

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS
GERAIS - *CAMPUS* SÃO JOÃO EVANGELISTA

BACHARELADO EM AGRONOMIA

Felipe Ferreira de Medeiros

**AGRICULTURA DE PRECISÃO APLICADA EM PEQUENAS PROPRIEDADES
RURAIS: uso racional da água e manejo do solo**

São João Evangelista

2026

FELIPE FERREIRA DE MEDEIROS

**AGRICULTURA DE PRECISÃO APLICADA EM PEQUENAS PROPRIEDADES
RURALS: uso racional da água e manejo do solo**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso Bacharelado em Agronomia do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – *Campus* São João Evangelista, para obtenção do grau de Engenheiro Agrônomo.
Orientador: Dr. Rafael Carlos dos Santos

São João Evangelista

2026

M488a Medeiros, Felipe Ferreira de.

Agricultura de precisão aplicada em pequenas propriedades rurais: uso racional da água e manejo do solo. /Felipe Ferreira de Medeiros. – 2026.

37 f.

Orientador: Rafael Carlos dos Santos

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Agronomia) – Instituto Federal de Minas Gerais. *Campus São João Evangelista*, 2026.

1. Agricultura. 2. Manejo de solo. 3. Irrigação. I. Santos, Rafael Carlos dos. II. Instituto Federal de Minas Gerais. *Campus São João Evangelista*. III. Título.

CDD 631.4


Catálogo: Rejane Valéria Santos - CRB-6/2907

Felipe Ferreira de Medeiros


**AGRICULTURA DE PRECISÃO APLICADA EM PEQUENAS PROPRIEDADES
RURAIIS: uso racional da água e manejo do solo**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso Bacharelado em Agronomia do
Instituto Federal de Educação Ciência e
Tecnologia de Minas Gerais – *Campus* São
João Evangelista, para obtenção do grau de
Engenheiro Agrônomo.
Orientador: Dr. Rafael Carlos dos Santos


Aprovado em: 10 /02/2026 pela banca examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **RAFAEL CARLOS DOS SANTOS**
Data: 13/02/2026 06:51:59-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Rafael Carlos dos Santos (Orientador)

Documento assinado digitalmente
 **JONATHAN DA ROCHA MIRANDA**
Data: 10/02/2026 21:39:01-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^o Dr. Jonathan da Rocha Miranda

Documento assinado digitalmente
 **RENNAN DO AMARAL BASTOS**
Data: 11/02/2026 22:43:44-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^o Dr. Rennan do Amaral Bastos

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, a DEUS, que fez com que meus objetivos fossem alcançados, durante todos os meus anos de estudos e ter me permitido aprender, tentar, evoluir e por me permitir ultrapassar todos os obstáculos encontrados ao longo deste caminho.

Aos meus pais João Ferreira de Medeiros e Maria J. Ferreira Medeiros, que me incentivaram nos momentos difíceis e compreenderam a minha ausência enquanto eu me dedicava à conclusão desse curso. E minhas irmãs Flávia, Fabíola e Fernanda que também me deram forças para continuar até o fim.

Ao professor/coordenador Rafael Carlos dos Santos, por ter sido meu orientador e ter desempenhado tal função com dedicação e profissionalismo, e por termos a oportunidade de crescer juntos, fica aqui minha gratidão ao profissional.

Aos amigos e colegas que sempre estiveram ao meu lado, pela amizade incondicional e pelo apoio demonstrado ao longo de todo o período de tempo em que me dediquei a este trabalho (eu seria injusto ao citar nomes aqui, mas TODOS sabem da sua importância e relevância).

Às pessoas com quem convivi ao longo desses anos de curso, colegas e servidores do campus que me incentivaram e que certamente tiveram impacto na minha formação acadêmica e pessoal, fica aqui meus sinceros agradecimentos. E a todos que participaram, direta ou indiretamente do desenvolvimento deste trabalho de pesquisa, enriquecendo o meu processo de aprendizado.

Por último agradeço a mim mesmo (Felipe Ferreira de Medeiros) pela minha persistência e por não me deixar abalar pelas adversidades e pelos momentos negativos dessa trajetória, e por ter tido forças para continuar e continuar e acreditar em mim e nunca desistir.

RESUMO

Este estudo consiste em uma revisão bibliográfica sobre o uso da agricultura de precisão na produção de hortaliças em pequenas propriedades rurais, visando mapear tecnologias disponíveis, identificar lacunas nos processos produtivos e discutir seu potencial para promover o desenvolvimento rural sustentável e a segurança alimentar, com enfoque no uso racional da água. O texto discute os desafios atuais da agricultura, marcados por urbanização crescente, desigualdade social e mudanças climáticas, que agravam a pressão sobre a produção de alimentos em um contexto de escassez de água e pressões ambientais, para o uso racional desse importante recurso ambiental. Destaca-se a importância da segurança alimentar diante do aumento populacional projetado até 2050 e o papel estratégico do meio rural, com predominância de pequenas propriedades e modelo tradicional baseado em monoculturas intensivas, que acentuam impactos ambientais como erosão, salinização do solo e emissões de gases de efeito estufa. A baixa eficiência no uso da água, com pequena parcela da produção irrigada por sistemas formais e elevado déficit hídrico em áreas de sequeiro, reforça limitações estruturais que favorecem o êxodo rural e a vulnerabilidade social. Nesse cenário, a agricultura de precisão em pequenas áreas é apresentada como alternativa tecnológica e sustentável, ao integrar sensores, sistemas de informação e manejo avançado para aumentar a eficiência do uso da água e dos insumos, elevar a produtividade e apoiar a fixação da população no campo.

Palavras-chave: Água. Manejo. Tecnologia. AI.

ABSTRACT

This work consists of a literature review on the use of precision agriculture in the production of vegetables and legumes on small rural properties, aiming to map available technologies, identify gaps in production processes, and discuss their potential to promote sustainable rural development and food security with a focus on the rational use of water. The text addresses the current challenges of agriculture, marked by growing urbanization, social inequality, and climate change, which intensify pressure on food production amid water scarcity and environmental demands for the rational use of this vital resource. It highlights the importance of food security in light of the projected population growth by 2050, and the strategic role of rural areas dominated by smallholder farms, where the traditional model based on intensive monocultures exacerbates environmental impacts such as soil erosion, salinization, and greenhouse gas emissions. Low water-use efficiency—with only a small portion of production irrigated by formal systems and high water deficits in rainfed areas—reinforces structural limitations that encourage rural exodus and social vulnerability. In this context, precision agriculture on small scales emerges as a technological and sustainable alternative, integrating sensors, information systems, and advanced management practices to enhance water and input efficiency, boost productivity, and support population retention in rural areas.

Keywords: Water. Handling. Technology. AI.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	8
2. METODOLOGIA.....	10
2.1. Condução da pesquisa	10
2.2. Termos para indexação	10
2.3. Análise dos dados da pesquisa	10
3. REFERENCIAL TEÓRICO	12
3.1. Conceitos de irrigação no contexto da agricultura de precisão.....	12
3.2. Agricultura de precisão em hortaliças e legumes	17
3.3. Uso racional da água.....	21
3.4. Manejo do solo com apoio de tecnologias	22
3.5. Desafios e perspectivas futuras	26
4. CONCLUSÃO.....	29
REFERÊNCIAS	30

1. INTRODUÇÃO

A agricultura tem mostrado processos desafiadores que crescem ao longo do tempo no setor de produção agrícola. Tais desafios são aumentados pela maior concentração da população na área urbana, pela falta de água, pelos problemas ambientais e pela disputa por alimentos, em um panorama de aumento da desigualdade socioeconômica, além da crise climática. No Brasil, o total de área plantada alcançou aproximadamente 96,3 milhões de hectares em 2023, enquanto a safra de grãos atingiu recorde de 316,4 milhões de toneladas, um crescimento de 19,6 % em relação ao ano anterior. Porém, o valor da produção agrícola caiu 2,3 %, totalizando R\$ 814,5 bilhões, demonstrando uma desconexão entre volume e rentabilidade (IBGE, 2024).

As projeções da população mundial da FAO (2019) têm apontado para um aumento populacional até 2050 de aproximadamente 9 bilhões de pessoas, perante isso, a segurança alimentar veio a se tornar uma questão crucial atualmente. O setor rural possui seguimentos em desenvolvimento que tem cumprido uma função substancial na produção de alimentos (EMBRAPA, 2020). A maioria das fazendas, especialmente nos países em desenvolvimento, são unidades de pequena escala que enfrentam dificuldades para aplicar as tecnologias de agricultura de precisão (MIZIK, 2023). Nesse contexto, fica evidente que o modelo tradicional de plantio como a monocultura, com ênfase para a soja, milho e cana-de-açúcar, provoca consequências ambientais severas, tais como erosão do solo, salinização do solo e emissão de gases efeito estufa (IBGE, 2024).

No contexto da agricultura brasileira, o aproveitamento da água ainda é pouco eficiente. Levantamentos realizados pela MAPA/EMPRABA, indicam que apenas cerca de 7,5 % do volume aplicado passa por sistemas formais de irrigação, enquanto aproximadamente 92,5 % depende exclusivamente do regime hídrico natural da região, resultando em um déficit hídrico médio em áreas de sequeiro em torno de 37 % (ANA; IBGE, 2021). As limitações da agricultura de precisão em pequena escala vão estar relacionadas ao tamanho reduzido da área, ao maior custo de adoção, a escassez de tecnologia e a falta de apoio técnico, além da falta de políticas de apoio (MIZIK, 2023).

Tais informações apresentam as limitações estruturais do sistema agrícola tradicional, colocando em risco a segurança alimentar, favorecendo o êxodo rural e dificultando a fixação do homem no campo (ZEN; BRANDÃO; BREITENBACH, 2021). Diante desse panorama, a agricultura de precisão em pequenas áreas surge como o emprego de tecnologias que articulam sensores, sistemas de informação e estratégias de manejo avançado, visando

maximizar a eficiência no uso da água em sistemas agrícolas de caráter sustentável, uma alternativa tecnológica e sustentável que redefine as possibilidades do desenvolvimento rural que favorecem a segurança alimentar e a fixação da população rural (LAKHIAR *et al.*, 2024).

