



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO
SERTÃO PERNAMBUCANO
CAMPUS PETROLINA ZONA RURAL

CURSO DE BACHARELADO EM AGRONOMIA

**INTEGRAÇÃO DE TECNOLOGIAS NA AGRICULTURA DE
PRECISÃO: OTIMIZAÇÃO E SUSTENTABILIDADE NA PRODUÇÃO
AGRÍCOLA**

MARIA VITÓRIA SANTOS FERREIRA

PETROLINA – PE
2024

Maria Vitória Santos Ferreira

**Integração de Tecnologias na Agricultura De Precisão: Otimização
e Sustentabilidade na Produção Agrícola**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao IFSertãoPE *Campus*
Petrolina Zona Rural, exigido para a obtenção
do título de Engenheiro Agrônomo.

Orientador: Prof. Dr. Pablo Teixeira Leal de Oliveira

PETROLINA – PE
2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

F383 Ferreira, Maria Vitória.

Integração de Tecnologias na Agricultura De Precisão: Otimização e Sustentabilidade na Produção Agrícola / Maria Vitória Ferreira. - Petrolina, 2025.
37 f.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Agronomia) -Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sertão Pernambucano, Campus Petrolina Zona Rural, 2025.

Orientação: Prof. Pablo Teixeira Leal de Oliveira.

1. Ciências Agrárias. 2. Tecnologias digitais. 3. Eficiência produtiva. 4. Inovação sustentável. 5. Objetivos de desenvolvimento sustentável. I. Título.


CDD 630

MARIA VITÓRIA SANTOS FERREIRA


**INTEGRAÇÃO DE TECNOLOGIAS NA AGRICULTURA DE PRECISÃO:
OTIMIZAÇÃO E SUSTENTABILIDADE NA PRODUÇÃO AGRÍCOLA**

Trabalho de Conclusão do Curso apresentado ao
IFSertãoPE *Campus* Petrolina Zona Rural, exigido
para a obtenção do título de Engenheiro Agrônomo.


Aprovada em: 20 de dezembro de 2024.

Documento assinado digitalmente
 **PABLO TEIXEIRA LEAL DE OLIVEIRA**
Data: 23/12/2024 08:28:34-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Pablo Teixeira Leal de Oliveira (Orientador)
IFSertãoPE, Campus Petrolina Zona Rural

Documento assinado digitalmente
 **SILVIA HELENA NOGUEIRA TURCO**
Data: 23/12/2024 10:38:39-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Silvia Helena Nogueira Turco
UNIVASF

Documento assinado digitalmente
 **JOSE SEBASTIAO COSTA DE SOUSA**
Data: 23/12/2024 11:28:49-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. José Sebastião Costa de Sousa
IFSertãoPE, Campus Petrolina Zona Rural

Dedico este trabalho ao meu pai, que, com mãos calejadas pelo trabalho árduo, construiu não apenas casas, mas também os alicerces do meu futuro. Seu suor e sacrifício me deram o conforto e a oportunidade de sonhar mais alto. Dedico também à minha mãe, cuja fé silenciosa e orações diárias sempre me cuidaram. Sua devoção foi um pilar essencial que sustentou meu caminho até aqui.

Agradecimentos

A Deus, por me conceder a vida e por renovar em mim a esperança de dias melhores.

Ao meu pai, Everaldo Ferreira, e à minha mãe, Maria Danúzia, por todo o empenho e dedicação; às minhas irmãs, tias e primas, pelo apoio incondicional. Aos meus avós Nelson Paulino e Zulmira Maria (in memóriam) pela grande preocupação com o meu bem-estar. Às minhas sobrinhas, Maria Clara, Maria Liz e Maria Cecília, que são a minha maior fonte de inspiração.

Ao meu namorado, Mateus, que esteve presente comigo em cada etapa desta jornada acadêmica, me apoiando em todos os momentos. Aos amigos da Casa do Estudante de Parnamirim, com quem compartilhei momentos valiosos e aprendizados que levarei para a vida.

À turma AG18, por tornar a caminhada na faculdade mais leve e prazerosa, sempre com responsabilidade e comprometimento. E, finalmente ao IFSertãoPE, CPZR, e aos professores que não mediram esforços para garantir um ensino de excelência e qualidade a todos nós.

Não é o mais forte que sobrevive, nem o mais inteligente, mas o que melhor se adapta às mudanças.

(Charles Darwin)

RESUMO

Este trabalho analisa a integração de tecnologias na agricultura de precisão, enfatizando seu papel na otimização das práticas agrícolas e na promoção da sustentabilidade. A partir de uma revisão bibliográfica, são exploradas aplicações de ferramentas como Internet das Coisas (IoT), Inteligência Artificial (IA), Tecnologia de Visão de Máquinas, Big Data, Sistemas de Orientação, Tecnologia Blockchain, Robótica e Telemática. Os estudos de caso analisados destacam o impacto dessas tecnologias na economia e na sustentabilidade, incluindo a redução de custos com insumos e o uso eficiente de recursos, como água e fertilizantes. Exemplos práticos mostram como essas inovações podem acompanhar a agricultura de precisão aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), com destaque para o ODS 6 (Água Potável e Saneamento), ODS 12 (Consumo e Produção Responsável) e ODS 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima). A pesquisa também abordou desafios importantes, como os altos custos de implementação, a necessidade de infraestrutura adequada e a carência de capacitação técnica. Conclui-se que a agricultura de precisão apresenta grande potencial para transformar o setor agrícola, promovendo práticas mais eficientes e sustentáveis, desde que acompanhadas por políticas públicas que viabilizem o acesso às tecnologias e incentivem sua ampla adoção

Palavras-chave – Tecnologias digitais; Eficiência produtiva; Inovação sustentável; Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.

ABSTRACT

This study analyzes the integration of technologies in precision agriculture, emphasizing their role in optimizing agricultural practices and promoting sustainability. Through a bibliographic review, applications of tools such as the Internet of Things (IoT), Artificial Intelligence (AI), Machine Vision Technology, Big Data, Guidance Systems, Blockchain Technology, Robotics, and Telematics are explored. The case studies analyzed highlight the impact of these technologies on economics and sustainability, including cost reduction in inputs and efficient use of resources such as water and fertilizers. Practical examples demonstrate how these innovations can align precision agriculture with the Sustainable Development Goals (SDGs), particularly SDG 6 (Clean Water and Sanitation), SDG 12 (Responsible Consumption and Production), and SDG 13 (Climate Action). The research also addresses significant challenges, such as high implementation costs, the need for adequate infrastructure, and the lack of technical training. It concludes that precision agriculture holds great potential to transform the agricultural sector, promoting more efficient and sustainable practices, provided that public policies facilitate access to these technologies and encourage their widespread adoption.

Keywords – Digital technologies; Productive efficiency; Sustainable innovation; Sustainable Development Goals.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
2 OBJETIVOS	10
2.1 Objetivo geral	10
2.2 Objetivos específicos	10
3 METODOLOGIA.....	11
4 APLICAÇÕES DA AGRICULTURA DE PRECISÃO	12
4.1 Coleta e aquisição de dados.....	13
5 AGRICULTURA DE PRECISÃO E SUSTENTABILIDADE	15
5.1 Big Data	16
5.2 Tecnologia de Visão de Máquina.....	17
5.3 Internet das Coisas (IoT).....	18
5.4 Inteligência Artificial (IA), Aprendizado de Máquina (ML) e Aprendizado Profundo (DL)	19
5.5 Sistemas de Orientação.....	20
5.6 Tecnologia Blockchain	21
5.7 Robótica e Sistemas Autônomos	22
5.8 Telemática	23
6 ESTUDO DE CASOS: SUSTENTABILIDADE NA AGRICULTURA DE PRECISÃO	24
6.1 Projeto de sistema de irrigação inteligente baseado em aprendizado de máquina para Agricultura de Precisão	24
6.2 O papel das tecnologias de agricultura de precisão na melhoria da agricultura sustentável.....	24
7 DESAFIOS NA ADOÇÃO E INTEGRAÇÃO DE TECNOLOGIAS AVANÇADAS NA AGRICULTURA DE PRECISÃO	26
8 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS NECESSÁRIOS	27
9 CONCLUSÕES	28
REFERÊNCIAS.....	29

1 INTRODUÇÃO

A agricultura de precisão (AP) é uma abordagem que aproveita tecnologias avançadas para transformar o gerenciamento agrícola, oferecendo soluções que observam, medem e analisam as necessidades individuais de campos e culturas (ALISA, 2019). Baseando-se na variabilidade espaço-temporal das lavouras, a AP constitui uma estratégia de gestão altamente precisa, pois combina dados temporais, espaciais e individuais com outras informações agronômicas. Esse processo permite decisões baseadas na variabilidade específica de cada campo, otimizando o uso de recursos e aprimorando a produtividade, qualidade, lucratividade e sustentabilidade da produção agrícola (ISPA, 2021).

