

INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NA AGRICULTURA 4.0: DESAFIOS, POTENCIALIDADES E APLICAÇÕES NO MONITORAMENTO E MANEJO DAS CULTURAS

ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN AGRICULTURE 4.0: CHALLENGES, POTENTIALS, AND APPLICATIONS IN CROP MONITORING AND MANAGEMENT

INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN LA AGRICULTURA 4.0: DESAFÍOS, POTENCIALIDADES Y APLICACIONES EN EL MONITOREO Y MANEJO DE LOS CULTIVOS

Janaina Gama da Silva¹
Joedson Souza da Silva²
Levy Ribeiro Nascimento Oliveira³
Robert Rian Rodrigues Oliveira da Silva⁴
Calila Teixeira Santos⁵
Juracir Silva Santos⁶

RESUMO: Este artigo analisa as principais aplicações, potencialidades e desafios da Inteligência Artificial (IA) no monitoramento e manejo das culturas, no contexto da Agricultura 4.0. O estudo caracteriza-se como uma revisão bibliográfica, de abordagem qualitativa, realizada a partir de publicações científicas e materiais técnicos relacionados à agricultura digital, inteligência artificial e tecnologias aplicadas ao setor agrícola. A análise evidenciou que a IA apresenta aplicações relevantes no monitoramento das culturas, identificação de pragas, doenças e plantas daninhas, manejo da irrigação, previsão de produtividade e apoio à tomada de decisão. Essas tecnologias podem contribuir para maior precisão no acompanhamento das lavouras e para o uso mais racional dos recursos agrícolas. Entretanto, sua adoção ainda enfrenta desafios relacionados à qualidade e disponibilidade dos dados, custos de implementação, infraestrutura, conectividade e capacitação dos usuários. Conclui-se que a IA possui potencial para tornar a agricultura mais eficiente, precisa e sustentável, desde que integrada ao conhecimento técnico e às condições reais do campo.

Palavras-chave: Inteligência Artificial. Agricultura 4.0. Monitoramento de Culturas.

¹Discente do curso Licenciatura em Ciências Agrárias no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Baiano.

²Discente do curso Licenciatura em Ciências Agrárias no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Baiano.

³Discente do curso Licenciatura em Ciências Agrárias no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Baiano.

⁴Discente do curso Licenciatura em Ciências Agrárias no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Baiano.

⁵Orientadora. Doutora em Biotecnologia pela Universidade Estadual de Feira de Santana e professora no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Baiano

⁶Coorientador. Doutorado em Química Analítica pela Universidade Federal da Bahia e professor no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Baiano.

ABSTRACT: This article analyzes the main applications, potentialities, and challenges of Artificial Intelligence (AI) in crop monitoring and management within the context of Agriculture 4.0. The study is characterized as a qualitative bibliographic review based on scientific publications and technical materials related to digital agriculture, artificial intelligence, and technologies applied to the agricultural sector. The analysis showed that AI has relevant applications in crop monitoring, identification of pests, diseases and weeds, irrigation management, yield prediction, and decision-making support. These technologies can contribute to more accurate crop monitoring and more rational use of agricultural resources. However, their adoption still faces challenges related to data quality and availability, implementation costs, technological infrastructure, connectivity, and user training. It is concluded that AI has the potential to make agriculture more efficient, precise, and sustainable, provided that it is integrated with technical knowledge and the actual conditions of agricultural production.

Keywords: Artificial Intelligence. Agriculture 4.0. Crop Monitoring.

RESUMEN: Este artículo analiza las principales aplicaciones, potencialidades y desafíos de la Inteligencia Artificial (IA) en el monitoreo y manejo de los cultivos en el contexto de la Agricultura 4.0. El estudio se caracteriza como una revisión bibliográfica de enfoque cualitativo, realizada a partir de publicaciones científicas y materiales técnicos relacionados con la agricultura digital, la inteligencia artificial y las tecnologías aplicadas al sector agrícola. El análisis evidenció que la IA presenta aplicaciones relevantes en el monitoreo de los cultivos, la identificación de plagas, enfermedades y plantas espontáneas, el manejo del riego, la predicción de la productividad y el apoyo a la toma de decisiones. Estas tecnologías pueden contribuir a un seguimiento más preciso de los cultivos y a un uso más racional de los recursos agrícolas. Sin embargo, su adopción aún enfrenta desafíos relacionados con la calidad y disponibilidad de los datos, los costos de implementación, la infraestructura, la conectividad y la capacitación de los usuarios. Se concluye que la IA tiene potencial para hacer la agricultura más eficiente, precisa y sostenible, cuando se integra con el conocimiento técnico y las condiciones reales del campo.

Palabras clave: Inteligencia Artificial. Agricultura 4.0. Monitoreo de Cultivos.