Diante da relevância da temática, o presente estudo fará uma revisão bibliográfica sobre o estado da arte da aplicação da agricultura de precisão na produção de hortaliças em áreas de pequena escala, em função de seu potencial para impulsionar a produtividade, fortalecer a competitividade das produtoras e alterar as dinâmicas socioeconômicas nos âmbitos agrícola, regional e ambiental, destacando-se como uma estratégia de grande relevância. Ao integrar inovação tecnológica, sustentabilidade e governança, configura-se não apenas como uma técnica promissora, mas como uma alternativa apta a enfrentar os desafios atuais relacionados à produção de alimentos no Brasil e no mundo.

Este trabalho tem como objetivo elaborar uma revisão bibliográfica para delinear as tecnologias da agricultura de precisão voltadas a produção em pequenas áreas, visando identificar as ferramentas/ inovações tecnológicas hoje disponíveis nos processos produtivos associados à produção de alimentos em menor escala.

2. METODOLOGIA

2.1. Condução da pesquisa

O método científico com detalhamento, replicável e transparente fornece uma base de dados confiável (FAGUNDES, *et al.*, 2024). O planejamento da revisão bibliográfica ocorreu em três partes. Na primeira parte foi realizado o planejamento do estudo, incluindo a identificação da demanda científica que motivou sua realização e a estruturação do protocolo de pesquisa. O segundo passo correspondeu à realização de uma busca sistemática e abrangente na literatura científica sobre o tema, uma vez que a revisão sistemática requer um grande número de referências, cujas inclusões no trabalho devem ser avaliadas com base em critérios previamente estabelecidos (PAGE *et al.*, 2021). Durante a avaliação dos trabalhos foram observados títulos, resumos e palavras-chave que possuem relação com a temática, sendo eliminados os que não concordam com o assunto de interesse.

2.2. Termos para indexação

A busca por trabalhos científicos e acadêmicos (artigos científicos, resenhas, relatórios técnicos, projetos de pesquisa, dissertações e teses) relacionados aos temas ocorreu por meio das seguintes palavras-chave: “*agricultura de precisão*”; “*manejo de solo*”; “*uso racional da água*”; “*irrigação de precisão*”; e “*IA*”. As palavras foram pesquisadas em cinco bases de dados, à saber: Google Acadêmico, *Web of Science*, SciELO, Scopus e Portal CAPES. Foram selecionadas pesquisas revisadas por pares e publicadas em periódicos indexados. Em todas as bases de dados, foram utilizados inicialmente opções de refinamento (filtros), como tipos de documentos relevantes (por exemplo, artigos de pesquisa) e limitação da amostra a áreas específicas, de modo a alcançar os estudos de maior interesse. Relatórios institucionais, artigos de conferências, Dissertações de Mestrado e Teses de Doutorado não serão considerados para este estudo, o refinamento foi limitado às Ciências Agrárias e Econômicas (FAGUNDES *et al.*, 2024).

2.3. Análise dos dados da pesquisa

O resultado das pesquisas realizada nas plataformas de dados passou por um processo de análise de conteúdo relevante, onde foram considerados os artigos publicados no período compreendido entre 1992 e 2024.

Foi feito um paralelo temporal sobre os artigos citados, ressaltando a dificuldade de encontrar uma sequência de trabalhos publicados ao longo do tempo, o que pode estar relacionado à mudança dos termos de indexação em relação aos que foram pesquisados. De 1992 à 2000 foi definido como um período de estágios críticos para a irrigação, com foco no manejo empírico da água (SANTOS 1992) observou-se um número reduzido de trabalhos publicados para os termos pesquisados. No período de 2000 à 2010 obteve-se um aumento no número de trabalhos encontrados, onde se inicia de fato a agricultura de precisão (AP) com o auxílio de GPS, com taxa variável empregada, máquinas automatizadas com destaque para os autores (SASAO & SHIBUSAWA 2000) E (GOWDIN 2003). Seguidos pelo período de 2010 à 2018 com a popularização dos sensores de solo, sensoriamento remoto e sistemas de apoio a tomada de decisão. A partir daí a agricultura de precisão é adaptada as pequenas propriedades para produção em pequenas escalas (início da expansão dos sistemas inteligentes e IoT). E por fim temos o período de 2019 à 2024 onde a IA, IoT, sistemas de irrigação inteligente (SIS) e automação em tempo real para diversas máquinas sendo (LAKIAR 2024) a maior fonte de referência. A literatura analisada mostra uma clara evolução da (AP) agricultura de precisão que parte de fundamentos agrônômicos clássicos e avança até sistemas hoje baseados em IA e IoT.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1. Conceitos de irrigação no contexto da agricultura de precisão

A agricultura de precisão (AP) é uma abordagem que utiliza tecnologias avançadas para modificar o manejo agrícola, fornecendo soluções capazes de observar, quantificar e interpretar as necessidades específicas de áreas e culturas (ALISA, 2019). Fundamentada na variabilidade espaço-temporal das lavouras, a AP configura-se como uma estratégia de gestão de alta exatidão, ao integrar dados temporais, espaciais e individuais a outras informações agronômicas. Esse conjunto de procedimentos possibilita a tomada de decisões ajustadas à variabilidade particular de cada talhão, maximizando o uso de insumos e melhorando a produtividade, a qualidade, a rentabilidade e a sustentabilidade da atividade agrícola (ISPA, 2021).

A agricultura de precisão de culturas ou manejo sítio-específico de culturas é um conceito baseado em sensoriar ou observar e responder, por meio de ações de manejo, à variabilidade espacial e temporal nas lavouras. O componente de “sensoriamento” desse conceito é um elemento fundamental da agricultura de precisão de culturas (MONTEIRO *et al.*, 2021).

A irrigação de precisão é descrita como a aplicação de tecnologias que integram sensores, sistemas de informação e manejo especializado para otimizar a eficiência do uso da água em operações agrícolas sustentáveis. Além disso, a lucratividade econômica, a preservação ambiental e a sustentabilidade são os principais objetivos da irrigação de precisão. Monitorar e controlar o uso da água de irrigação para uma gestão eficiente dos recursos hídricos é uma das características centrais da irrigação de precisão, que tem despertado grande interesse nos últimos anos (LAKHIAR *et al.*, 2024).

Pesquisas recentes evidenciam que o uso de sensores instalados em campo e nas plantas começam a fornecer dados granulares sobre as condições do solo, bem como informações detalhadas sobre clima, necessidade de fertilizantes, disponibilidade de água e infestações de pragas. Além disso, imagens aéreas capturadas por veículos não tripulados, equipes de campo ou drones podem patrulhar as áreas cultivadas, alertar os produtores sobre maturação das culturas ou possíveis problemas e fornecer avisos antecipados de desvios em relação às taxas de crescimento ou à qualidade esperadas (MONTEIRO *et al.*, 2021).

O avanço desse conceito inovador para aumentar a eficiência da água aplicada e dos métodos de irrigação deve-se principalmente à evolução recente das tecnologias de

comunicação, especialmente a Internet das Coisas (IoT) e as redes de sensores sem fio (WSN). Esses avanços tecnológicos abrem caminho para reduzir cargas de trabalho redundantes em condições extremamente desafiadoras, como atividades de campo, monitoramento e controle frequentes e uso de insumos (LAKHIAR *et al.*, 2024).

Essas técnicas envolvem muitos dispositivos eletrônicos embarcados acoplados a softwares capazes de gerar inúmeras oportunidades de integração do mundo físico a sistemas de monitoramento e controle em tempo real baseados em computador. Em última análise, essa combinação melhora a efetividade e a precisão e reduz os custos com insumos, com mínima intervenção humana. Além disso, a arquitetura de um sistema de irrigação inteligente é composta por vários componentes-chave (como dispositivos, estrutura de rede e tecnologia em nuvem) que atuam conjuntamente para coletar, processar, monitorar e transmitir dados, permitindo a comunicação entre dispositivos. Uma arquitetura básica de irrigação inteligente pode ser dividida em três camadas: percepção, rede e aplicação. Essas três camadas dão suporte aos dispositivos inteligentes por meio da coleta e do processamento de dados (LAKHIAR *et al.*, 2024).

Satélites também podem servir à agricultura de precisão de culturas, facilitando a detecção de alterações relevantes na área por meio de imagens de satélite (MONTEIRO *et al.*, 2021).

Abioye *et al.*, (2020) definem estratégias de controle avançadas como um amplo conjunto de técnicas modernas utilizadas em processos e sistemas de controle industriais, inseridas no subcampo da teoria de controle na engenharia elétrica e na matemática. No entanto, o controlador de irrigação é a parte central do sistema de irrigação, pois auxilia no gerenciamento do volume de água requerido para irrigação em um determinado período, resultando em elevada eficiência no uso da água e dos fertilizantes.

A irrigação de precisão é descrita como a aplicação de tecnologias que integram sensores, sistemas de informação e manejo especializado para otimizar a eficiência do uso da água em operações agrícolas sustentáveis. Além disso, as estratégias de controle de irrigação são divididas em dois sistemas principais: malha aberta (*open-loop*) e malha fechada (*closed-loop*). A pesquisa conduzida por Bwambale *et al.*, (2022) enfatizou que o monitoramento de irrigação inteligente envolve a coleta de dados em tempo real sobre o solo, as plantas e o clima, e que o estabelecimento de um sistema de monitoramento em tempo real exige a integração de vários sensores com tecnologias acessíveis de transferência de dados. Métodos de monitoramento de irrigação inteligente podem basear-se em abordagens centradas no solo, no clima ou na planta. Portanto, tecnologias de monitoramento, teoria de controle e sistemas

de apoio à decisão devem ser cuidadosamente consideradas em um sistema de irrigação eficiente para proporcionar uma configuração de irrigação de precisão (LAKHIAR *et al.*, 2024).

O interesse dos pesquisadores em explorar diferentes abordagens de SIS (*Smart Irrigation Systems*) vem crescendo, com o objetivo de reduzir o uso de água sem prejudicar o crescimento das culturas nem ampliar a pegada ambiental. Os avanços tecnológicos impulsionam os Sissa e oferecem grande potencial para otimizar de forma eficiente o uso da água, a produtividade das culturas e os impactos ecológicos.

