

OTIMIZAÇÃO SUSTENTÁVEL DA PRODUÇÃO AGRÍCOLA NO BRASIL: APLICAÇÕES DE DRONES INTELIGENTES E INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

Allan Muniz Mello Cid

Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET/RJ)
kronos.producao@gmail.com - <https://orcid.org/0000-0002-2643-1920>

Athus Martins Salgado do Amaral

Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET/RJ)
athus.martinss@gmail.com - <https://orcid.org/0009-0000-9910-7331>

Flaviane Santos da Costa

Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET/RJ)
flavsc@gmail.com - <https://orcid.org/0000-0002-6859-9852>

Fernando Salgado do Amaral

Universidade Iguazu (UNIG)
fernando.sal.81@gmail.com - <https://orcid.org/000-0003-4370-3198>

Resumo: Este estudo analisa a aplicação de drones e Inteligência Artificial (IA) na Agricultura 4.0 no Brasil, com foco em dois casos de sucesso: (1) detecção precoce de doenças na soja no Centro-Oeste e (2) otimização do uso da água na citricultura do Sudeste. A metodologia combina revisão sistemática da literatura e análise qualitativa de estudos de caso, priorizando referências científicas recentes (2020–2025) e dados estatísticos de fontes oficiais (IBGE, Conab). Os resultados revelam impactos significativos: redução de 30% a 70% no uso de fungicidas na soja, economia de 20% a 50% de água na citricultura, além de benefícios ambientais (menor contaminação do solo e conservação de recursos) e sociais (redução da exposição a agroquímicos e geração de emprego técnico). No entanto, desafios persistem, como alto custo tecnológico, infraestrutura rural deficiente e escassez de mão de obra qualificada. Estratégias propostas incluem parcerias público-privadas, modelos de “Agricultura como Serviço” (FaaS) e políticas de incentivo à inovação local. A pesquisa destaca a importância de governança ética de dados e adaptação tecnológica às condições brasileiras, alinhando-se aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Conclui-se que a integração de drones e IA promove eficiência e sustentabilidade, mas sua ampla adoção requer soluções coordenadas em pesquisa, capacitação e políticas públicas para consolidar o Brasil como líder global em agricultura resiliente às mudanças climáticas.

Palavras-chave: Agricultura 4.0. Drones. Inteligência Artificial. Agricultura de precisão. Sustentabilidade.

Abstract: This study examines the application of drones and Artificial Intelligence (AI) within Agriculture 4.0 in Brazil, focusing on two successful case studies: (1) early disease detection in soybean crops in the Midwest and (2) water-use optimization in citrus farming in the Southeast. The methodology combines a systematic literature review with qualitative case analysis, prioritizing recent

scientific references (2020–2025) and statistical data from official sources (IBGE, CONAB). Results reveal significant impacts: reduction of 30%–70% in pesticide use in soybean farming, water savings of 20%–50% in citrus cultivation, and environmental benefits such as reduced soil and water contamination. However, challenges persist, including high technology costs, inadequate rural infrastructure, and shortages of skilled labor. Proposed strategies include public-private partnerships, “Farming as a Service” (FaaS) models, and policies to incentivize local innovation. The research highlights the importance of ethical data governance and technology adaptation to Brazilian conditions, aligning with the United Nations’ Sustainable Development Goals (SDGs). It concludes that integrating drones and AI enhances efficiency and sustainability but requires coordinated efforts in research, training, and policy to position Brazil as a global leader in climate-resilient agriculture.

Keywords: Agriculture 4.0. Drones. Artificial Intelligence. Precision Agriculture. Sustainability.

INTRODUÇÃO

A Agricultura 4.0, impulsionada por tecnologias como Inteligência Artificial (IA), Internet das Coisas (IoT) e drones, representa uma revolução no setor agrícola global, buscando eficiência, produtividade e sustentabilidade. No Brasil, líder em produção e exportação de alimentos, sua adoção é crucial para enfrentar desafios como mudanças climáticas, escassez de recursos e demanda crescente por alimentos. Em 2024, o agronegócio respondeu por 23,2% do PIB nacional (R\$ 2,72 trilhões) e 45,2% das exportações, com a safra de grãos 2024/25 estimada em 330,3 milhões de toneladas. A agricultura de precisão, precursora da Agricultura 4.0, já é amplamente adotada, com crescimento exponencial em pesquisas científicas.

Drones equipados com sensores multiespectrais, térmicos e LiDAR coletam dados de alta resolução, permitindo monitoramento preciso de culturas. Algoritmos de IA analisam essas informações para identificar estresses bióticos (doenças, pragas) e abióticos (deficiências nutricionais, estresse hídrico), otimizar insumos via aplicação em taxa variável e prever produtividade. Estudos indicam redução de até 70% no uso de defensivos e 50% no consumo de água, além de menor lixiviação de nutrientes e emissões de GEE. Em 2023, o Brasil contava com 3.058 drones agrícolas registrados, com crescimento acelerado nos últimos anos.