INTRODUÇÃO

A agricultura vem passando por um intenso processo de transformação tecnológica, impulsionado pela necessidade de aumentar a produtividade, otimizar o uso dos recursos naturais e tornar os sistemas produtivos mais eficientes e sustentáveis. Nesse cenário, destaca-se a chamada Agricultura 4.0, caracterizada pela incorporação de tecnologias digitais às diferentes etapas da produção agropecuária. Entre essas tecnologias estão sensores, sistemas de posicionamento, Internet das Coisas (IoT), veículos aéreos não tripulados, imagens de satélite, big data e inteligência artificial. Para Bambini e Bonacelli (2024), a Agricultura 4.0 está relacionada ao desenvolvimento e à aplicação de tecnologias digitais nos diferentes elos das cadeias produtivas agropecuárias, modificando não apenas os processos de produção, mas também as formas de geração e utilização das informações no campo.

Entre as tecnologias que integram esse processo de transformação digital, a inteligência artificial (IA) tem adquirido crescente importância devido à sua capacidade de processar grandes volumes de dados, identificar padrões e fornecer informações capazes de auxiliar na tomada de decisão. Saraiva *et al.* (2024) destacam que a inteligência artificial vem assumindo papel cada vez mais relevante na pesquisa agrícola, com aplicações relacionadas à gestão da água, à produção agrícola, às cadeias de valor e ao processamento dos dados gerados durante os processos produtivos. No contexto brasileiro, essas ferramentas podem contribuir para o desenvolvimento de sistemas produtivos capazes de responder com maior precisão às diferentes condições encontradas no campo.

No monitoramento das culturas, a inteligência artificial pode ser empregada na identificação de pragas e doenças, detecção de plantas daninhas, avaliação das condições nutricionais e hídricas, acompanhamento do desenvolvimento vegetal e estimativa de produtividade. Essas informações também podem subsidiar práticas de manejo, como irrigação, fertilização e aplicação localizada de defensivos. Segundo Oliveira (2025), sistemas baseados em IA permitem analisar dados e identificar situações específicas dentro das áreas de cultivo, possibilitando intervenções mais direcionadas, com potencial para otimizar recursos e reduzir impactos ambientais.

Apesar das potencialidades apresentadas, a incorporação da inteligência artificial à agricultura ainda envolve desafios importantes. A disponibilidade e a qualidade dos dados, a infraestrutura tecnológica, a conectividade no meio rural, os custos de implantação, a capacitação dos usuários e a adaptação das ferramentas às diferentes condições produtivas podem limitar sua adoção. Dessa forma, embora sejam crescentes as aplicações da IA na agricultura, ainda existem lacunas relacionadas à sua implementação prática, à acessibilidade dessas tecnologias e à compreensão de seus benefícios e limitações nas diferentes realidades produtivas, tornando necessária uma análise conjunta de suas aplicações, potencialidades e desafios.

Diante desse contexto, estabelece-se como problema de pesquisa a seguinte questão: quais são as principais aplicações, potencialidades e desafios da inteligência artificial no monitoramento e manejo das culturas no contexto da Agricultura 4.0? Assim, este artigo tem como objetivo analisar as principais aplicações da inteligência artificial no monitoramento e manejo das culturas no contexto da Agricultura 4.0, destacando suas potencialidades, limitações e perspectivas para a promoção de sistemas agrícolas mais eficientes e sustentáveis.

METODOLOGIA

O presente trabalho caracteriza-se como uma revisão bibliográfica, de abordagem qualitativa, direcionada à análise da produção científica sobre a Inteligência Artificial no contexto da Agricultura 4.0. A revisão teve como eixo a relação entre o desenvolvimento dessas tecnologias e suas possibilidades de aplicação no monitoramento e manejo das culturas, considerando também os fatores que influenciam sua utilização no setor agrícola.

O levantamento da literatura foi realizado nos portais ScienceDirect, MDPI, Frontiers, SpringerLink, Nature e IOP Publishing, além de materiais técnicos da Embrapa. A consulta a diferentes fontes permitiu reunir estudos de diferentes áreas relacionadas à computação, agricultura e tecnologias digitais, ampliando a base utilizada para a discussão do tema.

A seleção do conteúdo foi orientada pela pertinência das publicações em relação ao problema de pesquisa e aos objetivos estabelecidos. Durante a leitura, foram identificados os estudos com contribuições mais diretamente relacionadas ao objeto da revisão, dando preferência a trabalhos que apresentassem aplicações, resultados, limitações ou perspectivas capazes de contribuir para a discussão proposta.

A análise do material ocorreu por meio de leitura e sistematização das informações relevantes. Em seguida, os conteúdos foram aproximados conforme sua relação com o desenvolvimento da pesquisa, permitindo construir uma discussão articulada entre os diferentes trabalhos, em vez de apresentar as contribuições de cada publicação de forma isolada.