Hassan *et al.*, (2024) afirmaram que determinar com precisão a localização e a posição dos nós sensores é crucial na irrigação inteligente, propondo, assim, uma nova ferramenta de localização para nodos desconhecidos, baseada no algoritmo de otimização de Levenberg-Marquardt, que alcançou melhorias de 19 % e 58 % na exatidão em comparação com outros dois métodos. Em outro trabalho, Benameur *et al.*, (2024) apresentaram um SIS de baixo custo, completo, baseado em computação em névoa (fog), IoT e IA, integrado a um módulo de detecção de anomalias com autoencoder, obtendo taxas de acurácia de 90 % (umidade do solo), 95 % (temperatura do ar) e 97 % (umidade relativa do ar).

Al Mashhadany *et al.*, (2024) utilizaram sensores acoplados à IoT para examinar remotamente a variação de parâmetros agrometeorológicos, avaliando tendências diárias e de longo prazo, e empregaram ferramentas de inteligência artificial para regular a irrigação, detectar pragas, doenças e apoiar o manejo, otimizando significativamente a eficiência do uso da água ao monitorar em tempo real o estado das plantas e ajustar corretamente os intervalos de irrigação. Alce *et al.*, (2024) desenvolveram um SIS para o manejo da irrigação do arroz usando tecnologia WAN de baixo custo (módulo LoRa), mostrando que a adoção do SIS pode reduzir substancialmente o consumo de água ao fornecer informações em tempo real aos agricultores por meio de um serviço de mensagens inteligente.

Morchid *et al.*, (2024) apresentaram um sistema de irrigação inteligente com computação em nuvem, sistemas embarcados e ferramentas de IoT para monitorar e controlar o consumo de água, demonstrando redução de 70 % na água utilizada para irrigação ao empregar o sistema proposto, com acesso remoto dos agricultores aos dados da propriedade via plataformas em nuvem. Manocha *et al.*, (2024) projetaram um SIS inspirado em gêmeo digital e IoT, concluindo que a abordagem oferece uma solução promissora para criar sistemas capazes de aumentar o crescimento e desenvolvimento das culturas, elevar a eficiência do uso da água e minimizar desperdícios. Abbas *et al.*, (2024) desenvolveram um

algoritmo inteligente de controle e monitoramento para diferentes plantas, relatando alta precisão e desvio médio absoluto relativo de 5,46 %.

Singh *et al.*, (2024) concluíram que sistemas de monitoramento e controle de estufas baseados em IoT podem auxiliar produtores na adoção de soluções modernas de baixo custo, fáceis de usar e duráveis, capazes de monitorar e regular com precisão temperatura, umidade, intensidade luminosa, níveis de CO₂ e umidade do solo, sendo crucial a escolha de uma rede de sensores adequada. Vandôme *et al.*, (2023) projetaram uma rede de sensores sem fio de baixo custo, baixa tecnologia e baixo consumo energético, de código aberto, baseada em IoT, para irrigação por gotejamento, que pode servir como ferramenta de apoio à decisão para o manejo em tempo real da água de irrigação.

Vakula Rani *et al.*, (2023) apresentaram um SIS para monitoramento do crescimento de plantas usando veículos aéreos não tripulados (UAVs) e tecnologia IoT, capaz de acompanhar parâmetros como umidade do solo, clima, nível de água e estado de saúde das plantas, além de decidir, *in situ*, quando e quanto irrigar. Seyar & Ahamed (2023) desenvolveram um SIS baseado em IoT (LoRaWAN) para tomateiro, usando gotejamento de superfície e subsuperficial, recomendando a integração do SIS a ambos os métodos e destacando sua operação simples e forte capacidade de monitoramento e controle em condições de campo aberto.

Dahane *et al.*, (2022) propuseram um método Edge-IoT-Cloud para SIS, baseado em aprendizado profundo, capaz de monitorar e prever com eficiência os intervalos de irrigação. Shahidi *et al.*, (2022) projetaram um SIS usando IoT com sensores de temperatura, umidade do ar e umidade do solo para coletar dados em campo, analisando em tempo real essas informações e previsões climáticas on-line para decidir a lâmina de irrigação adequada ao crescimento das plantas. Chithra *et al.*, (2022) apresentaram um SIS para sistemas de aspersão utilizando Raspberry Pi e sensores sem fio, relatando que o sistema auxilia os agricultores a compreender melhor as condições de campo, a usar de forma eficiente os insumos e a automatizar a irrigação por aspersão.

Cheema *et al.*, (2022) desenvolveram um SIS por meio de um aplicativo Android chamado “Kistan Pakistan”, que permite aos agricultores monitorar remotamente umidade do solo, pH e parâmetros climáticos, ajudando-os a entender variações de qualidade do solo, fatores ambientais e padrões de cultivo, além de oferecer recomendações sobre irrigação, colheita, pragas, doenças e plantas daninhas. Pham *et al.*, (2022) apresentaram um SIS econômico e completo baseado em Edge-IoT/IA, denominado “irrigação inteligente na caixa”, voltado a pequenos produtores, que pode ser implantado rapidamente com

infraestrutura tecnológica mínima, mesmo em áreas rurais e remotas, sem necessidade de acesso à internet, servidores em nuvem ou plataformas proprietárias.

Chakraborty *et al.*, (2022) propuseram um SIS baseado em IoT para monitorar parâmetros ambientais e controlar a irrigação remotamente, usando o aplicativo BLYNK com microcontroladores Arduino e ESP32, concluindo que a interface é amigável e que o sistema, construído com componentes baratos, oferece uma solução de médio custo para aumentar a eficiência hídrica e o crescimento das culturas. Sahoo *et al.*, (2022) desenvolveram um SIS para sistemas de irrigação por pivô central, testando a ferramenta em três cenários com diferentes tipos de solo, culturas e incertezas climáticas e verificando acerto na previsão dos intervalos de irrigação, manutenção das plantas sem estresse e maximização de produtividade, eficiência de uso da água e eventos de irrigação. Xie *et al.*, (2022) apresentaram um SIS para pomares de lichia, usando dados de umidade do solo e clima como entrada em um algoritmo de otimização por enxame de partículas aprimorado, relatando alta exatidão, facilidade de uso e adequação para monitorar e controlar em tempo real o ambiente do pomar.

Chen *et al.*, (2021) utilizaram um algoritmo de deep Q-learning e previsões meteorológicas de curto prazo para definir intervalos de irrigação em arroz irrigado, demonstrando confiabilidade das previsões diárias e eficácia da estratégia para economia de água em diferentes áreas. Gimpel *et al.*, (2021) desenvolveram um SIS para árvores urbanas com IoT, usando dados agrometeorológicos como entrada e reduzindo de forma significativa o uso de água ao tomar decisões corretas de irrigação. Zia *et al.*, (2021) compararam a eficiência de um dispositivo baseado em IoT e um sistema de decisão agrícola para otimizar a eficiência de uso da água, obtendo economia de 50% no consumo hídrico e aumento de 35% na produtividade em relação ao agendamento tradicional.

Mohammed *et al.*, (2021) criaram um SIS em nuvem baseado em IoT integrado a gotejamento subsuperficial para monitorar e controlar a irrigação de tamareiras, mostrando redução de 61 - 64,1 % no consumo de água em comparação com a irrigação superficial convencional. Nath *et al.*, (2021) utilizaram um sistema de sensores para monitorar o clima interno de estufas e a umidade do solo a fim de acompanhar e controlar o nível de água no solo para irrigação automática. O sistema proposto coleta informações de temperatura e umidade do solo no campo por meio de um sistema de IoT, enviando automaticamente os dados de monitoramento em tempo real para um servidor web.

Mousavi *et al.*, (2020) propuseram uma ferramenta criptográfica híbrida baseada em criptografia de curva elíptica, algoritmo de hash seguro e cifragem Rivest para coletar informações em tempo real em SISs baseados em IoT. Ainda segundo Mousavi *et al.*, (2020),

a ferramenta consegue se proteger contra diversos ataques ocultos e desconhecidos, como o ataque *Man-in-the-middle* (ataque cibernético em que um invasor se coloca no meio da comunicação entre duas partes, sem que elas percebam), e apresenta desempenho superior a outras ferramentas criptográficas. Fraga-Lamas *et al.*, (2020) apresentaram o desenho de um SIS baseado em uma arquitetura LoRaWAN para locais onde dispositivos SIS-IoT não têm acesso direto à internet, mostrando boa precisão e viabilidade em áreas remotas.

Guillén-Navarro *et al.*, (2020) propuseram um SIS baseado em IoT para sistemas de irrigação por aspersão, projetado com um modelo multivariado de memória de longo e curto prazo (LSTM) para prever variações de temperatura, relatando que o método previu a temperatura com alta precisão (R^2 maior que 0,97), o que ajudou a economizar uma quantidade significativa de água usada em práticas anti-geada.

Os estudos recomendam adotar ou integrar diversos esquemas de SIS a sistemas de irrigação tradicionais, como gotejamento ou aspersão. A adoção de esquemas de SIS pode contribuir significativamente para melhorar e aumentar a eficiência do uso da água pelas culturas, elevar a produtividade e reduzir a pegada ambiental, sendo particularmente adequada para áreas com problemas extremos de escassez hídrica (Lakhiar *et al.*, 2024).

3.2. Agricultura de precisão em hortaliças e legumes

Sistemas de irrigação de precisão/inteligentes para economia de água (PISs/SISs) são essenciais por várias razões: eles ajudam a gerir e utilizar de forma eficiente os recursos hídricos disponíveis, aumentando a produtividade das culturas e reduzindo a pegada ambiental. A adoção de métodos eficientes de manejo da água pode reduzir significativamente o volume de água aplicado nas áreas agrícolas e, ao mesmo tempo, aumentar a produção das culturas.