O setor agrícola passa por uma transformação disruptiva, frequentemente denominada “quarta revolução industrial”, na qual ferramentas inovadoras – desde sistemas de gerenciamento de dados até tecnologias autônomas, como Veículo Aéreo Não Tripulado (UAVs), satélites, Sistema de Informação de Gestão Agrícola (FMIS) e robótica – coexistem e convergem para aprimorar práticas de produção (TSOUROS et al., 2019). Pesquisadores destacam que, para explorar o pleno potencial da AP, é necessária a combinação de tecnologias de ponta, incluindo robótica, sensores, drones, sistemas avançados de navegação (GNSS), Internet das Coisas (IoT) e modelagem climática. Essas ferramentas permitem uma aplicação mais controlada de insumos, como água e fertilizantes, promovendo maior sustentabilidade e reduzindo desperdícios (LOURES et al., 2020).

Atualmente, a AP é composta principalmente por tecnologias de taxa variável (VRTs), mapas eletrônicos, monitores de rendimento e sistemas de orientação agrícola (MCFADDEN, 2023; LIU et al., 2020). O avanço de tecnologias de sensoriamento remoto – como drones e satélites – permite a coleta de dados de alta resolução, capacitando agricultores a tomar decisões informadas sobre o manejo das culturas com base em evidências de campo (MONTEIRO et al., 2021).

Ainda assim, essa transição tecnológica não está isenta de desafios. A produção alimentar sustentável, que considera a preservação de recursos hídricos e terrestres, a eficiência energética e a integridade ambiental, exige um alinhamento entre inovação e políticas públicas robustas (ZHANG et al., 2023; RAIHAN, 2023). Para enfrentar as limitações das práticas convencionais, a adoção de abordagens agronômicas mais sustentáveis torna-se imperativa, permitindo uma produção mais eficiente e responsável (RAIHAN et al., 2022).

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

- Analisar aplicações e a integração de tecnologias da Agricultura de Precisão.

2.2 Objetivos específicos

- Identificar as aplicações das tecnologias utilizadas na Agricultura de Precisão;
- Avaliar como a integração dessas tecnologias pode otimizar a produção agrícola;
- Investigar o impacto da Agricultura de Precisão na sustentabilidade das práticas agrícolas.

3 METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho consistiu na realização de uma revisão de literatura com o objetivo de explorar a integração de tecnologias na agricultura de precisão. Foram analisados trabalhos científicos publicados entre 2017 e 2024, disponíveis na plataforma Google Acadêmico. As buscas empregaram palavras-chave relacionadas aos principais temas do estudo, como "*Precision Agriculture*", "*Management Systems*", "*Internet of Things in Agriculture*", "*Robotics and Agricultural Automation*", e "*Barriers to the Adoption of Agricultural Technologies*".

O ano de 2017 foi escolhido como marco inicial das publicações analisadas, pois representa o período em que o conceito de Indústria 4.0 começou a se consolidar, conforme evidenciado na literatura. Esse marco reflete o início da popularização de tecnologias inovadoras que passaram a influenciar diretamente o setor agrícola.

Para assegurar a relevância das fontes, adotaram-se critérios de inclusão e exclusão. Foram selecionados artigos que tratassem diretamente da integração e do uso de tecnologias na agricultura, enquanto aqueles não relacionados ao tema ou publicados antes de 2017 foram descartados.

Após a seleção, os artigos foram analisados quanto ao conteúdo relevante para os objetivos do trabalho. As informações extraídas foram organizadas de forma a apresentar exemplos práticos, avanços tecnológicos e desafios na adoção de novas ferramentas no setor agrícola.

4 APLICAÇÕES DA AGRICULTURA DE PRECISÃO

A agricultura de precisão é um sistema agrícola integrado, baseado em informações e orientado pela produção, que visa melhorar a produtividade em locais específicos, além de aumentar a eficiência e a rentabilidade de longo prazo de fazendas (TAN et al., 2022). Nos últimos anos a agricultura de precisão têm revolucionado o setor agrícola através tecnologias, oferecendo aumento na produtividade, eficiência e sustentabilidade (SARFRAZ et al., 2023). Esses avanços desempenham um papel central na transformação das práticas agrícolas, proporcionando meios de otimizar insumos, elevar a produtividade e reduzir o impacto ambiental (ABIOYE et al., 2020).

As tecnologias que sustentam a AP incluem dados e sistemas de coleta de dados, ferramentas de suporte à decisão e equipamentos baseados em ajustes de entrada (MCFADDEN, 2023). Essa abordagem sistemática é fortalecida pelo uso de tecnologias avançadas, como o sensoriamento remoto, que facilita o monitoramento de áreas agrícolas (LIU et al., 2021; SEGARRA et al., 2020), o GIS, que aprimora o mapeamento e a gestão territorial (RADOGLUO-GRAMMATIKIS; SARIGIANNIDIS; MOSCHOLIOS, 2020; ZHANG; CAO, 2019; LEROUX et al., 2018), e o GPS, que proporciona um posicionamento preciso (GUO et al., 2018; TAMIRAT; PEDERSEN; LIND, 2018).

Além disso, a análise de big data possibilita a gestão de grandes volumes de informações complexas (COBLE et al., 2018; WOLFERT et al., 2017). Tecnologias emergentes como a Internet das Coisas (IoT) e a inteligência artificial (IA) promovem uma automação mais inteligente e adaptável, ampliando a precisão e a eficiência da AP (BERSANI et al., 2022; AHMED; DE; HUSSAIN, 2018; BHAT; HUANG, 2021; SHADRIN; ERMILOV; SOMOV, 2019; PATRÍCIO; RIEDER, 2018).

Adicionalmente, plataformas de software especializadas integram dados de múltiplas fontes, permitindo uma gestão agrícola mais abrangente. Tais sistemas frequentemente incorporam funcionalidades de GIS, modelagem preditiva e ferramentas de apoio à decisão, o que permite uma análise mais completa e informada (GHOSH; KUMPATLA, 2022). A adoção de soluções em nuvem tem melhorado a acessibilidade dos dados e viabilizado o compartilhamento em tempo real, promovendo uma conectividade e colaboração mais efetivas (ADEWUYI et al., 2024).

4.1 Coleta e aquisição de dados

De acordo com o estudo da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (2023), o uso do GIS e sensores remotos oferece aos agricultores uma visão abrangente de suas propriedades, permitindo que acompanhem o estado geral de suas culturas com precisão. Sensores inteligentes são agora componentes essenciais na agricultura de precisão, facilitando decisões baseadas em dados.

Segundo Paul et al. (2022), seis tipos principais de sensores são amplamente utilizados em cultivos ao ar livre: sensores de localização, para posicionamento geoespacial preciso; sensores ópticos, que analisam propriedades específicas do solo; sensores eletroquímicos, que medem o pH e níveis de nutrientes; sensores mecânicos, que monitoram a compactação do solo; sensores de umidade dielétricos/eletromagnéticos, que determinam os níveis de água no solo; e sensores de fluxo de ar, que avaliam a circulação de ar no solo. Destacam-se também os sensores de Radiação Fotossinteticamente Ativa (PAR), que otimizam o crescimento das plantas, e sistemas robóticos para capina e pulverização, que ajudam a reduzir o uso de pesticidas, promovendo práticas agrícolas mais sustentáveis.

Além disso, sensores climáticos e ambientais instalados em campo monitoram continuamente a temperatura, umidade, vento e precipitação, bem como variáveis como pressão atmosférica e radiação solar, ajudando na previsão e mitigação de riscos climáticos e otimizando a irrigação para melhorar a saúde das plantações (SOUSSI et al., 2024). A coleta e análise desses dados são essenciais para a gestão eficiente de recursos, como água e fertilizantes, e o uso de receptores GPS em maquinários agrícolas facilita o mapeamento e o manejo específico de cada localidade (SOUSSI et al., 2024).

