

RESSALVA

Atendendo solicitação do(a) autor(a), o texto completo desta tese/dissertação será disponibilizado somente a partir de
26/06/2028

At the author's request, the full text of this thesis/dissertation will not be available online until
June 26, 2028

Valdemiro Simão João Pitoro

**Desenvolvimento de ferramentas de baixo custo para o manejo de irrigação
usando recursos da agricultura 4.0**

Botucatu

2026

Valdemiro Simão João Pitoro

**Desenvolvimento de ferramentas de baixo custo para o manejo de irrigação
usando recursos da agricultura 4.0**

Tese apresentada à Faculdade de Ciências
Agronômicas da UNESP, Campus de
Botucatu, para obtenção do título de Doutor
em Engenharia Agrícola.

Orientador: Prof. Rodrigo Máximo Sánchez-
Román

Coorientador: Cleber Alexandre de Amorim

Botucatu

2026

P685d	Pitoro, Valdemiro Simão João Desenvolvimento de ferramentas de baixo custo para o manejo de irrigação usando recursos da agricultura 4.0 / Valdemiro Simão João Pitoro. -- Botucatu, 2026 144 p. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu Orientador: Rodrigo Máximo Sánchez-Román Coorientador: Cleber Alexandre de Amorim 1. Irrigação agrícola. 2. Tecnologia agrícola. 3. Umidade do solo. 4. Evapotranspiração. 5. Alfabetização tecnológica. I. Título.
-------	---

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Dados fornecidos pelo autor(a).

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTAS DE BAIXO CUSTO PARA O MANEJO DE IRRIGAÇÃO USANDO OS RECURSOS DA AGRICULTURA 4.0

AUTOR: VALDEMIRO SIMÃO JOÃO PITORO

ORIENTADOR: RODRIGO MAXIMO SANCHEZ ROMAN

COORDENADOR: CLEBER ALEXANDRE DE AMORIM

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Agrícola, pela Comissão Examinadora:



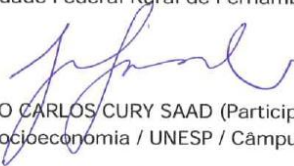
Professor Doutor RODRIGO MAXIMO SANCHEZ ROMAN (Participação Presencial)
Engenharia Rural e Socioeconomia / UNESP / Câmpus de Botucatu - FCA



Prof. Dr. RUBENS DUARTE COELHO (Participação Virtual)
Engenharia de Biosistemas / Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz



Prof.^a Dr.^a CERES DUARTE GUEDES CABRAL DE ALMEIDA (Participação Virtual)
Agricultura / Universidade Federal Rural de Pernambuco



Professor Doutor JOÃO CARLOS CURY SAAD (Participação Presencial)
Engenharia Rural e Socioeconomia / UNESP / Câmpus de Botucatu - FCA



Prof. Dr. TIAGO APARECIDO VICENTIN (Participação Presencial)
Coordenadoria do Curso de Automação Industrial / Faculdade de Tecnologia - FATEC - Bauru/SP

Botucatu, 26 de junho de 2026.

AGRADECIMENTOS

A Deus, porque por ele, dele e para ele são todas as coisas, sem a sua proteção, alcançar este sonho seria impossível.

Aos meus pais Simão João Pitoro e Esperança Raúl *“in memoriam”*, que mais incentivaram a seguir trilhar este caminho.

A Allan Pitoro, meu filho, que dele encontrava forças para prosseguir.

Ao meu orientador Professor Rodrigo Máximo Sánchez Román, e coorientador Professor Cleber Alexandre de Amorim pela orientação, ensinamentos, paciência, ajuda e compreensão; por sempre ter estado disponível a tornar esta jornada melhor.

A minha família, Lina Jorge Elias, Raúl Pitoro, Adérito Pitoro, Simão Pitoro Júnior, Esperança Eugénia Simão e Zeca José Alfredo, pelo apoio incondicional.

A todos os professores e funcionários da FCA, em particular aos do Departamento de Engenharia Rural e Socioeconomia que sempre estiveram disponíveis a colaborar e pelos ensinamentos partilhados.

A Universidade de Lúrio - Moçambique, pela autorização concedida e permitir a continuidade da minha formação acadêmica.

Aos colegas do Programa de PG em Engenharia Agrícola e amigos, Caio Fernandes, João de Jesus Guimarães, José Rafael, William Duarte Bailo, entre outros, pelas conversas fundamentais e ajuda que impactou significativamente à realização deste trabalho.

Ao Departamento de Engenharia Rural e Socioeconomia da FCA/UNESP, pela oportunidade de realizar o curso.

Ao Brasil pelo acolhimento e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de estudos concedida.