Resultados de pesquisas anteriores indicam que melhorias apenas na eficiência de irrigação podem suprir cerca de 50 % do aumento esperado na demanda por água. Além disso, o manejo eficiente da água (EWM, sigla em inglês para *efficient water management*) é uma solução fundamental para a viabilidade de longo prazo da produção e do processamento de alimentos em escala global. O EWM é essencial para uma distribuição equitativa da água e para aumentar a resiliência às mudanças climáticas e a outros choques, especialmente em cenários de escassez hídrica. Ele também é considerado um dos componentes centrais para alcançar o desenvolvimento sustentável, pois se relaciona diretamente com vários Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU, incluindo água potável e saneamento (ODS

6), ação contra a mudança global do clima (ODS 13) e cidades e comunidades sustentáveis (ODS 11) (LAKHIAr *et al.*, 2024).

Olatunde *et al.*, (2024) afirmam que, historicamente, o manejo da água tem sido um componente crítico das civilizações humanas por milênios, evoluindo desde simples sistemas de irrigação agrícola na antiguidade até complexas redes modernas de barragens, canais e estações de tratamento de água. Na era moderna, bombas motorizadas, sistemas eficientes de abastecimento, filtragem e tratamento químico melhoraram enormemente a qualidade e a disponibilidade da água. No entanto, ainda persistem desafios quanto à distribuição equitativa e ao manejo sustentável. Além disso, o EWM exige conhecimento aprofundado e métodos modernos de resolução de problemas para aumentar a eficiência do uso da água na agricultura, frequentemente por meio da modernização de sistemas de irrigação existentes para torná-los mais eficientes e compatíveis com novas tecnologias.

Sinwar *et al.*, (2020) relatam que os problemas globais de escassez de água podem ser mitigados pela adoção de sistemas de EWM capazes de irrigar mais culturas por área com menor consumo de água. Sistemas de irrigação por aspersão e gotejamento utilizam menos água em comparação com métodos de irrigação de superfície. O principal problema, porém, é que esses sistemas requerem envolvimento humano constante para operar (ligar e desligar válvulas e bombas de água). Ao contrário dos métodos tradicionais, a aspersão e o gotejamento são altamente eficientes e economizam água, mas precisam de operadores para serem acionados, controlados e monitorados. A eficiência desses sistemas pode ser aumentada por meio da adição de funcionalidades modernas ou tecnologias de precisão, de forma a torná-los sistemas inteligentes.

A implementação desses sistemas em conjunto com métodos de irrigação de superfície pode melhorar a eficiência e contribuir para uma distribuição mais equitativa da água entre os agricultores (por exemplo, por meio de “cartões de água”). Métodos inteligentes permitem que esses sistemas funcionem sem intervenção humana. As ferramentas inteligentes monitoram continuamente o nível de água no campo, prevendo e comparando o conteúdo hídrico disponível no solo e nas plantas com suas necessidades regulares. Quando a planta precisa de água, o sistema envia automaticamente comandos para aspersores ou gotejadores iniciarem o funcionamento até que as necessidades hídricas da cultura sejam atendidas (LAKHIAr *et al.*, 2024).

O período crítico em relação ao déficit de umidade do solo varia amplamente entre as hortaliças e está diretamente associado aos estádios fenológicos mais sensíveis de cada espécie, de modo que qualquer limitação hídrica nesses momentos pode comprometer

severamente o rendimento e a qualidade do produto colhido. O período de maior sensibilidade ao déficit de umidade do solo varia conforme à cultura, ocorrendo pouco antes da colheita em plantas de alface, na fase de floração e tuberação da batateira e nos primeiros 60 dias de crescimento das plantas de beterraba. Em brócolis e couve-flor, o déficit hídrico é especialmente prejudicial durante a formação da inflorescência, ao passo que em cebola o momento mais crítico ocorre no desenvolvimento do bulbo, e em cenoura, principalmente nos primeiros 40 dias de ciclo de crescimento (SANTOS *et al.*, 1992).

Leguminosas como ervilha e lentilha mostram maior demanda hídrica no enchimento de vagens e na floração, enquanto cucurbitáceas como melancia, melão, pepino e poáceas como o milho-doce requerem atenção reforçada desde o florescimento até a colheita, quando a formação e o enchimento dos frutos ou grãos são mais vulneráveis ao estresse hídrico. Em culturas de raiz e tubérculo, como nabo e rabanete, o período crítico se estende do desenvolvimento das raízes até a colheita, e em espécies como morango, pimentão, repolho e tomate, a fase-chave está ligada ao desenvolvimento, formação e maturação dos frutos ou “cabeças”, reforçando a importância de um manejo de irrigação ajustado a cada fase do ciclo para assegurar produtividade e qualidade comercial (SANTOS *et al.*, 1992).

Além disso, a transformação digital de praticamente todos os setores tem sido, nos últimos anos, o grande objetivo para obter o máximo de resultado com a utilização de um mínimo de insumo. Essa transformação digital influenciou positivamente a agricultura tradicional e aumentou sua eficiência. Os resultados mostram que hoje se fala na transformação da agricultura tradicional em agricultura digital ou Agricultura 4.0. O carro-chefe das tecnologias modernas associadas à transformação digital é a capacidade de obter medições *in situ*, de forma remota e em tempo real, sem esforços humanos adicionais. Essa vanguarda tecnológica desloca o interesse dos produtores para o uso de ferramentas de agricultura de precisão na solução de problemas e na consideração da agricultura como um sistema ciberfísico, apoiando melhor compreensão e modelagem dos processos físicos. Contudo, os principais objetivos da introdução de tecnologias de precisão na agricultura tradicional são apoiar o processo de tomada de decisão e incorporar fontes de energia verde em propriedades agrícolas inteligentes (LAKHIAR *et al.*, 2024).

Para alcançar esses objetivos na agricultura tradicional, o uso combinado de diversas ferramentas tecnológicas modernas (como sensores sem fio, Internet das Coisas, sistemas de posicionamento global, sensoriamento remoto e outros sistemas de automação, monitoramento, controle e gestão da informação) é essencial. O sistema de irrigação de precisão (PIS, sigla em inglês para *precision irrigation system*) fundamenta-se em diversas

teorias e conceitos interdisciplinares que abrangem ciências ambientais, tecnologia e políticas socioeconômicas. Em sua essência, esses sistemas utilizam os princípios de sistemas ciberfísicos, em que a infraestrutura física de água é monitorada e controlada por algoritmos baseados em computador, integrando a dinâmica do ambiente físico com o software para alcançar um manejo da água mais eficiente, confiável e sustentável. Essa inovação tecnológica pode ser vital para o avanço do setor de manejo da água, oferecendo soluções para melhorar a eficiência do uso da água (WUE, sigla em inglês para *water use efficiency*), o monitoramento, o tratamento e a distribuição equitativa de água entre os agricultores. Assim, as tecnologias utilizadas em PIS estão na vanguarda da transformação das abordagens tradicionais de manejo hídrico. Essas tecnologias possibilitam o monitoramento em tempo real dos sistemas de água, análises preditivas para gestão de oferta e demanda e a detecção eficiente de vazamentos e avaliação da qualidade da água, aprimorando a sustentabilidade e a resiliência dos recursos hídricos (LAKHIAr *et al.*, 2024).

Estudos anteriores relataram as possíveis vantagens dos PISs/SISs. Resultados obtidos por Gabuya *et al.*, (2024) demonstraram que, em comparação com o método de irrigação manual, os SISs economizaram 19 % de água, aumentaram a taxa de crescimento da cultura e o número de folhas de mudas de café. Zeng *et al.*, (2023) propuseram um SIS para a cultura do arroz e relataram que o uso de ferramentas de tecnologia moderna para gerir de forma eficiente os recursos hídricos disponíveis tem recebido atenção crescente entre os pesquisadores. O SIS proposto combinou sistemas de monitoramento, controle e computação em nuvem para otimizar a eficiência e reduzir a carga de trabalho do produtor, além de realizar processos de irrigação automatizados para economizar água e melhorar a WUE.

Lakshmi *et al.*, (2023) observaram que, comparativamente ao sistema de irrigação convencional, o SIS proporcionou redução de 46 % do consumo de água e maior produtividade das culturas usando Laphatphakhanut *et al.*, (2021) utilizaram um SIS baseado em IoT e constataram que o uso de água diminuiu 40,29 % (irrigação em regime alternado de alagamento e drenagem) e 29,22 % (irrigação em bacias), em comparação com o método tradicional. Barkunan *et al.*, (2019) relataram reduções no uso de água em plantio de arroz irrigado em sistema automatizado equivalentes a 41,5 % sob alagamento convencional e 13 % em gotejamento. Mason *et al.*, (2019) simularam, com o software CROPWAT 8.0, como um SIS poderia gerir e reduzir o consumo de água sem afetar a produção de tomate; os resultados mostraram que o SIS reduz o uso de água em 59 %, sem comprometer a produtividade. González-Briones *et al.*, (2019) relataram redução significativa no consumo de água (15,06

%) em comparação com a irrigação automática tradicional ao otimizar a irrigação em uma cultura de batata.

Em síntese, os sistemas de irrigação de precisão para economia de água representam uma abordagem sustentável de manejo hídrico diante da crescente escassez de água e das mudanças climáticas. Os PISs podem incorporar e integrar todos os desafios e avanços para oferecer novas e melhores soluções e serviços a todos os envolvidos. Portanto, as práticas tradicionais de aplicação e manejo da água de irrigação precisam ser aprimoradas para atender às demandas crescentes e os agricultores devem adotar os mais recentes avanços em aplicação e gestão da água de irrigação. O principal objetivo do uso de tecnologias de irrigação de precisão para economia de água na agricultura é melhorar a conservação hídrica por meio de ferramentas avançadas, como sensores de umidade do solo, controladores de irrigação e instrumentos de coleta e análise em tempo real de dados climáticos (LAKHIAR *et al.*, 2024).

3.3. Uso racional da água

O setor de irrigação tradicional mudou significativamente nos últimos 50 anos. A razão por trás dessa mudança é o aumento das mudanças climáticas, problemas de seca, urbanização e crescimento populacional. Essa tendência aumentou o interesse dos pesquisadores em buscar e desenvolver métodos modernos de otimização da irrigação para obter maior WUE e produtividade das culturas. Diversos estudos já relataram a importância dos sistemas conduzidos por pressão. Esses sistemas são os melhores métodos de economia de água de irrigação quando comparados às práticas conduzidas por gravidade. Eles podem ajudar a maximizar a produtividade das culturas e aumentar a WUE ao fornecer água no local desejado, com base nas necessidades hídricas da planta (LAKHIAR *et al.*, 2024).