Conforme McFadden (2023) e Monteiro et al. (2021), a integração de dados de sensores com coordenadas de Sistemas de Navegação Global por Satélite (GNSS) possibilita a criação de mapas detalhados, como mapas de rendimento e mapas de solo, que auxiliam na tomada de decisões específicas para cada área de cultivo. A análise das variações representadas nesses mapas permite identificar os fatores que influenciam a produtividade, facilitando o planejamento e a implementação de estratégias de manejo adaptadas às condições de cada campo (MONTEIRO et al., 2021).

Os Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) também têm sido essenciais para o monitoramento agrícola, devido à sua capacidade de cobrir grandes áreas em um

curto espaço de tempo, empregando diversas tecnologias de imagem, como câmeras RGB (vermelha, verde, azul), sensores multiespectrais e hiperespectrais, câmeras térmicas e sensores ativos. Essas ferramentas auxiliam na identificação direta de pragas, diagnóstico de doenças e avaliação dos danos em folhas e na cobertura vegetal, proporcionando dados detalhados e auxiliando no manejo fitossanitário (MESÍAS-RUIZ, 2023). Assim, as tecnologias de coleta de dados se consolidam como ferramentas essenciais para uma agricultura mais eficiente e sustentável.

5 AGRICULTURA DE PRECISÃO E SUSTENTABILIDADE

Com o crescimento da população mundial e a intensificação das questões ambientais, práticas agrícolas sustentáveis tornaram-se imprescindíveis. A agricultura de precisão surge como uma solução promissora para otimizar recursos, gerenciar culturas de forma eficiente e promover um sistema agrícola mais sustentável (KARUNATHILAKE et al., 2023).

A incorporação de tecnologias na agricultura de precisão representa uma evolução significativa, substituindo os métodos tradicionais uniformes por abordagens mais personalizadas e adaptáveis (MISRA; GHOSH, 2024). Essa mudança é viabilizada pela coleta de dados em tempo real, realizada por tecnologias como drones, satélites e sensores terrestres, que fornecem aos agricultores informações detalhadas sobre a saúde das culturas, condições do solo e fatores ambientais. Com esses dados, é possível tomar decisões precisas sobre irrigação, fertilização e controle de pragas, reduzindo desperdícios, alocando recursos com maior eficácia e diminuindo o impacto ambiental da agricultura (PATEL et al., 2023).

Além disso, a obtenção de dados em tempo real de diferentes fontes — como satélites e sensores no solo — permite o monitoramento constante das condições das plantações, o que ajuda os agricultores a responder rapidamente a problemas que possam surgir. Esse monitoramento constante fortalece práticas agrícolas adaptáveis e proativas, essenciais para uma produção agrícola mais eficiente e ambientalmente responsável (LEITÃO et al., 2019).

5.1 Big Data

O conceito de Big Data é comumente definido a partir de três dimensões principais. Primeiramente, refere-se ao enorme volume de dados que são continuamente gerados, armazenados e processados. Em segundo lugar, engloba a alta velocidade com que esses dados são transmitidos e a rapidez com que são criados, coletados e trocados. A terceira dimensão diz respeito à variedade de formatos e estruturas, resultante da heterogeneidade das fontes de dados (SASSI et al., 2019).

As ferramentas de análise de Big Data permitem que cientistas de dados identifiquem correlações e padrões ao analisar grandes volumes de dados provenientes de diversas fontes. Essa ciência, que se consolidou como uma disciplina moderna nos últimos anos, incorpora áreas clássicas, como estatística, inteligência artificial, matemática e informática, além de subdisciplinas como sistemas de banco de dados, aprendizagem de máquina e sistemas distribuídos (ELSHAWIL et al., 2018).

Na agricultura, o Big Data se refere ao uso de tecnologias avançadas e à análise de dados para decisões fundamentais orientadas por dados (SARKER et al., 2019). Essa abordagem tem sido aplicada em várias frentes, como na compreensão de fatores climáticos, características do solo, gestão de culturas, segurança alimentar, biodiversidade e suporte à tomada de decisão (KAMILARIS et al., 2017).

Além disso, o Big Data frequentemente atua em sinergia com outras tecnologias, incluindo aprendizado de máquina, plataformas em nuvem, processamento de imagens, simulação, análise estatística, índices de mapeamento NDVI e sistemas de informação geográfica (GIS) (KAMILARIS et al., 2017). Essa integração de tecnologias permite o monitoramento contínuo de variáveis críticas ao longo das cadeias produtivas agrícolas, como dados de umidade do solo, condições climáticas, rendimento das safras e necessidades de abastecimento. As informações geradas também se estendem a dados de processamento de alimentos, controle de insumos e pesticidas utilizados pelos produtores (SHOWKAT et al., 2021).

No entanto, a utilização de grandes volumes de dados em casos de agricultura de precisão levanta desafios, como a qualidade da informação, a fusão de dados e questões de segurança. A análise da qualidade desses dados requer conhecimento especializado e contribuições humanas essenciais (SHOWKAT et al., 2021), reforçando a necessidade de cautela na integração e no uso dessas informações para garantir a decisão.

5.2 Tecnologia de Visão de Máquina

A visão de máquina refere-se a um sistema que proporciona às máquinas a capacidade de enxergar e interpretar dados visuais, semelhante ao processamento de imagens que os humanos realizam. Essa tecnologia, essencial para a automação industrial, permite que sistemas analisem imagens e extraiam informações para tomar decisões automatizadas (SHIN et al., 2022).

Nos últimos anos, a aplicação da visão de máquina se expandiu significativamente na produção de chá, abrangendo quase todas as etapas do processo produtivo. Essas aplicações incluem o monitoramento de doenças e pragas, a identificação e colheita, a estimativa de rendimento e a classificação da qualidade. A visão de máquina é baseada na visão computacional e consiste em sistemas de hardware e software. Essa tecnologia depende de câmeras RGB e multiespectrais, para capturar imagens de plantações de chá e extrair informações importantes com base nas imagens obtidas, fornecendo uma base para a tomada de decisão subsequente. Ela pode extrair informações de imagens simulando a visão humana e, em seguida, analisá-las para orientar a produção real (YANG et al., 2023).

Os sistemas de visão de máquina são, em geral, compostos de três fases principais: aquisição de imagem, processamento de dados e execução. Na aquisição de imagem, são utilizados sistemas de iluminação e captura que transmitem as imagens para a fase de processamento. Em seguida, na fase de processamento, as imagens são analisadas para extrair informações e tomar decisões com base nos resultados de aprendizagem. Finalmente, essas decisões são implementadas na fase de execução, controlando equipamentos agrícolas para realizar operações específicas (YUN et al., 2020; YANG et al., 2023).

5.3 Internet das Coisas (IoT)

Internet das Coisas (IoT) refere-se a uma rede que conecta elementos físicos, animais, ambientes e ferramentas de produção à internet por meio de dispositivos de coleta de dados e sensores. Esses dispositivos trocam informações em tempo real sob protocolos específicos, possibilitando a identificação, rastreamento, monitoramento e gerenciamento inteligente de processos agrícolas. Atualmente, as pesquisas globais sobre IoT são vastas, mas a maioria das aplicações ainda se encontra em fases experimentais de demonstração (XU et al., 2022).

Entre as tecnologias aplicadas, destaca-se o uso do Zigbee, que oferece redes sem fio auto-organizáveis e permite uma transmissão de dados eficiente e estável. Essa tecnologia é frequentemente combinada com redes de comunicação com fio para garantir a transmissão remota. Na China, por exemplo, a IoT tem sido aplicada a muitos aspectos da produção agrícola, como supervisão de terras agrícolas, monitoramento ambiental, rastreabilidade de segurança de produtos agrícolas, além de ser usada em campos como plantio, aquicultura e pecuária (XU et al., 2022).

Além das aplicações específicas na China, o conceito de Internet das Coisas se inspira na tecnologia da internet para conectar o mundo inteiro, sendo caracterizado por "coisas" que possuem identidades únicas e estão conectadas entre si. Esse cosmos de sensores, aparelhos e outros dispositivos, interligados pela internet, resulta na criação de uma rede IoT. O escopo da IoT, porém, não se limita apenas a conectar coisas; ele permite que essas "coisas" se comuniquem e troquem dados, conforme mencionado por Kour Vippon Preet et al. (2020).