RESUMO

O manejo de irrigação (MI) de forma eficiente é essencial para o uso sustentável dos recursos hídricos e para o aumento da produtividade agrícola, especialmente em regiões com escassez hídrica. No entanto, a adoção generalizada de tecnologias de monitoramento por agricultores familiares ainda é limitada devido ao alto custo, à complexidade operacional e à necessidade de calibração específica para cada local. Este estudo teve como objetivo desenvolver e avaliar dispositivos de MI de baixo custo e fácil operação, adequados para usuários com baixa renda e escolaridade, com foco no monitoramento da umidade do solo e na estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o). Foram desenvolvidos dois protótipos: (i) um sistema de monitoramento da umidade do solo baseado em sensores capacitivos (modelo SKU: CE09640 v2.0), integrados a microcontroladores Arduino Mega2560, com retorno visual simplificado do estado de umidade do solo por meio de LEDs RGB; e (ii) um sistema de atmômetros manuais modificados (equipados com sensores capacitivos) integrados a Arduino Nano e ESP32, projetado para estimar indiretamente a ET_o através do acompanhamento da evaporação de água e retorno em display LCD. Ambos os sistemas foram concebidos com foco na acessibilidade econômica, replicabilidade e operação autônoma em condições de campo. A calibração laboratorial dos sensores capacitivos foi realizada pelo método gravimétrico, correlacionando as leituras dos sensores com os teores gravimétrico (μ) e volumétrico (θ) de umidade do solo. Os testes de campo foram conduzidos no cultivo de *Brassica oleracea* (couve-manteiga), em delineamento em blocos casualizados com esquema fatorial 4×3, combinando quatro níveis de irrigação (50%, 75%, 100% e 125% da necessidade hídrica da cultura) e três estratégias de manejo (baseadas em ET_c, tensiometria e sensores capacitivos). Avaliaram-se parâmetros agronômicos e de eficiência do uso da água. Os sensores capacitivos apresentaram forte correlação com os valores observados ($R > 0,94$; $R^2 > 0,89$), erros reduzidos (RMSE: 0,022–0,029 m³ m⁻³), viés desprezível ($-4,69 \times 10^{-7} < \text{MBE} < 9,02 \times 10^{-7}$) e alta concordância ($0,94 < d < 0,98$). Os atmômetros modificados mostraram sensibilidade consistente às variações no nível de água por evaporação, com boa correlação em relação às estimativas de ET_o obtidas pelo método FAO Penman–Monteith, indicando viabilidade como alternativa prática em ambientes com infraestrutura meteorológica limitada.

Os sistemas propostos demonstraram viabilidade técnica e acessibilidade econômica, permitindo a ampliação do uso de práticas de irrigação baseadas em dados em contextos de agricultura familiar. Os resultados reforçam o potencial dessas tecnologias simplificadas para contribuir com a intensificação agrícola sustentável.

Palavras-chave: agricultura familiar; monitoramento climático; recursos hídricos; umidade do solo; sensores de baixo-custo.

ABSTRACT

Efficient irrigation management (IM) is essential for the sustainable use of water resources and for enhancing agricultural productivity, particularly in water-scarce regions. However, the widespread adoption of monitoring technologies by smallholder farmers remains limited due to high costs, operational complexity and the need for site-specific calibration. This study aimed to develop and evaluate low-cost, user-friendly devices for IM, suitable for low-income and low-literacy users, with emphasis on soil moisture monitoring and reference evapotranspiration (ET_o) estimation. Two complementary prototypes were developed: (i) a soil moisture monitoring system based on capacitive sensors (model SKU: CE09640 v2.0) integrated with Arduino and ESP32 microcontrollers, providing simplified visual feedback through RGB LEDs and LCD displays; and (ii) a modified atmometer system (manual atmometers retrofitted with capacitive sensors), designed to estimate ET_o indirectly by tracking water evaporation levels. Both systems were designed for affordability, ease of replication, and autonomy under field conditions. Laboratory calibration was performed using the gravimetric method, correlating sensor voltage readings with gravimetric (μ) and volumetric (θ) soil water content. A field trial was conducted under *Brassica oleracea* (kale) cultivation using a randomized block design with a 4×3 factorial scheme, combining four irrigation levels (50%, 75%, 100%, and 125% of crop water requirement) and three irrigation scheduling strategies (ET_c based, tensiometer based, and sensor based). Agronomic and water-use efficiency parameters were evaluated. The capacitive sensors demonstrated strong agreement with observed moisture values ($R > 0.94$; $R^2 > 0.89$), low root mean square error (RMSE: 0.022–0.029 m³ m³), negligible bias ($-4.69 \times 10^{-7} < \text{MBE} < 9.02 \times 10^{-7}$), and high concordance ($0.94 < d < 0.98$). The modified atmometers showed consistent sensitivity to water level changes due to evaporation, correlating well with ET_o estimates derived from the FAO Penman-Monteith method, supporting their use as a practical alternative in resource-limited environments. The proposed systems proved to be technically feasible and economically accessible, enabling broader adoption of data-driven irrigation practices in smallholder farming. These results support the scalability of simplified IM technologies and their potential contribution to sustainable agricultural intensification.

