutividade elétrica	Deteção precoce
Desequilíbrio nutricional	NPK + pH	Melhor manejo da fertilidade
Estresse climático	Temperatura + Radiação	Monitoramento de risco
Sustentabilidade	Integração de dados	Decisões baseadas em evidências

CONCLUSÕES

Este estudo apresentou o desenvolvimento de uma plataforma digital para monitoramento integrado de variáveis de solo e clima e apoio à tomada de decisão na viticultura em condições semiáridas. A solução proposta reúne em um único ambiente a aquisição, transmissão, armazenamento, processamento e visualização de dados ambientais, permitindo o acompanhamento contínuo das condições de cultivo. Os resultados obtidos durante a fase de validação tecnológica demonstraram a viabilidade da integração entre sensores de solo, estação meteorológica e sistema de apoio à decisão, possibilitando a identificação de condições potencialmente críticas relacionadas à disponibilidade hídrica, salinidade, fertilidade do solo e variabilidade climática. Além disso, a plataforma mostrou potencial para transformar dados coletados em campo em informações úteis para o planejamento e a gestão agrícola.

A plataforma encontra-se atualmente em estágio de validação tecnológica (TRL 6), sendo necessários estudos complementares para sua consolidação em condições reais de cultivo. Como próximos passos, destacam-se a validação operacional em campo, a definição de estratégias espaciais para posicionamento dos sensores, o desenvolvimento de critérios de zoneamento e representatividade das áreas monitoradas, bem como o refinamento dos parâmetros agronômicos e das regras de recomendação. Essas ações contribuirão para ampliar a robustez do sistema e seu potencial de aplicação em programas de agricultura de precisão e manejo sustentável da viticultura no Semiárido brasileiro.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE) pelo suporte institucional disponibilizado para o desenvolvimento desta pesquisa. Agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE) pelo apoio financeiro e pela concessão de bolsas que contribuíram para a realização deste trabalho. Os autores também agradecem à Netcon Americas e ao Scinet Institute pelo apoio técnico e pela colaboração no desenvolvimento da plataforma tecnológica, bem como à Fazenda IP Fittipaldi pela disponibilização da área e pelo suporte às atividades relacionadas à validação da solução proposta.