Com o desenvolvimento de sensores com direitos de propriedade intelectual independente e de dispositivos inteligentes, como tratores autônomos, UAVs e robôs, a IoT amplia seu potencial para a agricultura de precisão. Esses avanços possibilitam que tarefas sejam realizadas com alta qualidade, substituindo a necessidade de altos níveis de trabalho manual e ajustando-se a condições de trabalho desafiadoras (SARANYA et al., 2023).

5.4 Inteligência Artificial (IA), Aprendizado de Máquina (ML) e Aprendizado Profundo (DL)

Um dos principais ramos da inteligência artificial (IA), o aprendizado de máquina (ML), usa algoritmos para capacitar robôs a aprenderem com dados, aprimorando seu desempenho ao longo do tempo (VRONTIS et al., 2023). Na prática, robôs podem ser programados para executar tarefas específicas, como agarrar, identificar objetos e planejar rotas. Redes neurais artificiais, usadas no aprendizado profundo (DL) – uma subcategoria de ML –, possibilitam que computadores processem grandes volumes de dados, permitindo aprendizado aprimorado (HOWARD, 2019).

Essa tecnologia tem mostrado grande utilidade na robótica, especialmente para tarefas complexas como reconhecimento de imagem e fala, processamento e detecção de objetos. Em conjunto, IA, ML e DL viabilizaram o desenvolvimento de robôs com capacidades avançadas, desde operações básicas de coleta e movimentação até manipulações complexas e navegação em ambientes não estruturados (VRONTIS et al., 2023). A incorporação dessas tecnologias na robótica tem um potencial transformador, elevando a inteligência, autonomia e eficiência dos robôs em diversas aplicações. Com o rápido avanço da robótica, é provável que IA, ML e DL continuem desempenhando um papel central na evolução deste campo (HOWARD, 2019).

Essas inovações tecnológicas têm sido especialmente aplicadas no setor agrícola, IA e ML possibilitam o desenvolvimento de robôs autônomos para o manejo e monitoramento de plantações, aumentando a eficiência e reduzindo os custos de mão de obra. A robótica tem permitido a automação de tarefas como plantio, colheita e pulverização, enquanto algoritmos de IA e ML otimizam processos agrícolas, como previsão climática, uso eficiente de recursos hídricos e monitoramento da saúde das plantações (LINAZA et al., 2021).

Além disso, na agricultura de precisão, drones equipados com IA e ML são utilizados para coletar dados sobre a saúde das plantas, níveis de umidade e condições do solo. Esses dados são então analisados para maximizar o rendimento das culturas e minimizar o desperdício de recursos (SARANYA et al., 2023).

5.5 Sistemas de Orientação

O uso dos Sistemas Globais de Navegação por Satélite (GNSS) na agricultura de precisão (AP) revolucionou as práticas agrícolas, trazendo melhorias em eficiência, produtividade e sustentabilidade (KENT SHANNON D, et al. 2018). Esses sistemas são essenciais em várias aplicações, como o mapeamento de campo (CATANIA et al., 2020), orientação e direção de máquinas (RADOČAJ et al., 2022; RADICIONI et al., 2020), tecnologia de taxa variável (VRT) (PEREZ-RUIZ; MARTÍNEZ-GUANTER; UPADHYAYA, 2021) e monitoramento de rendimento (LIU et al., 2022).

Integrados aos Sistemas de Informação Geográfica (GIS), os GNSS permitem mapear áreas e características dos campos, auxiliando na gestão de insumos e na personalização das estratégias agrícolas (NEUPANE; GUO, 2019; SAIZ-RUBIO; ROVIRA-MÁS, 2020). Com a orientação automatizada via GNSS, operações como plantio e fertilização tornam-se mais precisas, resultando em melhor uniformidade das culturas e maior produtividade (FU et al., 2022).

Os sistemas tecnologia de taxa variável baseados em GNSS possibilitam aplicar insumos conforme as necessidades específicas de cada área do campo (ROKHAFROUZ et al., 2021), combinando dados de solo e rendimento para criar mapas de prescrição que otimizam o uso de insumos e reduzem o impacto ambiental (AMMONIACI; KARTSIOTIS; STORCHI, 2021). O monitoramento de rendimento, também aprimorado pelo GNSS, mapeia a produtividade das culturas, fornecendo informações valiosas para planejar as safras futuras (YANG et al., 2022; DELA TORRE; GAO; MACINNIS-NG, 2021).

Contudo, o uso de GNSS enfrenta desafios como bloqueios de sinal e condições atmosféricas que podem comprometer a precisão, especialmente em áreas com vegetação densa ou terrenos íngremes (VARGAS; SANTOS, 2021; GAO; LI, 2022). Avanços em algoritmos de processamento de sinal são necessários para superar essas limitações e garantir maior confiabilidade dos sistemas GNSS na agricultura (XUE et al., 2022).

5.6 Tecnologia Blockchain

A tecnologia blockchain, com seu registro imutável e criptografado de dados transacionais armazenados em redes distribuídas, tem revolucionado diversos setores, especialmente a agricultura e a gestão da cadeia de suprimentos (MIRABELLI; SOLINA, 2020). Por meio do blockchain, os dados são compartilhados de forma descentralizada entre todos os nós da rede, dispensando a necessidade de uma autoridade central confiável e promovendo a coordenação autônoma entre os participantes (ZHU; KOUHIZADEH, 2019). Essa inovação tem atraído cada vez mais interesse devido às suas características de autonomia, anonimato e resistência à alteração de dados, que a tornam especialmente relevante para empresas e organizações em busca de maior segurança e confiabilidade (LAURENCE, 2023).

O protocolo de blockchain é desenvolvido para ser inviolável, impedindo interferências externas e garantindo a autenticidade dos dados, o que fortalece seu potencial para aplicação em setores diversos (FERNÁNDEZ HERRERO et al., 2018). Além de atuar como um banco de dados distribuído, o blockchain permite que um grupo de pessoas registre, compartilhe e controle informações, utilizando plataformas interconectadas em uma rede global, o que facilita o uso em uma variedade de aplicações (ROCHA; DE OLIVEIRA; TALAMINI, 2021).

No ambiente digital, a estrutura de blocos interligados do blockchain viabiliza o armazenamento, vinculação e recuperação de transações, formando um grande banco de dados que opera de maneira descentralizada (FERNÁNDEZ HERRERO et al., 2018). A segurança é fortalecida pela descentralização, que elimina intermediários e facilita a validação direta entre as partes envolvidas, promovendo confiança nas transações (ROCHA; DE OLIVEIRA; TALAMINI, 2021).

No contexto do agronegócio, o blockchain oferece avanços importantes em rastreabilidade e transparência, permitindo o acompanhamento do produto “da fazenda à mesa do consumidor”. Essa visibilidade promove maior segurança alimentar e controle de qualidade, beneficiando tanto produtores quanto consumidores. A tecnologia blockchain, aplicada ao setor, não só assegura a qualidade e minimiza as perdas logísticas, mas também valoriza o produto, resultando em um retorno financeiro superior para o produtor (KAMILARIS; FONTS; PRENAFETA-BOLDÚ, 2019; FLORES et al., 2021; REJEB; KEOGH; TREIBLMAIER, 2019; LENG; BI; JING, 2018; FERREIRA; PINTO; DOS SANTOS, 2017; LEZOCHE et al., 2020; XIE; SUN; LUO, 2017; PAPA, 2017).

5.7 Robótica e Sistemas Autônomos

Os satélites artificiais, como os satélites Landsat americanos, o sistema europeu Sentinel-2, o sistema de satélites da constelação RapidEye, o sistema GeoEye-1 e o WorldView-3, para sensoriamento remoto, ajudam a gerar dados remotamente acessíveis em formas multiespectrais (LIU et al., 2020). O estabelecimento desses satélites inteligentes de sensoriamento remoto forneceu cobertura total para a coleta de informações agrícolas (LIU et al., 2020; SARANYA et al., 2023; BERGER et al., 2023).

A robótica móvel agrícola, especialmente com o uso de veículos terrestres não tripulados (UGV) e veículos aéreos não tripulados (UAV), tornou-se um campo emergente, com diversas aplicações no setor agrícola (PRAKASH et al., 2020). Suas principais utilizações incluem a identificação do estado das culturas, permitindo a aplicação precisa de produtos químicos, fumigação e colheita de acordo com as necessidades específicas de cada planta ou fruto. Além disso, essa tecnologia possibilita o manuseio de plantas e frutas com o uso de braços colaborativos para colheita e movimentação, além da coleta de dados úteis para o agricultor. Esses dados viabilizam uma aplicação seletiva de pesticidas, minimizando desperdícios e aumentando a eficiência.