A síntese dos estudos foi organizada em eixos de discussão correspondentes ao desenvolvimento do tema, abrangendo a inserção da Inteligência Artificial na Agricultura 4.0, suas aplicações no monitoramento e manejo das culturas, suas potencialidades, os desafios relacionados à adoção e as perspectivas identificadas na literatura. Esse procedimento possibilitou relacionar os avanços tecnológicos às condições de uso e às limitações observadas nos estudos analisados.

A interpretação foi realizada de forma qualitativa, buscando identificar convergências e diferenças entre as contribuições encontradas e relacioná-las ao problema de pesquisa. Além dos resultados apresentados pelas ferramentas de Inteligência Artificial, foram observados aspectos como qualidade dos dados, validação dos modelos, adaptação às diferentes condições agrícolas, infraestrutura e capacitação necessária para sua utilização. Esses elementos foram considerados na construção da análise sobre as possibilidades de aplicação dessas tecnologias na realidade agrícola.

Por se tratar de uma revisão baseada em fontes bibliográficas e institucionais, não foram envolvidos participantes humanos ou animais, nem realizadas intervenções ou coleta direta de dados em propriedades agrícolas. Dessa forma, não houve necessidade de submissão ao Comitê de Ética em Pesquisa ou de autorização institucional para atividades de campo.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.1 Agricultura 4.0 e a inserção da Inteligência Artificial

A agricultura tem vivenciado profundas transformações impulsionadas pelo desenvolvimento das tecnologias digitais e pelo processo de modernização dos sistemas de produção em diferentes partes do mundo. Nesse contexto, destaca-se a Agricultura 4.0, caracterizada pela integração de tecnologias como a Internet das Coisas (IoT), sensores, sistemas de posicionamento, computação em nuvem, robótica, sensoriamento remoto, análise de dados e Inteligência Artificial (IA). A articulação desses recursos busca tornar os sistemas agrícolas mais eficientes, permitindo que as decisões relacionadas ao planejamento e ao manejo das culturas sejam cada vez mais fundamentadas em dados e informações obtidas no campo (MASSRUHÁ; LEITE, 2017; BOLFE *et al.*, 2020).

No setor agrícola, essas tecnologias permitem o monitoramento de variáveis como umidade do solo, temperatura e condições ambientais, fornecendo informações que podem ser utilizadas para orientar o planejamento e o manejo das culturas. Dessa forma, a articulação entre esses recursos tecnológicos contribui para tornar os sistemas agrícolas mais eficientes, precisos e orientados por dados obtidos diretamente no campo.

Nesse cenário, os recursos associados à Inteligência Artificial assumem papel relevante por possibilitarem o processamento de grandes volumes de informações, a identificação de padrões e a elaboração de previsões capazes de subsidiar a tomada de decisões. A literatura recente demonstra que a integração entre métodos computacionais e outras tecnologias digitais está conduzindo a agricultura para sistemas cada vez mais conectados, nos quais dados obtidos por sensores, satélites, drones e equipamentos agrícolas podem ser analisados de maneira integrada.

Uma revisão sistemática publicada em 2026, envolvendo 95 estudos, identificou o aprendizado de máquina e os modelos híbridos entre as principais tendências da aplicação dessas tecnologias no setor agrícola, juntamente com o crescimento de soluções relacionadas à IoT, à automação e aos sistemas de apoio à decisão.

Dessa forma, a Agricultura 4.0 não se limita à utilização de máquinas modernas, mas representa uma mudança na maneira de produzir, monitorar e gerenciar as atividades agrícolas. A utilização integrada de diferentes fontes de dados possibilita compreender com maior precisão as condições da lavoura e direcionar as intervenções de acordo com as necessidades específicas das culturas. Entretanto, apesar das potencialidades apresentadas por essas soluções tecnológicas, sua adoção ainda enfrenta desafios relacionados aos custos de aquisição e manutenção dos equipamentos, à dependência de tecnologias importadas em determinados casos e à necessidade de mão de obra qualificada para operar, interpretar e gerenciar os sistemas digitais.

Nesse sentido, os custos associados à implementação dessas tecnologias e a disponibilidade limitada de profissionais capacitados constituem fatores que podem dificultar a modernização de determinadas propriedades agrícolas, especialmente aquelas que apresentam menor capacidade de investimento. Assim, embora a Agricultura 4.0 apresenta grande potencial para aumentar a eficiência e a sustentabilidade dos sistemas produtivos, sua expansão depende não apenas do desenvolvimento tecnológico, mas também da redução dos custos, da ampliação do acesso às tecnologias e da formação de profissionais preparados para atender às novas demandas do setor agrícola.