Keywords: climate monitoring; low-cost sensors; small-scale agriculture; soil moisture; water resources.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

INTRODUÇÃO

Figura 1 - Principais motivações de desenvolvimento da pesquisa	24
---	----

CAPÍTULO 1 - DISPOSITIVO DE MONITORAMENTO DE UMIDADE DO SOLO PARA MANEJO DE IRRIGAÇÃO DE FÁCIL INTERAÇÃO COM O USUÁRIO BASEADO EM SENSORES CAPACITIVOS E ARDUINO

Figura 1 - Etapas de desenvolvimento da pesquisa	33
Figura 2 - Sensor capacitivo de umidade de solo e procedimento de proteção	34
Figura 3 - Circuito do sistema de monitoramento de umidade do solo para calibração do protótipo	35
Figura 4 - Coleta e preparação das amostras de solo para calibração dos sensores	39
Figura 5 - Condução do registro contínuo de dados para calibração dos sensores e esboço da lógica de indicação visual do estado de umidade do solo usando LEDs RGB	40
Figura 6 - Resultados da análise de variabilidade da leitura sensor a sensor em diferentes texturas de solo	43
Figura 7 - Matriz de correlação entre as leituras dos sensores capacitivos e percentagem de umidade do solo de textura fina, média e grossa	44
Figura 8 - Relação entre valores de leituras dos sensores, tensão de água no solo e umidade volumétrica	46
Figura 9 - Ilustração da unidade de monitoramento de umidade do solo usando LEDs para indicação do teor de umidade	53
Figura 10 - Lógica adotada para definição de indicadores visuais do estado de umidade do solo usando Leds	54

CAPÍTULO - 2 APLICAÇÃO DE SENSORES DE UMIDADE DE SOLO DE BAIXO CUSTO PARA MANEJO DE IRRIGAÇÃO NO CULTIVO DE COUVE-MANTEIGA

Figura 1 - Protocolo de manejo de irrigação nas diferentes técnicas de manejo de irrigação	69
Figura 2 - Curva de retenção de água no solo da área experimental	70
Figura 3 - Sensor capacitivo de umidade de solo e procedimento de proteção	71

Figura 4 - Circuito da unidade de aquisição de dados para calibração de sensores de umidade de solo.....	73
Figura 5 - Manuseio das amostras de solo para calibração dos sensores	75
Figura 6 - Unidade de aquisição de dados de peso da amostra de solo e leitura bruta dos sensores capacitivos	76
Figura 7 - Esquema de instalação do sistema de irrigação da unidade experimental de cultivo de couve-manteiga	78
Figura 8 - Detalhes de instalação de sensores capacitivos de umidade de solo (a), linhas de irrigação na unidade experimental (b) e desenvolvimento das plantas de couve-manteiga (c).....	78
Figura 9 - Lógica adotada para indicação visual da umidade do solo a partir da relação entre umidade volumétrica e valores de leitura de sensor capacitivo de umidade de solo.....	80
Figura 10 - Relação entre valores de leituras dos sensores e umidade volumétrica média	84
Figura 11 - Relação entre umidade volumétrica predita pela equação de calibração e calculada (observada) pelo método gravimétrico.....	85
Figura 12 - Dados de temperatura média (TM), precipitação total (PT) e evapotranspiração de referência (ET _o) registrados durante a pesquisa..	87
Figura 13 - Lâmina bruta acumulada de diferentes técnicas de manejo de irrigação no cultivo de couve-manteiga, ciclo 1 e ciclo 2	88
Figura 14 - Número de folhas comerciais (NFC), número de folhas adultas (NFA), massa fresca por planta (MFFa) e produtividade de uso de água (WUP) sob diferentes níveis de irrigação no ciclo 1 e ciclo 2	91

CAPÍTULO 3 - APERFEIÇOAMENTO ELETRÔNICO DE ATMÔMETRO MANUAL PARA ESTIMATIVA AUTOMATIZADA DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA EM TEMPO REAL USANDO SENSORES CAPACITIVOS