Pesquisas estão sendo conduzidas para a cooperação entre UGVs e UAVs a fim de cobrir grandes áreas agrícolas. Esses robôs autônomos são capazes de executar tarefas, tomar decisões e agir em tempo real com alto grau de autonomia (RAHMADIAN; WIDYARTONO, 2020). O interesse na robótica móvel agrícola tem crescido nos últimos anos, especialmente por sua capacidade de automatizar processos como plantio, irrigação, fertilização, pulverização, monitoramento ambiental, detecção de doenças, colheita e controle de ervas daninhas e pragas (ARAÚJO et al., 2021).

Uma das questões centrais da robótica móvel em campos agrícolas é a capacidade de executar múltiplas tarefas, como evitar obstáculos, rastrear alvos, planejar rotas, coletar dados de colheitas e detectar doenças, com o uso de hardware mais acessível, o que pode viabilizar robôs de baixo custo para pequenos e médios produtores. No entanto, os custos ainda elevados para a adoção desses sistemas representam um desafio para a ampla implementação da agricultura inteligente, sendo essa uma barreira significativa enfrentada por agricultores que desejam incorporar essas tecnologias em suas atividades (SINHA; DHANALAKSHMI, 2022).

5.8 Telemática

A telemática permite a transferência sem fio de dados entre equipamentos agrícolas, dispositivos conectados e a nuvem, usando redes locais como Bluetooth ou sistemas celulares. Esse fluxo de dados inclui mapas de prescrição, registros de aplicação de sementes, produtos químicos e fertilizantes, dados de sensores (como monitoramento de rendimento) e mapas de cobertura, além de possibilitar o monitoramento remoto de equipamentos agrícolas em campo. Assim, as informações são coletadas durante operações de campo e enviadas automaticamente para a nuvem, facilitando o acesso e a análise de dados.

No entanto, para a telemática atingir seu potencial completo, especialmente com o uso de mapas de prescrição para aplicadores de taxa variável (VRT), é essencial uma conectividade de banda larga estável (MCFADDEN et al., 2023). Para enfrentar os desafios relacionados à adoção, custo e sustentabilidade das tecnologias inteligentes, uma conectividade robusta é fundamental. Em áreas rurais, a conectividade limitada cria ineficiências, como tempo de inatividade da máquina, erros humanos e limitações no acesso a dados em tempo real. Essa barreira afeta diretamente a lucratividade das operações e a adoção de práticas avançadas de agricultura de precisão, que dependem de uma troca constante e imediata de dados (KARUNATHILAKE et al., 2023).

As redes móveis 5G e futuras gerações apresentam um potencial transformador para impulsionar a adoção de soluções tecnológicas na agricultura e em outros setores. Com o aumento das demandas ambientais e climáticas, o papel das redes móveis na promoção de práticas sustentáveis é cada vez mais discutido. Setores como agricultura de precisão, monitoramento da biodiversidade, silvicultura e gestão hídrica poderão se beneficiar diretamente dessas redes de alta velocidade e baixa latência. Avaliar a expansão das redes 5G e 6G é essencial para identificar os usos e as demandas específicas que surgem nesses contextos (TOMASZEWSKI et al., 2023).

6 ESTUDO DE CASOS: SUSTENTABILIDADE NA AGRICULTURA DE PRECISÃO

6.1 Projeto de sistema de irrigação inteligente baseado em aprendizado de máquina para Agricultura de Precisão

Abuzanouneh et al. (2022) destacam que a escassez de água, agravada pelas mudanças climáticas e pelo crescimento populacional, representa um desafio significativo para a agricultura, exigindo uma gestão mais eficiente dos recursos hídricos. Os sistemas tradicionais de supervisão resultam frequentemente em desperdício de recursos, comprometendo a sustentabilidade. Como solução, o estudo apresenta um Sistema de Irrigação Inteligente baseado em Internet das Coisas (IoT) e Aprendizado de Máquina, projetado para melhorar o uso da água nas plantações, minimizar desperdícios e promover práticas agrícolas mais sustentáveis.

Esse sistema utiliza sensores avançados para coletar dados sobre umidade do solo, temperatura e luz, que são analisados por algoritmos sofisticados para determinar de forma precisa quando e onde a supervisão é necessária. A atuação autônoma permite que válvulas de controle sejam ativadas apenas em áreas que realmente necessitam de água, otimizando o uso do recurso. Os resultados apresentados no estudo evidenciam uma precisão de 97,5% na análise das necessidades das culturas, além de uma redução significativa no consumo de água, promovendo maior eficiência e menor impacto ambiental.

Essa abordagem inovadora contribui diretamente para a conservação dos recursos hídricos, alinhando-se aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), como o ODS 6, que trata de água potável e saneamento, o ODS 12, que visa o consumo e a produção responsáveis, e o ODS 13, relacionado à ação climática. Ao evitar desperdícios e reduzir os impactos ambientais, o sistema proposto representa um avanço crucial para enfrentar os desafios globais, demonstrando como a integração de tecnologias pode transformar a agricultura em uma atividade

6.2 O papel das tecnologias de agricultura de precisão na melhoria da agricultura sustentável

Sanyaolu e Sadowski (2024) destacam que a agricultura de precisão (AP) tem se destacado como uma abordagem inovadora para promover a sustentabilidade na produção agrícola. Num estudo de caso baseado nas propriedades rurais da União Europeia, abrangendo Polónia, França, Alemanha e Roménia, os autores exploram

como a adoção de tecnologias de AP pode reduzir os impactos ambientais e aumentar a eficiência dos recursos utilizados. Utilizando dados extraídos da Rede de Contabilidade Agrícola (FADN) e do Eurostat, a pesquisa apresenta resultados promissores sobre a implementação dessas tecnologias.

A intervenção descrita no estudo foi projetada para reduzir em 20% o uso de defensivos agrícolas e em 15% o uso de fertilizantes, mantendo os níveis de produtividade. A aplicação de tecnologias como sensores remotos, sistemas de orientação por satélite (GNSS) e aplicação em taxa variável exigiu um investimento inicial que variou entre €35.941 e €71.883 por propriedade. Os resultados evidenciaram benefícios notáveis, especialmente em grandes propriedades com receitas económicas superiores a €100.000. Um exemplo prático foi apresentado na França, onde uma propriedade média conseguiu economizar cerca de € 9.621 em fertilizantes e defensivos graças ao uso da AP.

Além da economia de custos, uma pesquisa ressalta os benefícios ambientais, como a redução na poluição do solo e da água, e a mitigação das emissões de gases de efeito estufa. Estima-se que a aplicação da AP possa reduzir as emissões agrícolas em até 10% ao longo de uma década. Contudo, uma análise económica utilizando o método do Valor Presente Líquido (VPL) indicou que a previsão do investimento é mais evidente em propriedades maiores. Por outro lado, pequenas propriedades, com receitas abaixo de €50.000, enfrentarão dificuldades significativas devido aos altos custos iniciais associados à adoção dessas tecnologias.

O estudo conclui que a agricultura de precisão é uma solução eficaz para alinhar a sustentabilidade ambiental à eficiência produtiva, principalmente em grandes propriedades. Para viabilizar sua adoção em propriedades menores, torna-se essencial o apoio público por meio de subsídios ou iniciativas cooperativas, de forma a reduzir os custos iniciais e ampliar os benefícios das tecnologias. Assim, a AP se estabelece como uma ferramenta necessária para a otimização dos recursos agrícolas, promovendo a conservação ambiental e contribuindo para o cumprimento das metas climáticas globais.

7 DESAFIOS NA ADOÇÃO E INTEGRAÇÃO DE TECNOLOGIAS AVANÇADAS NA AGRICULTURA DE PRECISÃO

A falta de competências interdisciplinares constitui um dos principais obstáculos no avanço da agricultura moderna. Enquanto engenheiros de big data, analistas e cientistas de dados possuem conhecimento técnico, geralmente carecem de informações específica sobre agricultura, o que limita sua eficácia no setor (LIU et al., 2020). Por outro lado, profissionais das ciências agrárias não estão suficientemente preparados para lidar com tecnologias avançadas, devido à ausência de um treinamento adequado nessa área.