1.2 Aplicações de recursos computacionais no monitoramento das culturas

Entre as aplicações mais relevantes das tecnologias digitais na agricultura, destaca-se o monitoramento das culturas. De acordo com Massruhá e Leite (2017), Bolfe *et al.* (2020) e a Embrapa (2021), o acompanhamento tradicional das lavouras depende, em grande parte, da observação direta realizada por agricultores e técnicos. Embora esse conhecimento continue sendo fundamental para a tomada de decisões, a utilização de sensores, drones e satélites amplia significativamente a capacidade de observação das áreas cultivadas, especialmente em propriedades extensas, nas quais o acompanhamento frequente de toda a lavoura pode ser limitado pela disponibilidade de tempo e de mão de obra.

Nesse contexto, a visão computacional e o aprendizado de máquina possibilitam o processamento e a análise de imagens para identificar características relacionadas ao desenvolvimento das culturas, desde as fases iniciais até o período de colheita. Imagens obtidas por drones, satélites e câmeras podem ser utilizadas para avaliar as condições das plantas, identificar alterações na vegetação, acompanhar o crescimento e localizar áreas que necessitam

de maior atenção técnica. Dessa maneira, esses recursos tecnológicos complementam a observação realizada em campo e fornecem informações mais detalhadas para subsidiar o manejo das culturas.

Uma revisão sistemática realizada por Kuan, Goh e Lim (2025), que analisou 213 estudos sobre aprendizado de máquina e visão computacional aplicados à agricultura de precisão, identificou diferentes aplicações dessas tecnologias, incluindo detecção de culturas, doenças e pragas, identificação de plantas daninhas, estimativa de produtividade, análise do solo, colheita e manejo da água. O estudo também evidencia a ampla utilização de técnicas de aprendizado profundo, como as redes neurais convolucionais (CNNs), além do crescimento de abordagens mais recentes, como os Vision Transformers, aplicadas ao processamento e à interpretação de imagens agrícolas.

Dessa maneira, a utilização de métodos computacionais baseados em aprendizado de máquina e visão computacional pode contribuir para tornar o monitoramento das lavouras mais rápido, sistemático e preciso, possibilitando a identificação de alterações e o direcionamento da avaliação técnica para áreas específicas que apresentam maior necessidade de intervenção.

Entretanto, a eficiência dessas soluções está diretamente relacionada à qualidade e à diversidade dos dados utilizados no treinamento dos modelos, bem como à capacidade de generalização dos sistemas para diferentes culturas, condições ambientais e sistemas de produção. Assim, apesar do potencial dessas ferramentas para aprimorar o monitoramento agrícola, sua aplicação ainda requer validação em condições reais de campo e integração com o conhecimento dos profissionais responsáveis pelo manejo.

7

1.3 Detecção de doenças, pragas e plantas espontâneas

A identificação de doenças e pragas constitui uma das áreas de maior desenvolvimento das tecnologias computacionais aplicadas à agricultura moderna (MOHANTY, HUGHES, SALATHÉ, 2016; KAMILARIS, PRENAFETA-BOLDÚ, 2018). A utilização de imagens permite que algoritmos sejam treinados para reconhecer características visuais associadas a diferentes problemas fitossanitários, possibilitando a identificação de alterações que podem não ser facilmente percebidas durante a observação convencional das lavouras (FERENTINOS, 2018; SANKARAN *et al.*, 2010).

As técnicas de aprendizado profundo, especialmente as redes neurais convolucionais (CNNs), apresentam elevada capacidade para classificação e identificação de padrões em

imagens (LECUN, BENGIO, HINTON, 2015; KAMILARIS, PRENAFETA-BOLDÚ, 2018). Uma revisão sistemática publicada em 2024 analisou estudos sobre aprendizado profundo aplicado à detecção de doenças de plantas, abrangendo principalmente as áreas de classificação, detecção e segmentação de doenças (PACAL *et al.*, 2024). Essas abordagens podem aumentar a rapidez na identificação de problemas fitossanitários e auxiliar na definição de estratégias de manejo. Além disso, Ferentinos (2018) demonstrou a eficácia das redes neurais convolucionais na identificação de doenças em plantas a partir de imagens de folhas, reforçando o potencial dessas técnicas para aplicações agrícolas.

Entretanto, resultados obtidos em condições controladas nem sempre são reproduzidos no campo. Diferenças de luminosidade, variedade cultivada, estágio de desenvolvimento das plantas, presença de outras espécies vegetais e condições ambientais podem dificultar a identificação automatizada. Por isso, pesquisas recentes destacam a necessidade de utilizar conjuntos de dados diversificados e realizar validações em condições reais de produção, de modo a aumentar a confiabilidade e a capacidade de aplicação dos modelos em diferentes ambientes agrícolas.

Além das doenças, a visão computacional também pode ser utilizada para diferenciar plantas cultivadas de plantas daninhas. Essa identificação permite direcionar o controle para locais específicos, contribuindo para reduzir aplicações desnecessárias de herbicidas e melhorar a eficiência do manejo. A revisão de Kuan, Goh e Lim (2025) confirma a presença dessa aplicação entre os principais usos do aprendizado de máquina e da visão computacional na agricultura de precisão.