Figura 1 - Confecção dos atmômetros modificados.....	106
Figura 2 - Processo de impermeabilização de cápsulas porosas	106
Figura 3 - Descrição de inserção do sensor capacitivo no reservatório de água....	109
Figura 4 - Detalhes da capa de proteção do circuito eletrônico do sensor capacitivo impressa em 3D (em plástico PVC).	110
Figura 5 - Aplicação da capa de proteção do circuito do sensor capacitivo.....	110

Figura 6 - Atmômetros instalados em campo aberto.....	112
Figura 7 - Extrato da base de dados (google planilhas) usada para armazenamento e visualização de dados dos valores da leitura bruta dos sensores capacitivos	113
Figura 8 - Circuito eletrônico da unidade de aquisição de dados	114
Figura 9 - Registros de evaporação de água nos atmômetros (EV-AMM), evaporação de referência (ETo) e precipitação total (PT).....	117
Figura 10 - Registros diários de evaporação de água nos atmômetros, temperatura média do ar, umidade relativa média do ar e radiação solar	118
Figura 11 - Relação entre registros médios de evaporação dos atmômetros e outras variáveis meteorológicas	119
Figura 12 - Comparação dos registros diários de evaporação nos atmômetros (EV- AMM) e evapotranspiração de referência (ETo-PM)	120
Figura 13 - Diferenças diárias entre evapotranspiração de referência estimada com base nos atmômetros e dados da estação meteorológica	122
Figura 14 - Relação entre a leitura do sensor capacitivo e nível de água no atmômetro modificado	127
Figura 15 - Variação da leitura dos sensores capacitivos instalados nos atmômetros em dia de reposição de água no reservatório	128
Figura 16 - Relação entre valores da leitura do sensor capacitivo e evaporação de água no reservatório do atmômetro.....	129
Figura 17 - Valores da leitura bruta dos sensores para diferentes níveis de evaporação de água no atmômetro	130
Figura 18 - Relação entre leitura dos sensores e temperatura do ambiente	131

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 1 - DISPOSITIVO DE MONITORAMENTO DE UMIDADE DO SOLO PARA MANEJO DE IRRIGAÇÃO DE FÁCIL INTERAÇÃO COM O USUÁRIO BASEADO EM SENSORES CAPACITIVOS E ARDUINO

Tabela 1 - Custo total unidade de coleta de dados para calibração de sensores (em R\$, 2024).....	36
Tabela 2 - Resultados de características físicas das amostras de solo de análise realizadas no Laboratório de Solos da FCA	37
Tabela 3 - Modelos de calibração para estimativa de umidade volumétrica a partir dos sensores capacitivos de umidade de solo SKU: CE09640	51
Tabela 1 - Resultados da análise física e química do solo da área experimental	67

CAPÍTULO - 2 APLICAÇÃO DE SENSORES DE UMIDADE DE SOLO DE BAIXO CUSTO PARA MANEJO DE IRRIGAÇÃO NO CULTIVO DE COUVE-MANTEIGA

Tabela 2 - Parâmetros da equação obtidos pelo modelo proposto por Van Genuchten (1980)	70
Tabela 3 - Modelos ajustados para estimativa de umidade volumétrica atual do solo a partir do valor da leitura bruta do sensor	81
Tabela 4 - Sumário da análise de variância para número de folhas comerciais (NFc), número de folhas não comerciais (NFnc), número de folhas adultas (NFa), massa fresca de folhas adultas por planta (MFFa) e produtividade de uso de água (WUP).....	89
Tabela 5 - Valores médios de número de folhas comerciais (NFc), número de folhas não comerciais (NFnc), número de folhas adultas (NFa), massa fresca de folhas adultas por planta (MFFa) e produtividade de uso de água (WUP) sob diferentes técnicas de manejo de irrigação	90

CAPÍTULO 3 - APERFEIÇOAMENTO ELETRÔNICO DE ATMÔMETRO MANUAL PARA ESTIMATIVA AUTOMATIZADA DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA EM TEMPO REAL USANDO SENSORES CAPACITIVOS

Tabela 1 - Detalhes dos sensores utilizados na estação meteorológica	107
Tabela 2 - Custo total da unidade de aquisição de dados (em R\$, 2025) do atmômetro modificado aperfeiçoado	115

Tabela 3 - Critérios de interpretação do desempenho dos atmômetros na estimativa de ET, pelo índice de concordância (c).....	116
Tabela 4 - Indicadores estatísticos de modelos (lineares) de estimativa de evapotranspiração com base nos registros diários de evaporação de água nos atmômetros	121
Tabela 5 - Modelos de regressão múltipla ($y = b + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4 + a_5x_5$) e indicadores estatísticos da estimativa de evapotranspiração de referência a partir de dados de evaporação de água nos atmômetros e variáveis climáticas locais	125