Além disso, estudos apontam que sistemas conduzidos por pressão podem atingir de forma eficiente um objetivo específico ao entregar diretamente nutrientes e água aplicados às raízes das plantas em várias formas (como gota a gota ou em névoa, semelhante à chuva). O principal benefício dos sistemas conduzidos por pressão podem é manter a umidade do solo em níveis ótimos, reduzindo perdas de água por escoamento superficial e percolação.

Anjum *et al.*, (2023) relataram que a irrigação de superfície (bacia, faixa e sulco) representa cerca de 84-85 % das áreas irrigadas do mundo e é uma das formas mais comuns de aplicação de água de irrigação globalmente. Este estudo também relatou a eficiência de aplicação de água de vários métodos de irrigação, incluindo irrigação de superfície (50-70 % para sulco, 40– 60 % para faixa e 40 % para bacia) e irrigação sob pressão (65 -95 % para

gotejamento e 50 - 90 % para aspersão). No entanto, de modo geral, os sistemas de irrigação de superfície fornecem uma eficiência de 40 - 70 %, e a irrigação sob pressão oferece até 95 % de eficiência.

Em resumo, todas as aplicações de irrigação têm suas vantagens e desvantagens. A integração de ferramentas de tecnologia inteligente e a atualização dos sistemas de irrigação com infraestrutura moderna podem melhorar ainda mais a eficiência do consumo de água. Assim, a utilização de novas tecnologias nos sistemas de irrigação atualmente disponíveis é essencial para o avanço das práticas de manejo da água.

O agendamento de irrigação é a aplicação que determina a duração e a quantidade de água de irrigação a ser aplicada em um campo para atender completamente às necessidades hídricas das plantas. Seus padrões não gerenciados podem afetar significativamente WUE e a produtividade das plantas. Além disso, um agendamento de irrigação não gerenciado pode aumentar as chances de subirrigação ou encharcamento no campo. Ambas as condições podem elevar a possibilidade de lixiviação de nutrientes abaixo da zona radicular, reduzir o crescimento das plantas, desperdiçar insumos e contribuir para problemas ambientais adversos (LAKHIAR, 2024).

3.4. Manejo do solo com apoio de tecnologias

A detecção de limites e/ou zonas para a PA é a base para medidas sítio-específicas, o que representa um desafio ainda maior em países em desenvolvimento, especialmente na África e na Ásia. Soluções baratas e fáceis de usar são essenciais, já que esse é um ponto-chave para a adoção de muitas tecnologias de PA.

Zha *et al.*, (2019) desenvolveram na China um modelo de produtividade baseado em satélites que permite a delimitação de zonas de manejo em nível de aldeia. Isso pode ajudar pequenos agricultores a otimizar insumos e obter melhores retornos. Deve-se considerar que 80 % das propriedades chinesas são pequenas, e o manejo inadequado de fertilizantes nitrogenados é um problema generalizado (Cammarano *et al.*, 2020). Por isso, Cammarano *et al.*, (2020) propuseram um sistema baseado em satélite capaz de delimitar um pequeno número de zonas de manejo em vez do enorme número de propriedades individuais.

Em comparação ao grande número de talhões, trabalhar com apenas 3 - 4 zonas poderia gerar maiores benefícios econômicos, desde que a coerência espacial dessas zonas seja alta. Essa delimitação de zonas seria o primeiro passo para aplicar o manejo de fertilização em taxa variável e melhorar o desempenho financeiro mesmo em propriedades

não mecanizadas. Yang *et al.*, (2020) também propuseram algoritmos automáticos, baseados em satélites, para detecção de limites de talhões de pequenos agricultores em Bangladesh. Sistemas desse tipo podem ajudar a coletar dados relevantes em pequenas propriedades, oferecendo oportunidades de previsão de produtividade ou de alocação de recursos.

É importante distinguir entre a delimitação de zonas de manejo e o uso cadastral da PA. Persello *et al.*, (2019) destacaram que os limites pouco claros dos talhões de pequenos agricultores na Nigéria tornam a delimitação automática quase impossível. Para solucionar esse sério problema cadastral, os autores sugeriram um sistema baseado em satélite que supera significativamente, em termos de custo-benefício, as técnicas atualmente utilizadas. Isso possibilitaria o uso de alguns elementos das tecnologias de PA que, de outro modo, não poderiam ser empregados.

Medidas sítio-específicas são o elemento central da PA. Dobermann *et al.*, (2002) evidenciaram a importância do manejo sítio-específico de nutrientes com base em experimentos em 179 áreas agrícolas na Ásia. Além da economia de custos, a prevenção do uso excessivo de N contribuiu para reduzir a incidência de pragas. O manejo de macronutrientes ajustado a cada talhão resultou em aumentos significativos de produtividade do arroz e, em termos de lucratividade, um crescimento médio de 12 % pode ser esperado.

No entanto, esse método precisa ser ajustado ao contexto de cada país. Cao *et al.*, (2012) também enfatizaram a importância do manejo sítio-específico de N para pequenas propriedades chinesas. Com o manejo de N em agricultura de precisão, é possível obter economias significativas em custos de fertilizante e evitar tanto a subfertilização quanto a sobrefertilização. Segundo Natcher *et al.*, (2016), a “microdosagem” de fertilizantes é um método amplamente utilizado em países da África Subsaariana devido aos preços altos e muitas vezes inacessíveis dos fertilizantes. A microdose corresponde a cerca de um quarto da dose recomendada, mas é aplicada com melhor momento e posicionamento (distância da planta e profundidade).

Park *et al.*, (2018) identificaram que pequenos agricultores como uma limitação ao uso de tecnologias de precisão, por exemplo, o baixo uso de fertilizantes. Historicamente, agricultores nepaleses não observaram impacto significativo de lucro com o aumento do uso de fertilizantes, o que os desestimulou a adotá-los. Os autores recomendaram a implementação de mecanização simples e de baixo custo em vez das práticas com distribuição manual normalmente utilizadas.

Godwin *et al.*, (2003) compararam os custos e benefícios de diferentes tecnologias de agricultura de precisão no Reino Unido. Segundo os resultados, sistemas básicos podem ser

economicamente viáveis a partir de 78 ha, enquanto o sistema mais caro exige 308 ha. Os benefícios da aplicação de N em taxa variável superaram os custos da tecnologia, e a agricultura de precisão pode ainda gerar outros ganhos econômicos (por exemplo, menor necessidade de herbicidas) e evitar perdas (como erros na aplicação de fertilizantes).

De modo geral, a agricultura japonesa é caracterizada por pequenas propriedades; Sasao e Shibusawa (2000) chamam a atenção para tecnologias de precisão “livres de escala”, que podem ser aplicadas em todas as fazendas, independentemente do seu tamanho. O termo “livre de escala” também pode ser chamado de “neutro em relação à escala”. Eles constataram que apenas o controle manual é viável abaixo de um ha; máquinas automatizadas e diferentes sensores podem ser usados entre 1 e 10 ha; tecnologias baseadas em GPS funcionam entre 10 e 50 ha; enquanto tecnologias de taxa variável (VRT, sigla em inglês para *variable rate technologies*) podem ser aplicadas acima de 50 ha. Além do aumento da produtividade e, conseqüentemente, do lucro, a agricultura de precisão resulta em menor impacto ambiental. O conhecimento do agricultor pode funcionar bem em uma área pequena com número limitado de parcelas, mas isso se torna mais difícil à medida que aumentam o tamanho da fazenda e o número de talhões.

Por isso, Shibusawa (2001) sugeriu agricultura de precisão regional para pequenas propriedades japonesas, baseada na variabilidade entre campos e na diversidade de uso da terra. Auernhammer (2001) propôs a “consolidação fundiária virtual” para pequenas propriedades, em que apenas a forma de cultivo muda, enquanto a propriedade permanece a mesma, o que pode gerar economias significativas nos custos de cultivo. Fazendas com bom desempenho podem obter benefícios menores que o custo da tecnologia, especialmente as pequenas; nesse caso, tanto as economias de insumos quanto o aumento de produtividade são limitados, e a agricultura de precisão muitas vezes significa apenas redistribuir quantidades semelhantes de insumos. Ainda assim, deve-se considerar os benefícios ambientais potenciais e as vantagens de dispor de informações mais precisas sobre a produção.

Com base em uma revisão sistemática de 32 estudos empíricos, Shang *et al.*, (2021) concluíram que o maior tamanho da propriedade e o nível mais alto de escolaridade têm maior impacto positivo sobre a adoção de tecnologias de agricultura de precisão. Curiosamente, a idade não se mostrou um preditor linear de adoção, devido a outras características importantes, como experiência e grau de inovação.

Em geral, ferramentas de agricultura de precisão mais baratas tenderiam a levar a níveis mais altos de adoção. No entanto, tecnologia mais barata, por si só, não garante maior adoção da agricultura de precisão. Há muitos outros fatores influentes, especialmente em

países em desenvolvimento. Onyango *et al.*, (2021) destacaram que a adoção de agricultura de precisão é frequentemente dificultada pela falta de energia elétrica e de conectividade de rede na África Subsaariana. Segundo os autores, apoiar-se no conhecimento comum e na experiência também pode ajudar a aumentar a eficiência agrícola na região, e, além do predomínio de pequenas propriedades, a baixa taxa de acesso à internet é um problema relevante em muitos países africanos e asiáticos.

O uso de tecnologias baratas ou sem custo é mais comum no caso de pequenas propriedades asiáticas ou africanas, já que esses agricultores quase não dispõem de recursos financeiros. No entanto, deve-se ter sempre em mente que a base de qualquer tecnologia de cultivo é a informação adequada sobre o solo; os agricultores precisam conhecer essas informações, caso contrário os tratamentos sítio-específicos se tornam impossíveis (MIZIK, 2023).

Há uma variedade de sensores disponíveis para medir e calcular parâmetros de um campo agrícola, especialmente os sensores de solo, que podem poupar mão de obra e ser uma ferramenta útil de manejo, muitas vezes fornecendo resultados mais oportunos, desde que sejam precisos e os dados sejam corretamente interpretados.