1.4 Previsão de produtividade e apoio à tomada de decisão

Outra aplicação relevante dos recursos computacionais no setor agrícola é a previsão da produtividade das culturas. A estimativa antecipada do rendimento pode auxiliar o planejamento da colheita, a comercialização, a organização da mão de obra e a gestão dos recursos disponíveis. Além disso, essas informações podem contribuir para a identificação de alterações no desenvolvimento das plantas e para a definição de estratégias de manejo mais adequadas (LOBELL, 2013; VAN KLOMPENBURG, KASSAHUN, CATAL, 2020).

Os modelos de aprendizado de máquina podem integrar variáveis climáticas, características do solo, histórico de produtividade, informações sobre irrigação e imagens obtidas por satélites e veículos aéreos não tripulados. A análise conjunta desses dados permite

identificar relações complexas entre as condições da lavoura e o rendimento esperado, contribuindo para a elaboração de estimativas mais precisas. Nesse contexto, diferentes algoritmos, como máquinas de vetores de suporte, florestas aleatórias, redes neurais artificiais e métodos de aprendizado profundo, têm sido empregados na previsão de produtividade agrícola (CHLINGARYAN, SUKKARIEH, WHELAN, 2018; VAN KLOMPENBURG, KASSAHUN, CATAL, 2020).

Revisões da literatura indicam que o uso de técnicas de aprendizado de máquina na previsão de produtividade agrícola tem crescido de forma significativa, especialmente em razão da disponibilidade de grandes volumes de dados provenientes de sensores, estações meteorológicas, sistemas de posicionamento global e plataformas de sensoriamento remoto. Esses estudos também destacam que o desempenho dos modelos depende da qualidade, da quantidade e da representatividade dos dados utilizados, bem como da seleção das variáveis e da validação dos resultados em diferentes condições ambientais e sistemas de produção (CHLINGARYAN, SUKKARIEH, WHELAN, 2018; VAN KLOMPENBURG, KASSAHUN, CATAL, 2020).

Nesse sentido, os modelos preditivos podem atuar como ferramentas de apoio à tomada de decisão, fornecendo estimativas úteis ao produtor e ao profissional responsável pelo manejo. Entretanto, essas previsões não devem substituir a avaliação agrônômica, pois sua confiabilidade está condicionada à qualidade dos dados, às características específicas das culturas e às condições nas quais os modelos foram desenvolvidos e validados. A aplicação prática dessas ferramentas exige, portanto, avaliação contínua de seu desempenho, interpretação dos resultados e integração com o conhecimento técnico e as observações realizadas no campo.

1.5 Potencialidades da Inteligência Artificial para a agricultura

As aplicações apresentadas demonstram que a Inteligência Artificial possui potencial para contribuir em diferentes etapas da produção agrícola. Entre as principais possibilidades estão o monitoramento das culturas, a identificação de doenças e pragas, o manejo da irrigação, a previsão de produtividade, o controle de plantas daninhas e o uso mais direcionado de insumos. Essas aplicações são discutidas na literatura científica, embora seus resultados estejam relacionados às características dos dados utilizados, às condições de desenvolvimento dos modelos e ao contexto em que as tecnologias são aplicadas.

Revisões sobre agricultura digital e aprendizado de máquina destacam avanços nessas áreas, ao mesmo tempo em que apontam limitações relacionadas à disponibilidade e qualidade dos dados, à validação dos modelos e à transferência das soluções desenvolvidas para condições reais de campo (WOLFERT *et al.*, 2017; LIAKOS *et al.*, 2018; BENOS *et al.*, 2021).

De forma geral, a utilização integrada dessas tecnologias pode favorecer uma agricultura mais precisa, eficiente e orientada por dados. A combinação de diferentes fontes de informação, como sensores, imagens de satélite, drones e sistemas de posicionamento, permite identificar variações dentro das áreas cultivadas e fornecer informações para direcionar as ações de manejo. Entretanto, a integração dessas tecnologias não garante, por si só, maior eficiência agrônômica. A qualidade das recomendações está relacionada à qualidade e à representatividade dos dados, ao desempenho dos algoritmos e à validação dos modelos em diferentes culturas, condições ambientais e sistemas de produção (KAMILARIS, PRENAFETA-BOLDÚ, 2018).

Além dos aspectos técnicos, a adoção das tecnologias digitais envolve fatores econômicos, sociais e organizacionais. Questões relacionadas à infraestrutura, à conectividade, à capacitação dos usuários, à integração entre diferentes sistemas e à disponibilidade de recursos podem influenciar a incorporação dessas ferramentas nas propriedades agrícolas. Dessa forma, a digitalização do setor não deve ser compreendida apenas como uma questão de desenvolvimento tecnológico, mas também como um processo que envolve mudanças nas formas de organização, gestão e tomada de decisão na agricultura (KLERKX, JAKKU, LABARTHE, 2019).