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL.....	19
CAPÍTULO 1.....	26
DISPOSITIVO DE MONITORAMENTO DE UMIDADE DO SOLO PARA MANEJO DE IRRIGAÇÃO DE FÁCIL INTERAÇÃO COM O USUÁRIO BASEADO EM SENSORES CAPACITIVOS E ARDUINO.....	26
1.1 INTRODUÇÃO	28
1.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	32
1.2.1 Descrição da área da pesquisa	32
1.2.2 Hardware e software umidade de coleta de dados para calibração de sensores de umidade de solo de baixo-custo	33
1.2.3 Calibração de sensores de baixo custo em laboratório	37
1.2.4 Critérios de avaliação para testar o desempenho dos sensores e validação dos modelos de calibração	41
1.3 RESULTADOS	42
1.3.1 Estudo de variabilidade das leituras sensor a sensor	42
1.3.2 Calibração de sensores.....	45
1.3.3 Desenho e implementação de dispositivos de monitoramento de umidade de solo para manejo de irrigação de fácil interação com o usuário.....	52
1.4 CONCLUSÕES	56
REFERÊNCIAS.....	57
CAPÍTULO 2.....	62
APLICAÇÃO DE SENSORES DE UMIDADE DE SOLO DE BAIXO CUSTO PARA MANEJO DE IRRIGAÇÃO NO CULTIVO DE COUVE-MANTEIGA...	62
2.1 INTRODUÇÃO	64
2.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	67
2.2.1 Descrição e caracterização da área da pesquisa	67
2.2.2 Descrição da pesquisa experimental.....	68
2.2.3 Coleta e análise de dados	82
2.3 RESULTADOS	83
2.3.1 Calibração dos sensores e validação	83
2.3.2 Manejo de irrigação	87
2.3.3 Crescimento, produção e produtividade de uso de água	88
2.4 CONCLUSÕES	93

REFERÊNCIAS	95
CAPÍTULO 3	100
APERFEIÇOAMENTO ELETRÔNICO DE ATMÔMETRO MANUAL PARA	
ESTIMATIVA AUTOMATIZADA DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE	
REFERÊNCIA EM TEMPO REAL USANDO SENSORES CAPACITIVOS	100
3.1 INTRODUÇÃO.....	101
3.2 MATERIAL E MÉTODOS	105
3.2.1 Área da pesquisa	105
3.2.2 Equipamentos	105
3.2.3 Aquisição de dados.....	112
3.2.4 Análise de dados	115
3.3 RESULTADOS	117
3.3.1 Avaliação dos atmômetros.....	117
3.3.2 Monitoramento de evaporação de água nos atmômetros usando sensores capacitivos	126
3.4 CONCLUSÕES.....	132
REFERÊNCIAS	133
CONSIDERAÇÕES FINAIS	137
REFERÊNCIAS	139

INTRODUÇÃO GERAL

A agricultura é um setor de importância estratégica para o crescimento econômico em diversas regiões do Mundo, especialmente nas regiões em desenvolvimento ou de economias emergentes, onde contribui simultaneamente para o fornecimento de alimentos, incremento dos rendimentos dos agregados familiares, geração de emprego e redução da pobreza (Dethier e Effenberger, 2012). Uma parcela significativa da população destas regiões reside em áreas rurais, e tem a agricultura como a principal fonte de subsistência (Castañeda *et al.*, 2018). Nas regiões em desenvolvimento, a agricultura é tão importante de tal forma que é responsável pela empregabilidade de 60% da força laboral e contribui em torno de 25% do produto interno bruto (PIB), contrariamente aos 9% do PIB dos países de economia média e 1% do PIB dos países de rendimentos elevados (Dethier e Effenberger, 2012).

O desenvolvimento da agricultura é impactado por diversos fatores, com destaque para recursos naturais como terra arável e água. Diante do atual e futuro cenário de degradação e redução contínua destes recursos naturais, assim como crescimento populacional, diversas pesquisas (Birhanu e Tabo, 2016; Borrelli *et al.*, 2020) relatam que a agricultura terá o desafio de produzir mais alimentos com os mesmos ou menos recursos naturais (terra arável e água) atualmente disponíveis. Estes desafios determinam a necessidade de adotar técnicas agrícolas capazes de incrementar a produção de alimentos, sem, no entanto, expandir as áreas de cultivo ou demandar mais recursos naturais, com destaque para os recursos hídricos.

Entre as várias soluções adotadas e/ou desenvolvidas para alcançar um equilíbrio entre a necessidade de incremento da produção de alimentos e a limitada disponibilidade recursos naturais essenciais para o desenvolvimento da atividade agrícola, destaca-se a irrigação (Durães, 2024; Partridge *et al.*, 2023; Puy *et al.*, 2021), por permitir o incremento da produtividade e aumento de rendimentos agrícolas, reduzir os impactos da escassez ou incertezas de ocorrência de precipitação, expandir os limites de produção anuais, entre outros benefícios.