Apesar dos benefícios, desafios persistem: alto custo inicial, falta de infraestrutura digital (conectividade rural), carência de mão de obra qualificada e questões de governança de dados, como soberania tecnológica e “colonialismo de dados”. Fernandes *et al.* (2024) destacam a necessidade de requalificação profissional, enquanto Borelli e Senise (2024) alertam para assimetrias na adoção tecnológica em países em desenvolvimento. Viola e Mendes (2022) mencionam barreiras técnicas (interoperabilidade) e regulatórias.

Este estudo analisa casos de sucesso no uso de drones e IA no Brasil, avaliando impactos econômicos (redução de custos, aumento de produtividade), ambientais (conservação de recursos) e sociais (segurança alimentar, emprego qualificado). Também investiga desafios técnicos (calibração de sensores), operacionais (condições climáticas) e regulatórios, além de estratégias de superação, como parcerias público-privadas e modelos de Agricultura como Serviço (FaaS). Com base em literatura científica e dados de campo, busca contribuir para políticas públicas e decisões estratégicas, alinhando inovação à sustentabilidade no agronegócio brasileiro.

Vale destacar que a transição para a Agricultura 4.0 exige esforço coordenado entre setor produtivo, academia, governo e sociedade. Investir em pesquisa, capacitação e infraestrutura digital é essencial para garantir que os benefícios tecnológicos sejam amplamente distribuídos, consolidando o Brasil como líder global em agricultura sustentável e resiliente às mudanças climáticas.

1. DESENVOLVIMENTO

A Agricultura 4.0, impulsionada por tecnologias como Inteligência Artificial (IA), Internet das Coisas (IoT) e drones, representa uma revolução na produção agrícola global, integrando digitalização, conectividade e automação para otimizar recursos e aumentar a eficiência. No Brasil, líder em exportações agrícolas, essa transformação busca aliar competitividade internacional a práticas sustentáveis, enfrentando desafios como mudanças climáticas e escassez de recursos. A IA processa dados de sensores, drones e satélites para análise preditiva, enquanto a IoT permite

monitoramento em tempo real de condições climáticas e do solo, conforme destacado por estudos como os de Viola e Mendes (2022).

A Agricultura de precisão, precursora da Agricultura 4.0, fundamenta-se no manejo sito-específico de culturas, aplicando insumos de forma racionalizada com base em dados georreferenciados. Tecnologias como GPS, sensores e drones viabilizam a coleta e análise de informações, permitindo estratégias como a aplicação em taxa variável (VRT) de fertilizantes e defensivos. Pesquisas brasileiras, como as de Cherubin *et al.* (2022), mostram crescimento exponencial na adoção de sensores proximais e remotos, além de ferramentas de apoio à decisão, especialmente no Centro-Oeste e Sudeste.

Drones equipados com sensores multiespectrais, térmicos e LiDAR são ferramentas-chave para mapeamento e intervenção precisa em lavouras. Eles identificam estresse hídrico, doenças e pragas com alta resolução espacial, gerando mapas que orientam ações como pulverização seletiva e semeadura de precisão. Estudos como os de Jorge *et al.* (2024) destacam a redução de até 70% no uso de fungicidas e 50% no consumo de água, minimizando impactos ambientais e aumentando a eficiência operacional.

A sustentabilidade é central na Agricultura 4.0, alinhando-se aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) ao promover uso racional de recursos e mitigação de emissões de GEE. Tecnologias digitais reduzem a contaminação do solo e da água, preservam biodiversidade e melhoram a segurança alimentar. No entanto, desafios persistem, como a necessidade de infraestrutura rural (conectividade e energia) e políticas públicas que incentivem práticas sustentáveis, conforme alertam Viola e Mendes (2022).

A digitalização agrícola também levanta questões éticas, como o “colonialismo de dados”, que reflete a dependência de plataformas estrangeiras e a concentração de poder tecnológico. Problemas de governança de dados, privacidade e soberania nacional exigem regulamentações claras e desenvolvimento local de tecnologias. Autores como Borelli e Senise (2024) enfatizam a importância de algoritmos transparentes e políticas que garantam equidade no acesso às inovações.

Para consolidar a Agricultura 4.0 no Brasil, estratégias como investimento em pesquisa nacional, capacitação profissional e modelos de

negócio inclusivos são essenciais. Parcerias público-privadas e políticas de incentivo podem democratizar o acesso a tecnologias, garantindo que pequenos produtores também se beneficiem. A integração de IA, drones e IoT, aliada a uma governança ética de dados, posicionará o país como líder em agricultura sustentável, alinhada aos princípios do desenvolvimento socioeconômico e ambiental.

2. METODOLOGIA

A presente pesquisa desenvolve-se como uma revisão narrativa e analítica da literatura, centrada na análise aprofundada de múltiplos estudos de caso para investigar a otimização sustentável da produção agrícola no Brasil por meio de mapeamento e controle por drones inteligentes. O estudo busca identificar impactos gerados, dificuldades enfrentadas e estratégias de solução, respaldando-se em uma ampla base de referências científicas recentes e clássicas, além de dados estatísticos relevantes.