10

Nesse contexto, as tecnologias baseadas em Inteligência Artificial podem contribuir para uma utilização mais racional dos recursos agrícolas, fornecendo informações que auxiliem no direcionamento das intervenções e no acompanhamento das condições da lavoura. Entretanto, esses benefícios não são automáticos, pois dependem da adequação das soluções às características da cultura, da propriedade, das condições ambientais e da realidade dos usuários. A gestão e a integração dos dados também constituem aspectos importantes para o funcionamento dos sistemas digitais, uma vez que diferentes fontes de informação precisam ser organizadas e utilizadas de maneira adequada para gerar resultados úteis à tomada de decisão (SAIZ-RUBIO, ROVIRA-MÁS, 2020).

Portanto, embora a Inteligência Artificial e as tecnologias digitais apresentem potencial para aumentar a eficiência dos sistemas agrícolas, sua adoção deve ser acompanhada de avaliação técnica, econômica e agrônômica. A implementação dessas ferramentas requer não

apenas modelos computacionais eficientes, mas também dados confiáveis, infraestrutura adequada, capacitação dos usuários e integração com os conhecimentos e práticas já existentes no campo. Nesse sentido, a Agricultura 4.0 deve ser compreendida como um processo de transformação tecnológica e organizacional, no qual a Inteligência Artificial atua como uma ferramenta de apoio à tomada de decisão, e não como substituta do conhecimento técnico e da experiência dos profissionais responsáveis pelo manejo (WOLFERT *et al.*, 2017; KLERKX, JAKKU, LABARTHE, 2019; BENOS *et al.*, 2021).

1.6 Desafios para a adoção de tecnologias baseadas em Inteligência Artificial

Apesar das potencialidades, a utilização de soluções baseadas em Inteligência Artificial na agricultura ainda apresenta limitações. Entre os principais desafios estão a qualidade e a disponibilidade dos dados, os custos de implementação, a infraestrutura tecnológica, a conectividade e a necessidade de capacitação dos usuários. Esses fatores podem dificultar a adoção dessas tecnologias, principalmente em propriedades que possuem menor capacidade de investimento (BHATTARAI *et al.*, 2026).

Os modelos computacionais dependem de informações adequadas para seu treinamento e validação. Dados incompletos, pouco diversificados ou obtidos exclusivamente em condições controladas podem reduzir a capacidade de aplicação dos modelos em situações reais de produção. Outro desafio está relacionado à generalização dos modelos. Um sistema desenvolvido para determinada cultura, região ou condição ambiental pode apresentar desempenho diferente quando utilizado em outro local.

Também existem desafios relacionados à manutenção dos sensores e à capacitação dos usuários. Esses fatores podem dificultar a adoção das tecnologias, principalmente em propriedades que possuem menor capacidade de investimento. Essa questão é particularmente importante para os pequenos produtores. As limitações relacionadas aos custos de infraestrutura, à privacidade dos dados e à alfabetização digital constituem barreiras para a adoção dessas soluções na agricultura de precisão por pequenos agricultores (BHATTARAI *et al.*, 2026).

1.7 Perspectivas para a Agricultura 4.0

As pesquisas mais recentes indicam que o desenvolvimento da Agricultura 4.0 tende a avançar para sistemas cada vez mais integrados. A tendência não é utilizar a Inteligência

Artificial de maneira isolada, mas combiná-la com sensores, Internet das Coisas (IoT), drones, satélites, robótica e sistemas automatizados, ampliando a capacidade de monitoramento e de tomada de decisão no campo. Uma revisão sistemática publicada em 2026, com 95 estudos, aponta justamente para essa maior integração entre sensoriamento, modelagem, automação, Inteligência Artificial, IoT e robótica.

Outra tendência importante é o desenvolvimento da Inteligência Artificial Explicável (XAI), que busca tornar mais compreensível a forma como os modelos chegam às suas previsões e recomendações. Essa abordagem pode aumentar a confiança dos usuários e facilitar a utilização desses sistemas em decisões relacionadas ao manejo agrícola (PAI, BALACHANDRA, KAMATH, 2025). A literatura recente também destaca o crescimento de modelos computacionais mais leves, capazes de funcionar próximos ao local de coleta dos dados por meio da computação de borda (Edge Computing), reduzindo a dependência de processamento exclusivamente em servidores remotos (SAPNA *et al.*, 2026).

Apesar desses avanços, ainda existe uma diferença entre os resultados obtidos em pesquisas e sua aplicação em propriedades agrícolas. A revisão sistemática publicada em 2026 aponta que muitos estudos ainda permanecem em níveis de protótipo ou prova de conceito, sendo necessária maior validação em condições reais de produção e em diferentes culturas e ambientes. Esse aspecto demonstra que o desenvolvimento da Agricultura 4.0 não depende apenas da criação de novos modelos computacionais, mas também da capacidade de transformar essas tecnologias em soluções confiáveis e aplicáveis à realidade do campo.