Os benefícios da irrigação agrícola são destacados em diversas pesquisas. Durães (2024) e Puy *et al.* (2021), referem que, o cultivo irrigado permite obter produtividades 2 a 3,5 vezes superiores em relação ao cultivo em sequeiro. Mesmo ocupando apenas 24% da área global cultivada, a agricultura irrigada contribui em

40% da produção global (Mehta *et al.*, 2024; Puy *et al.*, 2021). A irrigação não só contribui para o incremento da produtividade, também permite reduzir o custo unitário de produção e mitiga os impactos climáticos, como também otimiza o uso de insumos e garante a produção regular (Durães, 2024). Estas evidências realçam a importância da irrigação na agricultura.

Embora a agricultura irrigada seja reconhecida como potencial solução para o aumento da produtividade agrícola, também é apontada como uma das atividades que mais impacta a escassez de água doce, sendo responsável por cerca de 70% das captações globais (Hasan *et al.*, 2023; Hoogeveen *et al.*, 2015; Shemer, Wald e Semiat, 2023). Diversas projeções de escassez hídrica indicam que a água tenderá a permanecer como um dos principais fatores limitantes para a produção agrícola e segurança alimentar (Shemer, Wald e Semiat, 2023; Ungureanu *et al.*, 2020), razão pela qual recorrentemente surgem questionamentos sobre o futuro da agricultura irrigada e como será possível atender à demanda crescente por água doce, tanto para fins agrícolas quanto não agrícolas (Hoogeveen *et al.*, 2015).

Mesmo diante de desafios de escassez progressiva de recursos hídricos, alcançar um equilíbrio entre a necessidade de incremento da produção de alimentos e a limitada disponibilidade de recursos como terra arável e água ainda é possível, mas exigirá mudanças consideráveis na gestão de água (Mahmood *et al.*, 2015). O adequado manejo de irrigação (MI) é indicado como solução para garantir a continuidade da produção de alimentos, incremento da produtividade agrícola, uso racional de recursos hídricos e sustentabilidade da agricultura irrigada. O MI pode ser realizado com base na 1) umidade do solo na zona radicular das plantas, 2) quantidade de água perdida por evapotranspiração, e 3) resposta das plantas ao estresse hídrico (Sui, 2017); exigindo a utilização de ferramentas que permitem estimativas precisas da umidade do solo, evapotranspiração da cultura e stress hídrico das plantas, de modo a responder às necessidades de irrigação em tempo oportuno e em quantidade ideal.

O MI baseado na umidade do solo já vem sendo usado a mais tempo comparativamente aos outros métodos (Sui, 2017). Além do método gravimétrico, métodos eletromagnéticos, como reflectometria no domínio do tempo (TDR) e sensores capacitivos, são os comumente usados para medição de umidade do solo em escala pontual (Dobriyal *et al.*, 2012; Su, Singh e Baghini, 2014; Yu *et al.*, 2021). O método gravimétrico é a abordagem clássica e direta, considerado padrão e preciso

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos nos três estudos demonstram que o uso de sensores capacitivos de baixo custo, integrados a microcontroladores acessíveis como Arduino e ESP32, constitui uma alternativa viável, funcional e economicamente acessível para o manejo da irrigação (MI) em contextos de agricultura irrigada com recursos limitados.

O dispositivo de monitoramento de umidade do solo com interface visual simplificada por meio de LEDs RGB mostrou-se eficaz na estimativa da umidade volumétrica, com desempenho estatístico satisfatório ($RMSE < 2,7 \times 10^{-2}$; R^2 entre 0,88 e 0,93), além de elevada concordância entre os valores estimados e observados. Essa abordagem facilita a interpretação dos dados por usuários com pouca formação técnica, ampliando o potencial de adoção da tecnologia.

A aplicação dos sensores SKU: CE09640 no cultivo de couve-manteiga mostrou-se útil para o monitoramento de umidade do solo ao longo do ciclo da cultura. Os sensores apresentaram desempenho estatístico similar às demais técnicas de MI avaliadas (baseadas em evapotranspiração e tensiometria), principalmente nas variáveis agrônômicas. Assim, esses sensores capacitados com lógica interpretativa simplificada se mostram particularmente adequados para agricultores com baixa escolaridade e em cenários de restrição de recursos. Ademais, a solução demonstrou potencial para registro de propriedade intelectual.