Sensores de teor de umidade do solo (ou “sensores de conteúdo volumétrico de água”), como tensiômetros, avaliam a tensão ou sucção da água no solo, que representa o esforço do sistema radicular das plantas para extrair água, podendo ser usados para estimar a quantidade de água armazenada no solo ou quanto irrigar para atingir um teor desejado. O teor de umidade também pode ser determinado por fotodiodos, sensores ópticos que usam luz para medir propriedades do solo, como argila, matéria orgânica e teor de água. Smolka *et al.*, (2017) apresentaram recentemente um sensor móvel para análise *in situ* de extratos de solo, capaz de detectar nutrientes primários das plantas em sua forma disponível, com fração do tempo e custo da análise laboratorial tradicional. O sensor se mostrou particularmente adequado para análise de dados NO_3^- , NH_4^+ , K^+ e PO_4^- , dando continuidade à estudos anteriores sobre amostragem de solo em movimento para nitrato, usando plataformas de sensores eletroquímicos e eletrodos íon-seletivos.

Pesquisadores do projeto europeu MISTRAL desenvolveram ainda um sistema capaz de medir a umidade do solo a partir de um drone voando em baixa altitude, utilizando refletometria de sistemas globais de navegação por satélite (GNSS, sigla em inglês para *global adoção. No satélite systems*). O sistema, ainda em protótipo, consegue produzir mapas de alta resolução de umidade do solo aproveitando sinais dos sistemas Galileo ou GPS, o que

pode ajudar agricultores a decidir melhor quando e onde irrigar e auxiliar gestores de recursos hídricos a compreender eventos como enchentes e encharcamento (MONTEIRO *et al.*, 2021).

3.5. Desafios e perspectivas futuras

A irrigação tradicional está passando por mudanças motivadas por tecnologias modernas, como sistemas automáticos de monitoramento e controle de precisão. Essa transformação mostra-se promissora quanto ao uso eficiente dos recursos hídricos disponíveis e permite que essa área avance para um novo patamar no setor de manejo da água. A irrigação moderna baseia-se em princípios de irrigação de precisão/inteligente, em que os produtores utilizam sistemas que geram dados em suas propriedades, os quais são processados de forma a subsidiar decisões estratégicas e operacionais adequadas. No método tradicional de agendamento de irrigação, os agricultores visitam o campo para verificar o estado do solo e das culturas e, depois, tomam decisões com base em sua experiência visual. Além disso, as técnicas tradicionais consomem muito tempo e recursos e já não são sustentáveis (LAKHIAR *et al.*, 2024).

A agricultura de precisão oferece muitos benefícios, em sua maioria ligados ao uso otimizado de insumos; porém, esses benefícios não podem ser igualmente realizados em todas as propriedades. Além disso, embora muitos artigos apontem potenciais benefícios ambientais, sua quantificação é difícil (MIZIK *et al.*, 2023).

Assim, os SISs oferecem soluções valiosas no contexto da agricultura inteligente. Mesmo que alguns produtores possuam conhecimento acumulado ao longo de muitos anos de trabalho no campo, as ferramentas modernas podem fornecer um meio organizado de identificar problemas inesperados ou não visíveis na área, que são difíceis de detectar apenas por avaliações visuais esporádicas. O sistema de irrigação inteligente apresenta uma solução promissora para melhorar o crescimento das plantas e a produtividade das culturas por meio do manejo eficiente dos recursos hídricos. Ele tem potencial para aumentar a produtividade dos sistemas agrícolas ao mesmo tempo em que reduz o desperdício de água e a pegada ambiental, o que é uma questão crítica em regiões com escassez hídrica (LAKHIAR *et al.*, 2024).

No entanto, a tecnologia mais barata, por si só, não pode garantir maior adoção de diferentes tecnologias de agricultura de precisão, pois há muitos outros fatores influentes, como quão simples é a tecnologia, qual o nível de escolaridade e habilidades dos agricultores e qual o nível dos fatores de suporte (por exemplo, fornecimento estável de energia elétrica e

acesso à internet). Tecnologias mais baratas organizadas de forma modular podem ajudar a acelerar esse processo. O apoio financeiro a esse processo em países em desenvolvimento parece ser vantajoso em escala global, já que as tecnologias de precisão resultam em uso mais otimizado de insumos e em maior, ou pelo menos mais estável, produção. Muitas soluções potenciais podem ser identificadas para as dificuldades mais comuns das pequenas propriedades.

Ações coletivas e cooperação entre agricultores podem ajudar a lidar com o pequeno tamanho das áreas. Soluções automatizadas baseadas em inteligência artificial podem auxiliar na delimitação de zonas e detecção de limites de campo. Entre outras, existem tecnologias de baixo custo e “livres de escala”, como o manejo de fertilizantes em taxa variável/locais específicos ou o uso compartilhado de máquinas, que oferecem solução para o alto custo de adoção. Dificuldades relacionadas à tecnologia podem ser superadas por meio de educação, uso de normas e de tecnologias simples e fáceis de usar. Fornecedores especializados, consultores ou prestadores de serviços agrícolas podem oferecer apoio técnico aos produtores. Investimentos induzidos por políticas públicas e regulamentações adequadas podem estimular ainda mais a adoção da agricultura de precisão (MIZIK *et al.*, 2023).

A implementação da agricultura de precisão envolve a integração de tecnologias inteligentes, permitindo ao produtor manejar a variabilidade dos campos para maximizar a relação custo/benefício e monitorar de forma contínua e/ou automática os principais indicadores de desempenho animal. Esta revisão de literatura mostrou que a agricultura de precisão é uma área amplamente pesquisada e em constante evolução, devido à necessidade dos agricultores de utilizarem os recursos de forma mais otimizada.

É importante entender como os agricultores interpretam o valor da tecnologia no contexto de suas propriedades. Por um lado, eles enxergam valor para o negócio agrícola na adoção e uso de novas tecnologias para resolver problemas futuros. Por outro lado, muitos produtores percebem que a adoção de sistemas de manejo de alta produtividade envolve aumento de risco.

Outro risco que a agricultura de precisão compartilha com outras tecnologias é a maior concentração de propriedades, já que os participantes mais ricos de um setor tendem a se beneficiar mais das tecnologias recentes. Há também a preocupação com situações em que a tecnologia não pode ser usada de forma eficaz. Em alguns casos, os agricultores são relutantes ou podem não conseguir utilizar as tecnologias mais recentes em suas propriedades.

Do ponto de vista de políticas públicas, um ambiente estável e favorável é essencial para se alcançar maior adoção de agricultura de precisão. Isso é particularmente importante

em países de baixa e média-baixa renda, onde se concentra a maior parte das pequenas propriedades. Diferentes formas de apoio financeiro podem ser justificadas pelos potenciais benefícios ambientais da agricultura de precisão ligados ao menor uso de insumos. Também é importante lembrar que instituições de apoio (como o setor financeiro) são menos desenvolvidas nesses países.

Há, contudo, muitos elementos custo-efetivos de agricultura de precisão, como o momento ótimo de plantio e colheita ou o manejo adequado do solo. Além disso, não faz sentido introduzir tecnologias avançadas de agricultura de precisão sem antes utilizar esses elementos de menor custo. Isso chama a atenção para a importância da educação, que também é tema de política pública, especialmente a educação agrícola. Com base nos artigos analisados, isso explica por que a mecanização é uma das questões mais importantes em países em desenvolvimento, enquanto automação ou sistemas IoT são mais relevantes em países desenvolvidos.

Com o aumento da pressão populacional em todo o mundo e da necessidade de ampliar a produção agrícola, cresce a preocupação em melhorar o manejo dos recursos agrícolas globais, minimizando ao mesmo tempo os impactos negativos sobre o meio ambiente. Informações sobre culturas, pastagens, rebanhos e outros recursos agrícolas são fundamentais para o gerenciamento eficaz de recursos escassos e em processo de esgotamento. A implementação da agricultura de precisão envolve a integração de tecnologias inteligentes tanto na agricultura quanto na pecuária, permitindo ao produtor manejar a variabilidade dos campos para maximizar a relação custo-benefício e monitorar de forma contínua e/ou automática os principais indicadores de desempenho animal.

Esta revisão de literatura mostrou que a agricultura de precisão é uma área amplamente pesquisada e em constante evolução, devido à necessidade dos agricultores de utilizarem os recursos de forma mais otimizada. Muitas técnicas apresentadas neste estudo foram aplicadas em condições estritamente controladas de pesquisa e sua implementação em fazendas exigiria também certa capacidade de autocorreção/autocalibração dos dispositivos ou ferramentas. O desenvolvimento e a operação de aplicações de agricultura de precisão envolvem várias etapas e técnicas que ainda precisam ser mais investigadas para que os sistemas desenvolvidos sejam precisos e aplicáveis em ambientes comerciais e em diferentes sistemas de produção. Além disso, pesquisas futuras também devem focar na necessidade atual de os agricultores adquirirem mais conhecimento sobre agricultura de precisão, pois esse pode ser um dos principais fatores que os desestimula a implementar tecnologias inteligentes em suas áreas (MONTEIRO *et al.*, 2021).

4. CONCLUSÃO

O sistema de irrigação inteligente apresenta uma solução promissora para melhorar o crescimento das plantas e a produtividade das culturas por meio do manejo eficiente dos recursos hídricos. Ele tem potencial para aumentar a produtividade dos sistemas agrícolas ao mesmo tempo em que reduz o desperdício de água e se adequa à pegada ambiental, o que é uma questão crítica em regiões com escassez hídrica.

Em relação à pergunta de pesquisa, foi possível demonstrar como a agricultura de precisão pode funcionar em pequena escala com auxílio de ferramentas e aplicativos como AgroSmart, Irrecloud, Rain bird smart control, Netafin netbeat e sistemas de apoio à decisões. Também se constatou que a adoção de diferentes elementos das tecnologias de agricultura de precisão pode ser a única forma de sobreviver produzindo mais na mesma área de terra sem degradar os recursos ambientais, preservar e poupar fontes e recursos cada vez mais escassos.

REFERÊNCIAS

ABBAS, N.S.; SALIM, M.S.; SABRI, N. **ASCD**: Automatic sensing and control device for crop irrigation scheduling. *HardwareX*, 2024, 18, e00523.