1.8 Síntese da revisão

A literatura científica recente evidencia que a Inteligência Artificial representa uma importante ferramenta para o desenvolvimento da Agricultura 4.0. Suas aplicações abrangem desde o monitoramento das culturas e a identificação de doenças e pragas até o manejo da irrigação, a previsão de produtividade e o apoio à tomada de decisão.

Entretanto, a adoção dessas tecnologias ainda depende de fatores técnicos, econômicos e sociais. A qualidade dos dados, a conectividade, o custo dos equipamentos, a capacitação dos usuários e a capacidade dos modelos de funcionar em diferentes condições são desafios que precisam ser considerados para que essas ferramentas sejam utilizadas de forma eficiente.

Dessa forma, o avanço da Agricultura 4.0 não depende apenas do desenvolvimento de algoritmos mais sofisticados, mas também da criação de soluções acessíveis, confiáveis e

adaptadas à realidade dos produtores. A tendência apresentada pela literatura atual é de maior integração entre Inteligência Artificial, aprendizado de máquina, IoT, sensoriamento remoto e automação, buscando transformar os dados produzidos no campo em informações úteis para um manejo mais eficiente, preciso e sustentável.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A revisão bibliográfica permitiu analisar as principais aplicações, potencialidades e desafios da Inteligência Artificial no monitoramento e manejo das culturas no contexto da Agricultura 4.0. Os estudos evidenciaram aplicações no monitoramento das culturas, detecção de pragas, doenças e plantas espontâneas, manejo da irrigação, previsão de produtividade e apoio à tomada de decisão. Integrada a sensores, drones, satélites, Internet das Coisas e aprendizado de máquina, a IA pode ampliar a capacidade de análise das condições agrícolas e contribuir para intervenções mais direcionadas e para o uso racional dos recursos.

Apesar dessas potencialidades, sua adoção está condicionada à qualidade e representatividade dos dados, à validação dos modelos, à infraestrutura, à conectividade, aos custos de implementação e à capacitação dos usuários. Assim, a utilização da IA precisa considerar as características da cultura, da propriedade e das condições ambientais, sendo integrada ao conhecimento técnico e à observação do campo. Nesse sentido, a tecnologia deve atuar como instrumento de apoio à tomada de decisão, sem substituir a avaliação agrônômica e a experiência dos profissionais responsáveis pelo manejo.

Dessa forma, o avanço da Inteligência Artificial na Agricultura 4.0 depende não apenas da evolução tecnológica, mas também de soluções confiáveis, acessíveis e adaptadas às diferentes realidades agrícolas. Como perspectiva, destacam-se a ampliação de estudos em condições reais de produção e o desenvolvimento de ferramentas com maior capacidade de adaptação e validação. A consolidação dessas tecnologias requer, portanto, a articulação entre inovação, conhecimento técnico e as particularidades dos sistemas de produção.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) por meio do Programa Institucional de bolsas de Iniciação à docência (PIBID) pelo apoio e incentivo à formação acadêmica e científica. Estendemos nossos agradecimentos aos professores Juracir Santos Silva e Calila Teixeira Santos, pela orientação, acompanhamento, contribuições e apoio durante o desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

ARTIFICIAL INTELLIGENCE in modern agriculture: recent advances, challenges, and future directions: a systematic review. *Artificial Intelligence in Agriculture*, 2026. DOI: 10.1016/j.aiia.2026.08.005.

BAMBINI, Martha Delphino; BONACELLI, Maria Beatriz Machado. Revolução digital no setor agropecuário e transformação da dinâmica inovativa: novos atores e relacionamentos. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, Brasília, DF, v. 41, 2024.

BENOS, Lefteris et al. Machine learning in agriculture: a comprehensive updated review. *Sensors*, v. 21, n. 11, p. 3758, 2021. DOI: 10.3390/s21113758.

BHATTARAI, Richa; KOCH, Jennifer; JENTNER, Wolfgang; HABIB, Mehreen; WIMBERLY, Michael C.; EBERT, David. Scale, trust, and the digital divide: a systematic review of AI and ML for agricultural applications. *Frontiers in Artificial Intelligence*, v. 9, art. 1798896, 2026. DOI: 10.3389/frai.2026.1798896.

BOLFE, Édson Luis et al. Agricultura digital: pesquisa, desenvolvimento e inovação nas cadeias produtivas. Brasília, DF: Embrapa, 2020.

BOLFE, Édson Luis et al. Precision and digital agriculture: adoption of technologies and perception of Brazilian farmers. *Agriculture*, v. 10, n. 12, p. 653, 2020. DOI: 10.3390/agriculture10120653.