Os atmômetros manuais modificados (AMM), quando equipados com sensores capacitivos podem ser utilizados como uma alternativa de baixo custo para estimar a evapotranspiração de referência (ET_o), desde que associadas a estratégias de correção baseadas nas condições climáticas locais. O uso de LEDs difusos como indicativo visual do nível de evaporação possibilita a interpretação do estado hídrico de forma intuitiva, tornando a tecnologia acessível até mesmo para usuários leigos. Recomenda-se, contudo, a investigação futura de variáveis como a qualidade da água no desempenho dos sensores.

Embora os resultados desta pesquisa demonstrem que os dispositivos desenvolvidos contribuem para a democratização do acesso a ferramentas de MI baseadas em dados, promovendo o uso racional da água e a sustentabilidade da agricultura irrigada em contextos de pequena escala e baixa infraestrutura; pesquisas futuras permanecem necessárias, especialmente, testar os AMM no MI em condições de campo visando validar sua viabilidade operacional, além de integrar sensores confeccionados localmente às diversas soluções de MI propostas neste estudo.

REFERÊNCIAS

- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop Evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage paper 56. **Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations**, Rome, v. 56, n. 97, p. e156, 1998.
- BIRHANU, B. Z.; TABO, R. Shallow wells, the untapped resource with a potential to improve agriculture and food security in southern Mali. **Agriculture & Food Security**, London, v. 5, n. 1, p. 5, 2016.
- BORRELLI, P.; ROBINSON, D. A.; PANAGOS, P.; LUGATO, E.; YANG, J. E.; ALEWELL, C.; WUEPPER, D.; MONTANARELLA, L.; BALLABIO, C. Land use and climate change impacts on global soil erosion by water (2015-2070). **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, Washington, v. 117, n. 36, p. 21994–22001, 2020.
- BRINSON, K. R.; LEATHERS, D. J.; BRASHER, S. E. Influence of synoptic weather conditions on atmometers on the Delmarva Peninsula, USA. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 336, p. 109482, 2023.
- BRONER, I.; LAW, R. A. P. Evaluation of a modified atmometer for estimating reference ET. **Irrigation Science**, Berlin, v. 12, p. 21–26, 1991.
- CASTAÑEDA, A.; DOAN, D.; NEWHOUSE, D.; NGUYEN, M. C.; UEMATSU, H.; AZEVEDO, J. P. A new profile of the global poor. **World Development**, Oxford, v. 101, p. 250–267, 2018.
- DETHIER, J.-J.; EFFENBERGER, A. Agriculture and development: A brief review of the literature. **Economic systems**, Munich, v. 36, n. 2, p. 175–205, 2012.
- DOBRIYAL, P.; DOBRIYAL, P.; QURESHI, A.; QURESHI, A.; BADOLA, R.; BADOLA, R.; HUSSAIN, S. A.; HUSSAIN, S. A. A review of the methods available for estimating soil moisture and its implications for water resource management. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 458-459, p. 110-117, 2012.
- FONSECA DURÃES MATHEUS. Evaluation of Brazilian irrigated agriculture: what to expect? **African Journal of Agricultural Research**, Nairobi, v. 20(2), p. 132-144, 2024.
- GHIAT, I.; MACKEY, H. R.; AL-ANSARI, T. A review of evapotranspiration measurement models, techniques and methods for open and closed agricultural field applications. **Water**, Basel, v. 13, n. 18, p. 2523, 2021.
- GLEASON, D. J.; ANDALES, A. A.; BAUDER, T. A.; CHÁVEZ, J. L. Performance of atmometers in estimating reference evapotranspiration in a semi-arid environment. **Agricultural water management**, Amsterdam, v. 130, p. 27–35, 2013.
- HASAN, N.; PUSHPALATHA, R.; MANIVASAGAM, V. S.; ARLIKATTI, S.; CIBIN, R. Global sustainable water management: a systematic qualitative review. **Water Resources Management**, Amsterdam, v. 37, n. 13, p. 5255–5272, 2023.

HOOGEVEEN, J.; FAURÈS, J.-M.; PEISER, L.; BURKE, J.; VAN DE GIESEN, N. GlobWat – a global water balance model to assess water use in irrigated agriculture. **Hydrology and Earth System Sciences**, Göttingen, v. 19, n. 9, p. 3829–3844, 2015.

MAHMOOD, A.; OWEIS, T.; ASHRAF, M.; MAJID, A.; AFTAB, M.; AADAL, N. K.; AHMAD, I. Performance of improved practices in farmers' fields under rainfed and supplemental irrigation systems in a semi-arid area of Pakistan. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 155, p. 1–10, 2015.

MANE, S.; SINGH, G.; DAS, N. N.; KANUNGO, A.; NAGPAL, N.; COSH, M.; DONG, Y. Development of low-cost handheld soil moisture sensor for farmers and citizen scientists. **Frontiers in Environmental Science**, Lausanne, v. 13, p. 1590662, 2025.