REFERÊNCIAS

- Alvar, T. A. A., & Vijayasuria, S. P. (2024). Review of IoT networking protocols and sensor integration for smart irrigation and soil monitoring. *International Journal of Advanced Networking and Applications*, 17(02). doi:10.35444/ijana.202517207
- Babbar, S., Singhal, S. K., & Quraishi, S. J. (2025). Enhancing agricultural efficiency through the Internet of Things (IoT). *IGI Global*, pp. 211–246. doi:10.4018/979-8-3373-5283-1.ch008
- COMWINTOP. (n.d.). *RS485 4-20mA Soil Temperature Humidity Moisture Conductivity EC PH Sensor*. Product Document. Shenzhen, China. <https://store.comwintop.com/products/rs485-4-20ma-soil-temperature-humidity-moisture-conductivity-ec-ph-sensor>. Last accessed 1 June 2026.
- Dattatreya, S., Khan, A. N., Jena, K., & Chatterjee, G. (2024). Conventional to modern methods of soil NPK sensing: A review. *IEEE Sensors Journal*, 24, 2367–2380. doi:10.1109/jsen.2023.3334243
- Decision support systems in precision agriculture and conservation. (2025). *Burleigh Dodds Series in Agricultural Science*, 225–248. doi:10.19103/as.2025.152.09
- Dilip, R., Nishchitha, M. H., Talikoti, M., Kalpavi, C. Y., Balaraj, H. V. D., & Tejashwini, N. (2026). Smart Farming Technologies. pp. 155–165. doi:10.1002/9781394248711.ch13
- Finco, A., Bentivoglio, D., Chiaraluce, G., Albéri, M., Chiarelli, E., Maino, A., et al. (2022). Combining precision viticulture technologies and economic indices to sustainable water use management. *Water*, 14(9), 1493. doi:10.3390/w14091493
- Gutiérrez, E., Ruiz-Beamonte, D., Cozar, M., Aznar, J., Latre, I., García, E., et al. (2025). Integrating Artificial Intelligence and Multi-Source Data for Precision Deficit Irrigation in Vineyards: The ViñAI Tool Case Methodology. *Applied Sciences*, 15(24), 13209. doi:10.3390/app152413209
- Hura, J. K., & Gulo, M. (2024). Analisis permeabilitas tanah berpasir dan tanah lempung dalam hubungannya dengan manajemen irigasi. *Jurnal Ilmu Pertanian Dan Perikanan*, 1(2), 60–67. doi:10.70134/penarik.v1i1.63
- Integration of IoT-based, sprinklers, embedded systems, data and cloud computing for smart irrigation management. (2025). *Zenodo Repository*. doi:10.5281/zenodo.17163501
- Molin, J. P., Bazame, H. C., Maldaner, L. F., Corrêdo, L. de P., Martello, M., & Canata, T. F. (2020). Precision agriculture and the digital contributions for site-specific management of the fields. *Revista Ciencia Agronomica*, 51(5), 1–10. doi:10.5935/1806-6690.20200088
- OPEN-METEO. (n.d.). *Open-Meteo Weather API*. <https://open-meteo.com/>. Last accessed 15 June 2026.
- Petraki, D., Gazoulis, I., Kokkini, M., Danaskos, M., Kanatas, P., Rekkas, A., et al. (2025). Digital Tools and Decision Support Systems in Agroecology: Benefits, Challenges, and Practical Implementations. *Agronomy*, 15(1), 236. doi:10.3390/agronomy15010236
- Raasika, C., Rekha, G., & Sonika, E. (2025). Integrated IOT-driven decision support system for sustainable soil and crop management in Indian agriculture. *Indian Scientific Journal Of Research*, 09(10), 1–9. doi:10.55041/ijrsrem52922
- Sanga, D. L., Mwamahonje, A., Mahinda, A., & Kipanga, E. A. (2024). Soil salinization under irrigated farming: A threat to sustainable food security and environment in semi-arid tropics. *Journal of Agricultural and Practice*, 9(3), 32–47. doi:10.31248/jasp2024.468
- Santos, W. M. dos. Utilização de índices de vegetação para estimativa de parâmetros produtivos em sistemas agroflorestais no bioma Caatinga. 2023. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) — Universidade Federal Rural de Pernambuco, Unidade Acadêmica de Serra Talhada, Serra Talhada, 2023.
- Silva, L.F.S., Pessoa, L.G.M., Silva, E.M., Freire, M.B.G.S., Souza, E.S., Oresca, D., Silva, J.O.N., Barros Júnior, G., Bezerra, A.C., Santos, E.S. (2024). Changes in soil C, N, and P concentrations and stocks after Caatinga natural regeneration of degraded pasture areas in the Brazilian semiarid region. *Sustainability*, 16(20), 8737.
- Sobya, D., Balaji, C., Duraisamy, B., Thangaraj, K., Kumar, S. S., & Sivaranjani, C. (2025). IoT-driven precision agriculture: Real-time soil health and irrigation monitoring using low-power wireless sensor networks. *International Conference on Innovative Mechanisms for Industry Applications*, pp. 8–15. doi:10.1109/icimia67127.2025.11200604
- Vieira, K. A. S., & Almeida, D. S. de. (2022). Análise de viabilidade de sistemas de bombeamento acionados por energia eólica para irrigação no vale do são francisco. *Recima21*, 3(9), e391882. doi:10.47820/recima21.v3i9.1882
- Zega, N. D. (2024). Pengaruh tekstur dan struktur tanah terhadap distribusi air dan udara di profil tanah. *Jurnal Ilmu Pertanian Dan Perikanan*, 1(2), 1–6. doi:10.70134/penarik.v1i2.52