CHLINGARYAN, A.; SUKKARIEH, S.; WHELAN, B. Machine learning approaches for crop yield prediction and nitrogen status estimation in precision agriculture: a review. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 151, p. 61–69, 2018. DOI: 10.1016/j.compag.2018.05.012.

EMBRAPA. Agricultura digital no Brasil: tendências, desafios e oportunidades. Brasília, DF: Embrapa, 2021.

FERENTINOS, Konstantinos P. Deep learning models for plant disease detection and diagnosis. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 145, p. 311–318, 2018. DOI: 10.1016/j.compag.2018.01.009.

KAMILARIS, Andreas; PRENAFETA-BOLDÚ, Francesc X. Deep learning in agriculture: a survey. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 147, p. 70–90, 2018. DOI: 10.1016/j.compag.2018.02.016.

KLERKX, Laurens; JAKKU, Emma; LABARTHE, Pierre. A review of social science on digital agriculture, smart farming and agriculture 4.0: new contributions and a future research agenda. *NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences*, v. 90–91, art. 100315, 2019. DOI: 10.1016/j.njas.2019.100315.

KUAN, Y. N.; GOH, K. M.; LIM, L. L. Systematic review on machine learning and computer vision in precision agriculture: applications, trends, and emerging techniques. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, v. 148, art. 110401, 2025. DOI: 10.1016/j.engappai.2025.110401.

LECUN, Yann; BENGIO, Yoshua; HINTON, Geoffrey. Deep learning. *Nature*, v. 521, n. 7553, p. 436–444, 2015. DOI: 10.1038/nature14539.

LIAKOS, Konstantinos G. et al. Machine learning in agriculture: a review. *Sensors*, v. 18, n. 8, p. 2674, 2018. DOI: 10.3390/s18082674.

LOBELL, David B. The use of satellite data for crop yield gap analysis. *Field Crops Research*, v. 143, p. 56–64, 2013. DOI: 10.1016/j.fcr.2012.08.008.

MASSRUHÁ, Silvia Maria Fonseca; LEITE, Maria Angélica de Andrade. Agricultura digital. In: MASSRUHÁ, Silvia Maria Fonseca et al. (org.). *Agricultura digital: pesquisa, desenvolvimento e inovação nas cadeias produtivas*. Brasília, DF: Embrapa, 2017. p. 28–38.

MOHANTY, Sharada P.; HUGHES, David P.; SALATHÉ, Marcel. Using deep learning for image-based plant disease detection. *Frontiers in Plant Science*, v. 7, art. 1419, 2016. DOI: 10.3389/fpls.2016.01419.

OLIVEIRA, Stanley Robson de Medeiros. O papel da inteligência artificial na agricultura do futuro. *Andav em Ação*, [S. l.], ano 8, n. 33, p. 18–21, 2025.

PACAL, Ishak; KUNDURACIOGLU, Ismail; ALMA, Mehmet Hakki; DEVECI, Muhammet et al. A systematic review of deep learning techniques for plant diseases. *Artificial Intelligence Review*, v. 57, art. 304, 2024. DOI: 10.1007/s10462-024-10944-7.

PAI, Deepthi G.; BALACHANDRA, Mamatha; KAMATH, Radhika. Explainable AI in agriculture: review of applications, methodologies, and future directions. *Engineering Research Express*, v. 7, n. 3, art. 032202, 2025. DOI: 10.1088/2631-8695/ae086a.

SAIZ-RUBIO, Verónica; ROVIRA-MÁS, Francisco. From Smart Farming towards Agriculture 5.0: a review on crop data management. *Agronomy*, v. 10, n. 2, art. 207, 2020. DOI: 10.3390/agronomy10020207.

SANKARAN, Sindhuja et al. A review of advanced techniques for detecting plant diseases. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 72, n. 1, p. 1–13, 2010. DOI: 10.1016/j.compag.2010.02.007.

SAPNA; GAUTTAM, Himanshu; CHAUHAN, Vikas; PATTANAIK, K. K.; TRIVEDI, Aditya; GHOSH, Hrishita. A comprehensive review of Edge Computing empowered smart agriculture: trends, opportunities and future directions. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 241, art. 111252, 2026. DOI: 10.1016/j.compag.2025.111252.

SARAIVA, António Mauro et al. A inteligência artificial na pesquisa agrícola. *Revista USP*, São Paulo, n. 141, p. 91–106, abr./maio/jun. 2024.

VAN KLOMPENBURG, T.; KASSAHUN, A.; CATAL, C. Crop yield prediction using machine learning: a systematic literature review. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 177, art. 105709, 2020. DOI: 10.1016/j.compag.2020.105709.

WOLFERT, Sjaak et al. Big Data in Smart Farming: a review. *Agricultural Systems*, v. 153, p. 69–80, 2017. DOI: 10.1016/j.agsy.2017.01.023.