Além disso, essa jornada de modernização enfrenta desafios significativos (CLARKSON et al., 2022). Um dos principais entraves é o acesso restrito a ferramentas tecnológicas modernas devido às limitações financeiras, especialmente entre pequenos agricultores (ACHUKWU et al., 2023). A infraestrutura insuficiente também representa uma barreira crítica (MDODA et al., 2022; SMIDT; JOKONYA, 2021), dificultando a adoção de tecnologias no cotidiano agrícola. A falta de programas de treinamento formal e contínuo agrava ainda mais essa situação, deixando muitos agricultores despreparados para a utilização eficiente dessas inovações (ALEMU et al., 2022; MASERE; WORTH, 2022).

Outro ponto a ser considerado são as barreiras socioculturais e as deficiências estruturais que restringem o uso dessas tecnologias, especialmente entre os pequenos produtores (ALEXANDER, 2018). A indisponibilidade de tecnologias acessíveis pode agravar a exclusão digital, criando uma divisão onde apenas agricultores de grande porte e com maior nível educacional têm condições de usufruir dessas inovações (EASTWOOD et al., 2017).

8 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS NECESSÁRIOS

Para superar os desafios e aproveitar plenamente o potencial da agricultura de precisão, é fundamental adotar estratégias voltadas para a capacitação, integração tecnológica e fortalecimento da infraestrutura. Em primeiro lugar, recomenda-se que todas as universidades com cursos na área de ciências agrárias implementem disciplinas focadas em agricultura digital e agricultura de precisão. Isso garantirá que os jovens profissionais adquiram uma base sólida sobre as tecnologias já empregadas nas grandes fazendas, preparando-os para o mercado de trabalho e promovendo maior eficiência nas operações agrícolas.

Além da educação formal, é necessário desenvolver sistemas integrados de gestão que combinem o máximo de tecnologias possíveis. Esses sistemas permitirão que decisões sejam tomadas de forma mais rápida e segura, adaptando-se às particularidades de cada fazenda e às necessidades específicas de cada cultura. A integração de dados de diversas fontes em um único sistema pode transformar a tomada de decisão, tornando-a mais precisa e baseada em informações.

Outro ponto crucial é o desenvolvimento de políticas públicas que facilitem o acesso à tecnologia para pequenos produtores e promovam a capacitação necessária para o uso dessas ferramentas. Os governos podem desempenhar um papel essencial ao investir em infraestrutura, como energia, conectividade à Internet e mercados de serviços e crédito. Isso ajudará a criar um ambiente que incentive os agricultores a adotarem tecnologias de precisão, melhorando sua produtividade e competitividade.

A comunicação e a integração entre diferentes tecnologias são elementos fundamentais que ainda precisam ser aprimorados na agricultura de precisão. Soluções como o uso de visão computacional para monitorar rebanhos, aplicativos móveis para rastrear condições do campo em tempo real e a futura aplicação de redes 6G podem gerar dados extremamente úteis para tomadas de decisão mais ágeis e precisas. Além disso, práticas emergentes, como a hidroponia inteligente integrada a sistemas de Internet das Coisas (IoT), aliadas à aplicação de aprendizado profundo (DL) e aprendizado de máquina (ML), para aprimorar o desenvolvimento de cultivos, oferecem grande potencial de inovação para o setor, conforme destacado por Karunathilake et al. (2023).

9 CONCLUSÕES

A análise das aplicações e da integração de tecnologias da Agricultura de Precisão (AP) destacou seu papel central na modernização do setor agrícola. Tecnologias como Big Data, IoT e Inteligência Artificial mostraram grande potencial para otimizar processos, aumentar a eficiência e aprimorar a tomada de decisão em tempo real, promovendo maior precisão nas atividades agrícolas e uso racional dos recursos.

As aplicações tecnológicas, incluindo sistemas de coleta de dados, sensores, robótica e telemática, automatizam processos, melhoram a produtividade e permitem a adaptação a necessidades regionais específicas, aumentando a eficiência e reduzindo desperdícios.

A integração dessas tecnologias não só otimiza a produção como também reduz custos, economiza tempo e facilita o planejamento preditivo, tornando o setor agrícola mais competitivo e resiliente.

No âmbito da sustentabilidade, o impacto da Agricultura de Precisão é evidente, contribuindo diretamente para a conservação dos recursos naturais e a redução dos impactos ambientais. Por meio da otimização do uso de água, energia e insumos químicos, as tecnologias integradas promovem práticas mais sustentáveis, alinhadas aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Especificamente, a AP está em consonância com o ODS 2 (Fome Zero e Agricultura Sustentável), ao aumentar a produção de alimentos; o ODS 6 (Água Potável e Saneamento), ao conservar recursos hídricos; e o ODS 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima), ao mitigar emissões de gases de efeito estufa. Assim, conclui-se que a Agricultura de Precisão é indispensável para enfrentar os desafios globais, promovendo um modelo de produção agrícola mais responsável e sustentável.

REFERÊNCIAS

- ABIOYE, Emmanuel Abiodun et al. A review on advanced monitoring and control strategies for precision irrigation. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 173, p. 105441, 2020.
- ABUZANOUNEH, K. Ibrahim Mohammad et al. Design of machine learning based smart irrigation System for precision Agriculture. *Computers, Materials & Continua*, v. 72, n. 1, p. 109-124, 2022.
- ACHUKWU, Grace Aladi et al. Factors affecting the rate of adoption of agricultural technology among small-scale rice farmers in Gwagwalada Area Council of FTC, Nigeria. *Journal of Agricultural Science and Practice*, v. 8, n. 2, p. 30-37, 2023.
- ADEWUYI, Adeleye Yusuff et al. Precision agriculture: Leveraging data science for sustainable farming. *International Journal of Science and Research Archive*, v. 12, n. 2, p. 1122-1129, 2024.
- AHMED, N.; DE, D.; HUSSAIN, I. Internet of Things (IoT) for Smart Precision Agriculture and Farming in Rural Areas. *IEEE Internet Things J.*, v. 5, p. 4890–4899, 2018.
- ALEMU, Taye et al. Factors influencing smallholder farmers' decision to abandon introduced sustainable land management technologies in Central Ethiopia. *Caraka Tani: Journal of Sustainable Agriculture*, v. 37, n. 2, p. 385-405, 2022.
- ALISA, A. News: What is the difference between precision, digital, and smart farming. *Digital Agriculture*, v. 13, p. 57, 2019.
- AMMONIACI, Marco et al. State of the art of monitoring technologies and data processing for precision viticulture. *Agriculture*, v. 11, n. 3, p. 201, 2021.
- ARAÚJO, Sara Oleiro et al. Characterising the agriculture 4.0 landscape—emerging trends, challenges and opportunities. *Agronomy*, v. 11, n. 4, p. 667, 2021.
- BERGER, Guido S. et al. Cooperative heterogeneous robots for autonomous insect trap monitoring systems in a precision agriculture scenario. *Agriculture*, v. 13, n. 2, p. 239, 2023.
- BERSANI, Chiara et al. Internet of Things approaches for monitoring and control of smart greenhouses in Industry 4.0. *Energies*, v. 15, n. 10, p. 3834, 2022.
- BHAT, Showkat Ahmad; HUANG, Nen-Fu. Big data and ai revolution in precision agriculture: Survey and challenges. *Ieee Access*, v. 9, p. 110209-110222, 2021.
- CATANIA, Pietro et al. Positioning accuracy comparison of GNSS receivers used for mapping and guidance of agricultural machines. *Agronomy*, v. 10, n. 7, p. 924, 2020.
- CLARKSON, Graham et al. Stimulating small-scale farmer innovation and adaptation with Participatory Integrated Climate Services for Agriculture (PICSA):

Lessons from successful implementation in Africa, Latin America, the Caribbean and South Asia. *Climate Services*, v. 26, p. 100298, 2022.

COBLE, Keith H. et al. Big data in agriculture: A challenge for the future. *Applied Economic Perspectives and Policy*, v. 40, n. 1, p. 79-96, 2018.

DELA TORRE, Daniel Marc G.; GAO, Jay; MACINNIS-NG, Cate. Remote sensing-based estimation of rice yields using various models: A critical review. *Geo-Spatial Information Science*, v. 24, n. 4, p. 580-603, 2021.

EASTWOOD, Callum; KLERKX, Laurens; NETTLE, Ruth. Dynamics and distribution of public and private research and extension roles for technological innovation and diffusion: Case studies of the implementation and adaptation of precision farming technologies. *Journal of rural studies*, v. 49, p. 1-12, 2017.