ABIOYE, E.A.; ABIDIN, M.S.Z.; MAHMUD, M.S.A.; BUYAMIN, S.; ISHAK, M.H.I.; RAHMAN, M.K.I.A.; OTUOZE, A.O.; ONOTU, P.; RAMLI, M.S.A. **A review on monitoring and advanced control strategies for precision irrigation**. *Comput. Electron. Agric.* 173, 105441, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105441>. Acesso em: Jan. 2025.

AGÊNCIA IBGE DE NOTÍCIAS. **PAM 2023**: safra bate recorde, mas valor da produção cai. IBGE, 12 set. 2024. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/41296-pam-2023-safra-bate-recorde-mas-valor-da-producao-cai>. Acesso em: Jan. 2026.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS; INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Levantamento sobre o uso da água na agricultura de sequeiro no Brasil – 2013 a 2017**. ANA; IBGE, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/ana>. Acesso em: Set. 2025.

ALISA, A. News: **What is the difference between precision, digital, and smart farming**. *Digital Agriculture*, v. 13, p. 57, 2019.

AL MASHHADANY, Y.; ALSANAD, H.R.; AL-ASKARI, M.A.; ALGBURI, S.; TAHA, B.A. **Irrigation intelligence—Enabling a cloud-based Internet of Things approach for enhanced water management in agriculture**. *Environ. Monit. Assess* 2024, 196, 1–13.

ALCE, A.R.B.; NABUA, M.A.; GALIDO, A.P. **Automated Safe AWD Rice Irrigation Scheduling using Low-Power WAN Technology**. *Procedia Comput. Sci.* 2024, 234, 1769–1776.

ANJUM, M.N.; CHEEMA, M.J.M.; HUSSAIN, F.; WU, R.S. **Chapter 6—Precision irrigation**: Challenges and opportunities. In *Precision Agriculture*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2023; pp. 85–101.

AUERNHAMMER, H. **Precision farming — the environmental challenge**. *Computers and Electronics in Agriculture*, 30, 31–43, 2001. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0168-1699\(00\)00153-8](https://doi.org/10.1016/S0168-1699(00)00153-8). Acesso em: Dez. 2025.

BARKUNAN, S.R.; BHANUMATHI, V.; SETHURAM, J. **Smart sensor for automatic drip irrigation system for paddy cultivation**. *Comput. Electr. Eng.* 2019, 73, 180–193.

BENAMEUR, R.; DAHANE, A.; KECHAR, B.; BENYAMINA, A.E.H. **An Innovative Smart and Sustainable Low-Cost Irrigation System for Anomaly Detection Using Deep Learning**. *Sensors*, 2024, 24, 1162.

BENEMAUR, R.; DAHANE, A.; KECHAR, B. **An IoT Low-Cost Smart Farming for Enhancing Irrigation Efficiency of Smallholders Farmers.** *Wirel. Pers. Commun.* 2022, 127, 3173–3210.

BWAMBALE, E.; ABAGALE, F.K.; ANORNU, G.K. **Smart irrigation monitoring and control strategies for improving water use efficiency in precision agriculture: A review.** *Agric. Water Manag.* 260, 107324, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107324>. Acesso em: 3 de setembro 2025.

CAMMARANO, D.; ZHA, H.; WILSON, L.; LI, Y.; BATCHELOR, W. D.; MIAO, Y. (2020). **A Remote Sensing-Based Approach to Management Zone Delineation in Small Scale Farming Systems.** *Agronomy*, 10(11), 1767. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agronomy10111767>. Acesso em: 14 setembro 2025.

CAO, Q.; CUI, Z. L.; CHEN, X. P.; KHOSLA, R.; DAO, T. H.; MIAO, Y. X. (2012). **Quantifying spatial variability of indigenous nitrogen supply for precision nitrogen management in small scale farming.** *Precision Agriculture*, 13, 45–61. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11119-011-9244-3>. Acesso em: Dez.2025.

CHAKRABORTY, A.; ISLAM, M.; DHAR, A.; HOSSAIN, M.S. **IoT Based Greenhouse Environment Monitoring and Smart Irrigation System for Precision Farming Technology.** In *Proceedings of the International Conference on Innovations in Science, Engineering and Technology (ICISSET)*, Chittagong, Bangladesh, 26–27 February 2022; pp. 123–128.

CHEEMA, S.M.; ALI, M.; PIRES, I.M.; GONÇALVES, N.J.; NAQVI, M.H.; HASSAN, M. **IoT Enabled Smart Farming: Urdu Language-Based Solution for Low-Literate Farmers.** *Agriculture* 2022, 12, 1277.

Chen, M.; Cui, Y.; Wang, X.; Xie, H.; Liu, F.; Luo, T.; Zheng, S.; Luo, Y. **A reinforcement learning approach to irrigation decision-making for rice using weather forecasts.** *Agricultural Water Management*, v. 250, p. 106838, 2021. DOI: 10.1016/j.agwat.2021.106838.

CHITHRA, V.; PRATHIBANANDHI, J.R.D.R.K.; PRIYA, C. **Smart Sprinkler System Using Raspberry Pi.** In *Proceedings of the International Conference on Communication, Computing and Internet of Things (IC3IoT) 2022*, Sydney, NSW, Australia, 9–13 July 2022; pp. 1–5. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/976798>. Acesso em: 3 Set. 2025.

DAHANE, A.; BENAMEUR, R.; KECHAR, B. **An IoT Low-Cost Smart Farming for Enhancing Irrigation Efficiency of Smallholders Farmers.** *Wirel. Pers. Commun.* 2022, 127, 3173–3210.

DOBERMANN, A.; WITT, C.; DAWE, D.; ABDULRACHMAN, S.; GINES, H. C.; NAGARAJAN, R. ... WANG, G. H. (2002). **Site-specific nutrient management for intensive rice cropping systems in Asia.** *Field Crops Research*, 74, 37–66. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(01\)00197-6](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(01)00197-6). Acesso em: 13 de dezembro 2025.

EMBRAPA. VII Plano Diretor da Embrapa 2020-2030. 1º Edição. Brasília, DF: Embrapa, 2020.

FAO. The state of food and agriculture: Moving forward on food loss and waste reduction. 1º Edição. Itália, Roma: FAO, 2019.

FAGUNDES, C. *et al.*, **Forest management and FSC certification: a systematic review**. Revista De Administração Da UFSM, 17(4), e5, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/1983465973947>. Acesso em: 17 setembro 2025.

FRAGA-LAMAS, P.; CELAYA-ECHARRI, M.; AZPILICUETA, L.; LOPEZ-ITURRI, P.; FALCONE, F.; FERNÁNDEZ-CARAMÉS, T.M. **Design and Empirical Validation of a LoRaWAN IoT Smart Irrigation System**. Proceedings, 2020, 42, 62.

GABUYA, A.Q.; MANGUBAT, F.N.; PATINDOL, V.H.; PAGLINAWAN, J.M.; CATUBIS, K.M.L. **Improved growth of coffee seedlings (*Coffea canephora*) under SMART irrigation system**. J. Saudi Soc. Agric. Sci. 2024, 23, 103–111.

GIMPEL, H.; GRAF-DRASCH, V.; HAWLITSCHKEK, F.; NEUMEIER, K. **Designing smart and sustainable irrigation: A case study**. J. Clean. Prod. 2021, 315, 128048.

GODWIN, R. J.; RICHARDS, T. E.; WOOD, G. A.; WELSH, J. P.; KNIGHT, S. M. (2003). **An Economic Analysis of the Potential for Precision Farming in UK Cereal Production**. Biosystems Engineering, 84, 533–545. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S1537-5110\(02\)00282-9](https://doi.org/10.1016/S1537-5110(02)00282-9). Acesso em: Dez. 2025.

GONZÁLEZ-BRIONES, A.; MEZQUITA, Y.; CASTELLANOS-GARZÓN, J.A.; PRIETO, J.; CORCHADO, J.M. **Intelligent multi-agent system for water reduction in automotive irrigation processes**. Procedia Comput. Sci. 2019, 151, 971–976.

GUILLÉN-NAVARRO, M.A.; MARTÍNEZ-ESPAÑA, R.; BUENO-CRESPO, A.; MORALES-GARCÍA, J.; AYUSO, B.; CECILIA, J.M. **A Decision Support System for Water Optimization in Anti-Frost Techniques by Sprinklers**. Sensors 2020, 20, 7129.

HASSAN, E.S.; ALHARBI, A.A.; OSHABA, A.S.; EL-EMARY, A. **Enhancing Smart Irrigation Efficiency: A New WSN-Based Localization Method for Water Conservation**. Water 2024, 16, 672.

LAKHIAR, I.A.; YAN, H.; ZHANG, C.; WANG, G.; HE, B.; HAO, B.; HAN, Y.; WANG, B.; BAO, R.; SYED, T.N.; *et al.*, **A Review of Precision Irrigation Water-Saving Technology under Changing Climate for Enhancing Water Use Efficiency, Crop Yield, and Environmental Footprints**. Agriculture, 2024, 14, 1141. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agriculture14071141>. Acesso em: Jan. 2025.

LAPHATPHAKKHANUT, R.; PUTTRAWUTICHAJ, S.; DECHKRONG, P.; PREUKSAKARN, C.; WICHAIDIST, B.; VONGPHET, J.; SUKSAROJ, C. **IoT-based smart crop-field monitoring of rice cultivation system for irrigation control and its effect on water footprint mitigation**. Paddy Water Environ. 2021, 19, 699–707.