MARGIWIYATNO, A.; SUDARMAJI, A.; SISWANTORO, S.; MASRUKHI, M.; IRAWADI, I.; WIJAYA, K.; KUNCORO, P. H.; SULISTYO, S. B.; FURQON, F. Use of Capacitive Sensors for Measuring Soil Water Content in Irrigation Systems: A Review. Em: BIO WEB OF CONFERENCES 2025, **Anais...** : EDP Sciences, 2025.

MEHTA, P.; SIEBERT, S.; KUMMU, M.; DENG, Q.; ALI, T.; MARSTON, L.; XIE, W.; DAVIS, K. F. Half of twenty-first century global irrigation expansion has been in water-stressed regions. **Nature Water**, London, v. 2, n. 3, p. 254–261, 2024.

MENDOZA-PÉREZ, C.; OJEDA-BUSTAMANTE, W.; SIFUENTES-IBARRA, E.; QUEVEDO-NOLASCO, A.; FLORES-MAGDALENO, H.; RAMÍREZ-AYALA, C.; ASCENCIO-HERNÁNDEZ, R. Estimación de la evapotranspiración de referencia mediante atmómetro con fines de calendarización de riego. **Idesia (Arica)**, Arica, v. 37, n. 4, p. 65–72, 2019.

NANDI, R.; SHRESTHA, D. Assessment of Low-Cost and Higher-End Soil Moisture Sensors across Various Moisture Ranges and Soil Textures. **Sensors**, Basel, v. 24, n. 18, p. 5886, 2024.

PARTRIDGE, T.; WINTER, J.; KENDALL, A.; BASSO, B.; PEI, L.; HYNDMAN, D. Irrigation benefits outweigh costs in more US croplands by mid-century. **Communications Earth & Environment**, London, v. 4, n. 1, p. 274, 2023.

PUY, A.; BORGONOVO, E.; LO PIANO, S.; LEVIN, S. A.; SALTELLI, A. Irrigated areas drive irrigation water withdrawals. **Nature Communications**, London, v. 12, n. 1, p. 4525, 2021.

SCHWAMBACK, D.; PERSSON, M.; BERNDTSSON, R.; BERTOTTO, L. E.; KOBAYASHI, A. N. A.; WENDLAND, E. C. Automated Low-Cost Soil Moisture Sensors: Trade-Off between Cost and Accuracy. **Sensors**, Basel, v. 23, n. 5, p. 2451, 2023.

SENTELHAS, P. C.; FOLEGATTI, M. V. Class A pan coefficients (Kp) to estimate daily reference evapotranspiration (ET_o). **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 7, p. 111–115, 2003.

SHEMER, H.; WALD, S.; SEMIAT, R. Challenges and solutions for global water scarcity. **Membranes**, Basel, v. 13, n. 6, p. 612, 2023.

SU, S. L.; SINGH, D. N.; BAGHINI, M. S. A critical review of soil moisture measurement. **Measurement**, Amsterdam, v. 54, p. 92–105, 2014.

SUI, R. Irrigation scheduling using soil moisture sensors. **J. Agric. Sci**, Cambridge, v. 10, n. 1, p. 1–10, 2017.

UNGUREANU, N.; VOICU, G.; VLĂDUȚ, V.; VOICU, G. Water scarcity and wastewater reuse in crop irrigation. **Sustainability (Switzerland)**, Basel, v. 12, n. 21, p. 1–19, 2020.

VANDÔME, P.; LEAUTHAUD, C.; MOINARD, S.; SAINLEZ, O.; MEKKI, I.; ZAIRI, A.; BELAUD, G. Making technological innovations accessible to agricultural water management: Design of a low-cost wireless sensor network for drip irrigation monitoring in Tunisia. **Smart Agricultural Technology**, Amsterdam, v. 4, p. 100227, 2023.

VILLAROMAN, C. J.; ESPINO, A.; LAVARIAS, J.; TAYLAN, V. Atmometer-based irrigation scheduling system for drip-irrigated onion (*Allium cepa* L.). Em: MATEC WEB OF CONFERENCES 2018, **Anais...** : EDP Sciences, 2018.

YU, L.; YU, L.; GAO, W.; GAO, W.; SHAMSHIRI, R. R.; SHAMSHIRI, R. R.; TAO, S.; TAO, S.; TAO, S.; REN, Y.; REN, Y.; ZHANG, Y.; ZHANG, Y.; SU, G.; SU, G. Review of research progress on soil moisture sensor technology. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, Beijing, v.14, n. 4, p. 32-42, 2021.