ELSHAWI, Radwa et al. Big data systems meet machine learning challenges: towards big data science as a service. *Big data research*, v. 14, p. 1-11, 2018.

FERNÁNDEZ HERRERO, Diego et al. Aplicación de la tecnología BlockChain en el Supply Chain en los Sectores Industriales. 2018.

FERREIRA, Juliandson Estanislau; PINTO, Filipe Gutemberg Costa; DOS SANTOS, Simone Cristiane. Estudo de mapeamento sistemático sobre as tendências e desafios do Blockchain. *Gestão. org*, v. 15, n. 6, p. 108-117, 2017.

FLORES, Luis et al. Blockchain in agribusiness supply chain management: A traceability perspective. In: *Advances in Artificial Intelligence, Software and Systems Engineering: Proceedings of the AHFE 2020 Virtual Conferences on Software and Systems Engineering, and Artificial Intelligence and Social Computing*, July 16-20, 2020, USA. Springer International Publishing, 2021. p. 465-472.

FU, Jianwei et al. Research progress and prospect of mechanized harvesting technology in the first season of ratoon rice. *Agriculture*, v. 12, n. 5, p. 620, 2022.

GAO, Yangjun; LI, Guangyun. A New GNSS Spoofing Signal Power Control Algorithm for Receiver Sensors in Acquisition Phase and Subsequent Control. *Sensors*, v. 22, n. 17, p. 6588, 2022.

GHOSH, Parmita; KUMPATLA, Siva P. GIS applications in agriculture. In: *Geographic Information Systems and Applications in Coastal Studies*. IntechOpen, 2022. Disponível em: www.intechopen.com. Acesso em: 04 de outubro de 2024.

GUO, Jing et al. Multi-GNSS precise point positioning for precision agriculture. *Precision agriculture*, v. 19, p. 895-911, 2018.

HAIG, Brian D. Big data science: A philosophy of science perspective. 2020.

HOWARD, John. Artificial intelligence: Implications for the future of work. *American journal of industrial medicine*, v. 62, n. 11, p. 917-926, 2019.

KAMILARIS, Andreas; FONTS, Agusti; PRENAFETA-BOLD'Y, Francesc X. The rise of blockchain technology in agriculture and food supply chains. *Trends in food science & technology*, v. 91, p. 640-652, 2019.

KAMILARIS, Andreas; KARTAKOULLIS, Andreas; PRENAFETA-BOLDÚ, Francesc X. A review on the practice of big data analysis in agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 143, p. 23-37, 2017.

KARUNATHILAKE, E. M. B. M. et al. The path to smart farming: Innovations and opportunities in precision agriculture. *Agriculture*, v. 13, n. 8, p. 1593, 2023.

KENT SHANNON, D.; CLAY, David E.; SUDDUTH, Kenneth A. An introduction to precision agriculture. *Precision agriculture basics*, p. 1-12, 2018.

KOUR, Vippon Preet; ARORA, Sakshi. Recent developments of the internet of things in agriculture: a survey. *Ieee Access*, v. 8, p. 129924-129957, 2020.

KUMAR, Pavan et al. Application of GPS and GNSS technology in geosciences. In: *GPS and GNSS Technology in Geosciences*. Elsevier, 2021. p. 415-427.

LAURENCE, Tiana. *Blockchain for dummies*. John Wiley & Sons, 2023.

LEITÃO, Paulo et al. A lightweight dynamic monitoring of operational indicators for a rapid strategical awareness. In: *2019 IEEE International Conference on Industrial Cyber Physical Systems (ICPS)*. IEEE, 2019. p. 121-126.

KAIJUN, Leng et al. Research on agricultural supply chain system with double chain architecture based on blockchain technology. *Future Generation Computer Systems*, v. 86, n. 641-649, 2018.

LEROUX, Corentin et al. GeoFIS: An open source, decision-support tool for precision agriculture data. *Agriculture*, v. 8, n. 6, p. 73, 2018.

LEZOCHE, Mario et al. Agri-food 4.0: A survey of the supply chains and technologies for the future agriculture. *Computers in industry*, v. 117, p. 103187, 2020.

LINAZA, Maria Teresa et al. Data-driven artificial intelligence applications for sustainable precision agriculture. *Agronomy*, v. 11, n. 6, p. 1227, 2021.

LIU, Jia et al. Boost precision agriculture with unmanned aerial vehicle remote sensing and edge intelligence: A survey. *Remote Sensing*, v. 13, n. 21, p. 4387, 2021.

LIU, Renjie et al. Development and application experiments of a grain yield monitoring system. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 195, p. 106851, 2022.

LIU, Ye et al. From industry 4.0 to agriculture 4.0: Current status, enabling technologies, and research challenges. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, v. 17, n. 6, p. 4322-4334, 2020.

LOURES, Luís et al. Assessing the effectiveness of precision agriculture management systems in mediterranean small farms. *Sustainability*, v. 12, n. 9, p. 3765, 2020.

MASERE, Tirivashe Philip; WORTH, Steve Hugh. Factors influencing adoption, innovation of new technology and decision-making by small-scale resource constrained farmers: The perspective of farmers in lower Gweru, Zimbabwe. *African Journal of Food, Agriculture, Nutrition and Development*, v. 22, n. 3, p. 20013-20035, 2022.

MAVRIDOU, Efthimia et al. Machine vision systems in precision agriculture for crop farming. *Journal of Imaging*, v. 5, n. 12, p. 89, 2019.

MCFADDEN, Jonathan; NJUKI, Eric; GRIFFIN, Terry. Precision agriculture in the digital era: recent adoption on US farms. 2023. Disponível em: <https://www.ers.usda.gov>. Acesso em: 8 nov. 2024.

MDODA, L.; TSHOTSHO, A.; NONTU, Y. Adoption of mass media for agricultural purposes by smallholder farmers in the Eastern Cape Province of South Africa. *South African Journal of Agricultural Extension*, v. 50, n. 2, p. 117-136, 2022.

MESÍAS-RUIZ, Gustavo A. et al. Boosting precision crop protection towards agriculture 5.0 via machine learning and emerging technologies: A contextual review. *Frontiers in Plant Science*, v. 14, p. 1143326, 2023.

MIRABELLI, Giovanni; SOLINA, Vittorio. Blockchain and agricultural supply chains traceability: Research trends and future challenges. *Procedia Manufacturing*, v. 42, p. 414-421, 2020.

MISRA, Sukanya; GHOSH, Avijit. Agriculture paradigm shift: a journey from traditional to modern agriculture. In: *Biodiversity and Bioeconomy*. Elsevier, 2024. p. 113-141.

MONTEIRO, António; SANTOS, Sérgio; GONÇALVES, Pedro. Precision agriculture for crop and livestock farming—Brief review. *Animals*, v. 11, n. 8, p. 2345, 2021.

NEUPANE, Jasmine; GUO, Wenxuan. Agronomic basis and strategies for precision water management: A review. *Agronomy*, v. 9, n. 2, p. 87, 2019.

PAPA, Semou Faye. Use of blockchain technology in agribusiness: Transparency and monitoring in agricultural trade. In: *2017 International Conference on Management Science and Management Innovation (MSMI 2017)*. Atlantis Press, 2017. p. 38-40.

PATEL, Abhishek et al. Advancements in Precision Agriculture: Harnessing the Power of Artificial Intelligence and Drones in Indian Agriculture. *World Environment Day*, v. 43, 2023.

PATRÍCIO, Diego Inácio; RIEDER, Rafael. Computer vision and artificial intelligence in precision agriculture for grain crops: A systematic review. *Computers and electronics in agriculture*, v. 153, p. 69-81, 2018.

PAUL, Kenny et al. Viable smart sensors and their application in data driven agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 198, p. 107096, 2022.

PEARL, M. Alexander. Realizing the Benefits of ICT in the Climate Crisis: The Deployment Gap and Legal Impediments in Smart Agriculture and Water. 2018.

PEREZ-RUIZ, Manuel; MARTÍNEZ-GUANter, Jorge; UPADHYAYA, Shrini K. High-precision GNSS for agricultural operations. In: *GPS and GNSS Technology in Geosciences*. Elsevier, 2021. p. 299-335.

PRAKASH, Rahul; DHEER, Dharmendra Kumar; KUMAR, Mukesh. Path planning of UGV using sampling-based method and PSO in 2D map configuration: a comparative analysis. In: *2020 International Conference on Emerging Frontiers in Electrical and Electronic Technologies (ICEFEET)*. IEEE, 2020. p. 1-6.