- LAKSHMI, G.D.P.; ASHA, P.N.; SANDHYA, G.; SHARMA, S.V.; SHILPASHREE, S.; SUBRAMANYA, S.G. **An intelligent IOT sensor coupled precision irrigation model for agriculture.** *Meas. Sens.* 2023, 25, 100608.
- MANOCHA, A.; SOOD, S.K.; BHATIA, M. **IoT-digital twin-inspired smart irrigation approach for optimal water utilization.** *Sustain. Comput. Inform. Syst.* 2024, 41, 100947.
- MASON, B.; RUFÍ-SALÍS, M.; PARADA, F.; GABARRELL, X.; GRUDEN, C. **Intelligent urban irrigation systems: Saving water and maintaining crop yields.** *Agric. Water Manag.* 2019, 226, 105812.
- MIZIK, Tamás. **HOW CAN PRECISION FARMING WORK ON A SMALL SCALE? A SYSTEMATIC LITERATURE REVIEW.** *Precision Agric* 24, 384–406, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11119-022-09934-y>. Acesso em: Set. 2025.
- MOHAMMED, M.; RIAD, K.; ALQAHTANI, N. **Efficient IoT-Based Control for a Smart Subsurface Irrigation System to Enhance Irrigation Management of Date Palm.** *Sensors* 2021, 21, 3942.
- MONTEIRO, António.; SANTOS, Sérgio.; GONÇALVES, Pedro. **Precision Agriculture for Crop and Livestock Farming—Brief Review.** *Animals* 2021, 11, 2345. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ani11082345>. Acesso em: Set. 2025.
- MORCHID, A.; ISHAQ, G.; ALBLUSHI, M.; KHALID, H.M.; EL ALAMI, R.; SITARAMANAN, S.R.; MUYEEN, S.M. **High-technology agriculture system to enhance food security: A concept of smart irrigation system using Internet of Things and cloud computing.** *J. Saudi Soc. Agric. Sci.* 2024.
- MOUSAVI, S.K.; GHAFARI, A.; BESHARAT, S.; AFSHARI, H. **Improving the security of internet of things using cryptographic algorithms: A case of smart irrigation systems.** *J. Ambient Intell. Hum. Comput.* 2020, 12, 2033–2051.
- NATCHER, D.; BACHMANN, E.; PITTMAN, J.; KULSHRESHTHA, S.; BACO, M. N.; AKPONIKPE, P. B. I.; PEAK, D. (2016). **Knowledge diffusion and the adoption of fertilizer microdosing in Northwest Benin.** *Sustainable Agriculture Research*, 5(3), 1–10. Disponível em: <https://doi.org/10.5539/sar.v5n3p1>. Acesso em: Dez. 2025.
- NATH, S.D.; HOSSAIN, M.S.; CHOWDHURY, I.A.; TASNEEM, S.; HASAN, M.; CHAKMA, R. **Design and Implementation of an IoT Based Greenhouse Monitoring and Controlling System.** *J. Comput. Sci. Technol. Stud.* 2021, 3, 01–06.
- OLATUNDE, T.M.; ADELANI, F.A.; SIKHAKHANE, Z.Q. **A review of smart water management systems from Africa and the United States.** *Eng. Sci. Technol. J.* 2024, 5, 1231–1242.
- ONYANGO, C. M.; NYAGA, J. M.; WETTERLIND, J.; SÖDERSTRÖM, M.; PIKKI, K. (2021). **Precision Agriculture for Resource Use Efficiency in Smallholder Farming Systems in Sub-Saharan Africa: A Systematic Review.** *Sustainability*, 13(3), 1158. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su13031158>. Acesso em: Dez. 2025.

PAGE, M. J.; MCKENZIE, J. E.; BOSSUYT, P.; BOUTRON, I.; HOFFMANN, T. C.; MULROW, C. D.; SHAMSEER, L.; TETZLAFF, J. M.; AKL, E.; BRENNAN, S. E.; CHOU, R.; GLANVILLE, J.; GRIMSHAW, J. M.; HRÓBJARTSSON, A.; LALU, M. M.; LI, T.; LODER, E. W.; MAYO-WILSON, E.; MCDONALD, S.; MOHER, D. **The prisma 2020 statement:** An updated guideline for reporting systematic reviews. In *Medicina Fluminensis*. Vol. 57, Issue 4, pp. 444-465, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>. Acesso em: Set. 2025.

PARK, A. G.; MCDONALD, A. J.; DEVKOTA, M.; DAVIS, A. S. (2018). **Increasing yield stability and input efficiencies with cost-effective mechanization in Nepal.** *Field Crops Research*, 228, 93–101. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.08.012>. Acesso em: Dez. 2025.

PERSELLO, C.; TOLPEKIN, V. A.; BERGADO, J. R.; DE BY, R. A. (2019). **Delineation of agricultural fields in small-holder farms from satellite images using fully convolutional networks and combinatorial grouping.** *Remote Sensing of Environment*, 231, 111253. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111253>. Acesso em: Dez. 2025.

PHAM, C.; RAHIM, A.; HARTMANN, C.; DUPONT, C.; FORSTER, J.; MARKWORDT, F.; PRINTANIER, J.F.; KECHAR, B.; BENKHELIFA, M.; BARAKA, K.; *et al.*, **Deploying Low-Cost and Full Edge-IoT/AI System for Optimizing Irrigation in Smallholder Farmers Communities.** In *Proceedings of the Workshops at 18th International Conference on Intelligent Environments (IE2022)*, Biarritz, France, Jun. 2022; IOS Press: Amsterdam, The Netherlands, 2022.

SAHOO, S.R.; AGYEMAN, B.T.; DEBNATH, S.; LIU, J. **Knowledge-Based Optimal Irrigation Scheduling of Agro-Hydrological Systems.** *Sustainability* 2022, 14, 1304.

SANTOS, Clemente Ribeiro dos. EMBRAPA. **Fundamentos de manejo de água em hortaliças.** 1992.

SASAO, A., & SHIBUSAWA, S. (2000). **Prospects and strategies for precision farming in Japan.** *Jarq-Japan Agricultural Research Quarterly*, 34, 233–238.

SEYAR, M.H. & AHAMED, T. **Development of an IoT-Based Precision Irrigation System for Tomato Production from Indoor Seedling Germination to Outdoor Field Production.** *Appl. Sci.* 2023, 13, 5556.

SHAHIDI, S.; PEYAL, M.M.K.; SALIM, K.M.; HASAN, M. **Design of Smart Irrigation Monitoring and Control System Based on the Internet of Things.** In *Proceedings of the IEEE 6th International Conference on Universal Village UV2022*, Boston, MA, USA, 20–25 October 2022; Session TS5-B-8. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10185526>. Acesso em: Set. 2025.

SHANG, L.; HECKELEI, T.; GERULLIS, M. K.; BÖRNER, J.; RASCH, S. (2021). **Adoption and diffusion of digital farming technologies - integrating farm-level evidence and system interaction.** *Agricultural Systems*, 190, 103074. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103074>. Acesso em: Dez. 2025.

SHIBUSAWA, S. (2001). **Precision Farming Approaches for Small Scale Farms**. *IFAC Proceedings Volumes*, 34, 22–27. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)34099-5](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)34099-5). Acesso em: Dez. 2025.

SINWAR, D.; DHAKA, V.S.; SHARMA, M.K.; RANI, G. **AI-Based Yield Prediction and Smart Irrigation**. In *Internet of Things and Analytics for Agriculture*; Volume 2. Studies in Big Data; Pattnaik, P., Kumar, R., Pal, S., Eds.; Springer: Singapore, 2020; Volume 67.

SINGH, N.; SHARMA, A.K.; SARKAR, I.; PRABHU, S.; CHADAGA, K. **IoT-based greenhouse technologies for enhanced crop production: A comprehensive study of monitoring, control, and communication techniques**. *Syst. Sci. Control Eng.* 2024, 12, 2306825.

SMOLKA, M.; PUCHBERGER-ENENGL, D.; BIPOUN, M.; KLASA, A.; KICZKAJLO, M.; ŚMIECHOWSKI, W.; SOWINSKI, P.; KRUTZLER, C.; KEPLINGER, F.; VELLEKOOP, M.J. **A mobile lab-on-a-chip device for on-site soil nutrient analysis**. *Precis. Agric.* 2017, 18, 152–168.

SOCIEDADE INTERNACIONAL DE AGRICULTURA DE PRECISÃO. ISPA. Disponível em: <https://www.ispag.org/about/definition>. Acesso em: Jan. 2026.

VAKULA RANI, J.; JAKKA, A.; JAGATH, M. **A Smart Irrigation System for Plant Health Monitoring Using Unmanned Aerial Vehicles and IoT**. In *IoT Based Control Networks and Intelligent Systems; ICICNIS 2023*. Lecture Notes in Networks and Systems; JOBY, P.P., ALENCAR, M.S., FALKOWSKI-GILSKI, P., Eds.; Springer: Singapore, 2023; Volume 789.

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 Agric. Technol.* 2023, 3, 100227.

YANG, R., AHMED, Z. U., SCHULTHESS, U. C., KAMAL, M., & RAI, R. (2020). **Detecting functional field units from satellite images in smallholder farming systems using a deep learning based computer vision approach: A case study from Bangladesh**. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 20, 100413. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100413>. Acesso em: jan. 2026.

XIE, J.; CHEN, Y.; GAO, P.; SUN, D.; XUE, X.; YIN, D.; HAN, Y.; WANG, W. **Smart fuzzy irrigation system for litchi orchards**. *Comput. Electron. Agric.* 2022, 201, 107287.

ZEN, H. D.; BRANDÃO, J. B.; BREITENBACH, R. O sistema de inovação tecnológica da hidroponia no Brasil: uma revisão de literatura. *Extensão Rural, Santa Maria*, v. 28, n. 2, p. 1–26, abr./jun. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/2318179666372>. Acesso em: dez. 2025.

ZIA, H.; REHMAN, A.; HARRIS, N.R.; FATIMA, S.; KHURRAM, M. **An Experimental Comparison of IoT-Based and Traditional Irrigation Scheduling on a Flood-Irrigated Subtropical Lemon Farm**. *Sensors*, 21, 4175, 2021.

ZENG, Y.; CHEN, C.; LIN, G. **Practical application of an intelligent irrigation system to rice paddies in Taiwan.** *Agric. Water Manag.* 280, 108216 2023.

ZHA, H., CAMMARANO, D., WILSON, L., LI, Y., BATCHELOR, W. D., & MIAO, Y. (2019). **Combining crop modelling and remote sensing to create yield maps for management zone delineation in small scale farming systems.** In J. V. Stafford (Ed.), *Precision agriculture '19* (pp. 883–889). Wageningen, the Netherlands: Wageningen *Academic Publishers*. Disponível em: https://doi.org/10.3920/978-90-8686-888-9_109. Acesso em: dez. 2025.