RADICIONI, Fabio et al. GNSS Network RTK for automatic guidance in agriculture: testing and performance evaluation. In: *International Conference on Computational Science and Its Applications*. Cham: Springer International Publishing, 2020. p. 19-35.

RADOČAJ, Dorijan et al. A low-cost global navigation satellite system positioning accuracy assessment method for agricultural machinery. *Applied Sciences*, v. 12, n. 2, p. 693, 2022.

RADOČAJ, Dorijan; PLAŠČAK, Ivan; JURIŠIĆ, Mladen. Global navigation satellite systems as state-of-the-art solutions in precision agriculture: A review of studies indexed in the web of science. *Agriculture*, v. 13, n. 7, p. 1417, 2023.

RADOGLOU-GRAMMATIKIS, Panagiotis et al. A compilation of UAV applications for precision agriculture. *Computer Networks*, v. 172, p. 107148, 2020.

RAHMADIAN, Reza; WIDYARTONO, Mahendra. Autonomous robotic in agriculture: a review. In: *2020 third international conference on vocational education and electrical engineering (ICVEE)*. IEEE, 2020. p. 1-6.

RAIHAN, Asif et al. An econometric analysis of the potential emission reduction components in Indonesia. *Cleaner Production Letters*, v. 3, p. 100008, 2022.

RAIHAN, Asif et al. Nexus between economic growth, energy use, urbanization, agricultural productivity, and carbon dioxide emissions: New insights from Bangladesh. *Energy Nexus*, v. 8, p. 100144, 2022.

REJEB, Abderahman; KEOGH, John G.; TREIBLMAIER, Horst. Leveraging the internet of things and blockchain technology in supply chain management. *Future Internet*, v. 11, n. 7, p. 161, 2019.

ROCHA, Geneci da Silva Ribeiro; DE OLIVEIRA, Letícia; TALAMINI, Edson. Blockchain applications in agribusiness: A systematic review. *Future Internet*, v. 13, n. 4, p. 95, 2021.

ROKHAFROUZ, Mohammad et al. Simplified and hybrid remote sensing-based delineation of management zones for nitrogen variable rate application in wheat. *Agriculture*, v. 11, n. 11, p. 1104, 2021.

SAIZ-RUBIO, Verónica; ROVIRA-MÁS, Francisco. From smart farming towards agriculture 5.0: A review on crop data management. *Agronomy*, v. 10, n. 2, p. 207, 2020.

SANYAOLU, M.; SADOWSKI, A. The Role of Precision Agriculture Technologies in Enhancing Sustainable Agriculture. *Sustainability* 2024, 16, 6668 [em linha]. 2024.

SARANYA, T. et al. A comparative study of deep learning and Internet of Things for precision agriculture. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, v. 122, p. 106034, 2023.

SARFRAZ, Sohaib et al. Sustainable agriculture through technological innovations. In: *Sustainable agriculture in the era of the OMICs revolution*. Cham: Springer International Publishing, 2023. p. 223-239.

SARKER, Md Nazirul Islam et al. Promoting digital agriculture through big data for sustainable farm management. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, v. 25, n. 4, p. 1235-1240, 2019.

SASSI, Imad; OUAFTOUH, Sara; ANTER, Samir. Adaptation of classical machine learning algorithms to big data context: problems and challenges: Case study: Hidden markov models under spark. In: *2019 1st International Conference on Smart Systems and Data Science (ICSSD)*. IEEE, 2019. p. 1-7.

SEGARRA, Joel et al. Remote sensing for precision agriculture: Sentinel-2 improved features and applications. *Agronomy*, v. 10, n. 5, p. 641, 2020.

SHADRIN, Dmitrii et al. Designing future precision agriculture: Detection of seeds germination using artificial intelligence on a low-power embedded system. *IEEE Sensors Journal*, v. 19, n. 23, p. 11573-11582, 2019.

SHIN, Jaemyung et al. Trends and prospect of machine vision technology for stresses and diseases detection in precision agriculture. *AgriEngineering*, v. 5, n. 1, p. 20-39, 2022.

SINHA, Bam Bahadur; DHANALAKSHMI, R. Recent advancements and challenges of Internet of Things in smart agriculture: A survey. *Future Generation Computer Systems*, v. 126, p. 169-184, 2022.

SMIDT, Hermanus Jacobus; JOKONYA, Osden. Factors affecting digital technology adoption by small-scale farmers in agriculture value chains (AVCs) in South Africa. *Information Technology for Development*, v. 28, n. 3, p. 558-584, 2022.

SOCIEDADE INTERNACIONAL DE AGRICULTURA DE PRECISÃO. ISPA. Disponível em: <https://www.ispag.org/about/definition>. Acesso em: 21 de novembro de 2024.

SOUSSI, Abdellatif et al. Smart Sensors and Smart Data for Precision Agriculture: A Review. *Sensors*, v. 24, n. 8, p. 2647, 2024.

TAMIRAT, Tseganesh Wubale; PEDERSEN, Søren Marcus; LIND, Kim Martin. Farm and operator characteristics affecting adoption of precision agriculture in Denmark and Germany. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B—Soil & Plant Science*, v. 68, n. 4, p. 349-357, 2018.

TAN, Xiao Jian et al. Expert systems in oil palm precision agriculture: A decade systematic review. *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*, v. 34, n. 4, p. 1569-1594, 2022.

TOMASZEWSKI, Lechosław; KOŁAKOWSKI, Robert. Mobile services for smart agriculture and forestry, biodiversity monitoring, and water management: Challenges for 5G/6G networks. In: *Telecom. MDPI*, 2023. p. 67-99.

TSOUROS, Dimosthenis C.; BIBI, Stamatia; SARIGIANNIDIS, Panagiotis G. A review on UAV-based applications for precision agriculture. *Information*, v. 10, n. 11, p. 349, 2019.

USEPA. *Climate impacts on agriculture and food supply*. United States Environmental Protection Agency, 2023. Disponível em: [Climate Impacts on Agriculture and Food Supply | Climate Change Impacts | US EPA](#). Acesso em: 18 nov. 2024.

VARGAS, Jorge et al. An overview of autonomous vehicles sensors and their vulnerability to weather conditions. *Sensors*, v. 21, n. 16, p. 5397, 2021.

VRONTIS, Demetris et al. Artificial intelligence, robotics, advanced technologies and human resource management: a systematic review. *Artificial intelligence and international HRM*, p. 172-201, 2023.

WOLFERT, Sjaak et al. Big data in smart farming—a review. *Agricultural systems*, v. 153, p. 69-80, 2017.

XIE, Chao; SUN, Yan; LUO, Hong. Secured data storage scheme based on block chain for agricultural products tracking. In: *2017 3rd International Conference on Big Data Computing and Communications (BIGCOM)*. IEEE, 2017. p. 45-50.

- XU, Jinyuan; GU, Baoxing; TIAN, Guangzhao. Review of agricultural IoT technology. *Artificial Intelligence in Agriculture*, v. 6, p. 10-22, 2022.
- XUE, Zhihao et al. Overview of multipath mitigation technology in global navigation satellite system. *Frontiers in Physics*, v. 10, p. 1071539, 2022.
- YANG, Lili et al. Identifying Working Trajectories of the Wheat Harvester In-Field Based on K-Means Algorithm. *Agriculture*, v. 12, n. 11, p. 1837, 2022.
- YANG, Zhiming et al. The application status and trends of machine vision in tea production. *Applied Sciences*, v. 13, n. 19, p. 10744, 2023.
- YUN, Zhu; ZHI-GANG, L. I. N. G.; YU-QIANG, ZHANG. Research progress and prospect of machine vision technology. *Journal of graphics*, v. 41, n. 6, p. 871, 2020.
- ZHANG, Fei; CAO, Nengxiu. Application and research progress of geographic information system (GIS) in agriculture. In: 2019 8th International Conference on Agro-Geoinformatics (Agro-Geoinformatics). IEEE, 2019. p. 1-5.
- ZHANG, Lihong et al. Sustainable Project Governance: Scientometric Analysis and Emerging Trends. *Sustainability*, v. 15, n. 3, p. 2441, 2023.
- ZHU, Qingyun; KOUHIZADEH, Mahtab. Blockchain technology, supply chain information, and strategic product deletion management. *IEEE Engineering Management Review*, v. 47, n. 1, p. 36-44, 2019.