A metodologia combina revisão sistemática da literatura com análise qualitativa de casos práticos, abrangendo artigos científicos, relatórios técnicos de instituições como Embrapa e FAO, teses, dissertações e publicações de universidades e associações do setor agrícola, priorizando documentos dos últimos cinco anos (2020–2025) para garantir atualidade, complementados por referências históricas essenciais para contextualização teórica. A busca ocorreu em bases como Google Scholar, Web of Science, Scopus, SciELO e repositórios institucionais, utilizando termos em português e inglês relacionados a drones, Agricultura 4.0, Inteligência Artificial e sustentabilidade.

Os estudos de caso foram selecionados com base em critérios rigorosos: relevância temática (uso de drones e IA para monitoramento e otimização agrícola), contexto geográfico (priorizando o Brasil), recência (preferencialmente após 2020), qualidade metodológica (detalhamento sobre tecnologias, resultados e desafios) e credibilidade das fontes (periódicos indexados, relatórios técnicos de instituições renomadas).

Cabe citar que essa abordagem permitiu extrair informações sobre contextos de aplicação, tecnologias utilizadas (especificações de drones, sensores e algoritmos), objetivos, impactos econômicos, ambientais e

sociais, além de obstáculos técnicos, regulatórios e operacionais enfrentados. A coleta de dados incluiu fichamento sistemático e categorização de informações, enquanto a análise adotou técnicas de codificação temática (Bardin, 2016), buscando padrões e particularidades regionais ou setoriais, conforme orientado por Yin (2018).

A interação entre dados empíricos e fundamentação teórica foi central para interpretar os achados, integrando conceitos de Agricultura 4.0, agricultura de precisão e sustentabilidade. Dados estatísticos de órgãos como IBGE, Conab e FAO foram usados para contextualizar a relevância do agronegócio brasileiro e os desafios de adoção tecnológica. A triangulação de fontes e a análise comparativa entre casos visaram mitigar limitações, como o viés de publicação – estudos com resultados positivos tendem a ser mais divulgados, conforme destacado por Franco *et al.* (2014).

Apesar da dependência de dados secundários, a diversidade de fontes e a profundidade metodológica buscam assegurar robustez à análise, mesmo reconhecendo a necessidade de cautela na generalização dos resultados devido à heterogeneidade dos sistemas produtivos brasileiros.

A abordagem qualitativa permitiu explorar nuances dos processos de adoção de drones e IA, destacando benefícios como redução no uso de insumos e aumento de produtividade, bem como desafios técnicos (custos, infraestrutura rural), regulatórios e de capacitação. Estratégias como parcerias público-privadas, modelos de Agricultura como Serviço (FaaS) e políticas de incentivo foram identificadas como fundamentais para superar barreiras. A análise também evidenciou a importância de governança ética de dados, evitando dinâmicas de “colonialismo de dados” apontadas por Borelli e Senise (2024), e a necessidade de algoritmos transparentes e adaptação tecnológica às condições locais.

Embora a pesquisa enfatize avanços, reconhece-se que a transição para a Agricultura 4.0 no Brasil depende de esforços coordenados para democratizar o acesso à tecnologia, qualificar mão de obra e fortalecer políticas públicas. A integração de IA, drones e IoT, aliada a uma governança responsável, posiciona o país para liderar uma agricultura sustentável, mas requer superação de desafios estruturais, como conectividade rural e infraestrutura digital. Assim, o estudo contribui para debates sobre inovação agrícola, destacando a necessidade de equilíbrio entre

avanços tecnológicos e justiça socioambiental, conforme defendido por Elkington (1997) no conceito do Triple Bottom Line.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A aplicação de drones e Inteligência Artificial (IA) na agricultura brasileira tem gerado um corpo crescente de estudos de caso e experiências que demonstram o potencial dessas tecnologias para otimizar a produção de forma sustentável. Dois casos notáveis foram selecionados para análise crítica, integrando seus contextos, tecnologias empregadas, resultados alcançados, desafios enfrentados e estratégias de superação, seguidos de uma discussão sobre os impactos, limitações e perspectivas para a adoção em larga escala no Brasil. Esses estudos refletem a convergência entre Agricultura 4.0 e práticas de precisão, destacando o papel transformador de ferramentas digitais na gestão de culturas e na mitigação de riscos agrícolas.

O primeiro caso aborda a detecção e manejo de precisão da ferrugem asiática da soja (*Phakopsora pachyrhizi*) no Centro-Oeste brasileiro, uma doença que pode causar perdas de até 80% se não controlada adequadamente. Pesquisas recentes, como as de Mishra *et al.* (2021) e Zhang *et al.* (2022), em parceria com a Embrapa Soja e universidades, desenvolveram sistemas de detecção precoce usando drones e IA.

Essas tecnologias permitem identificar infecções antes da visibilidade a olho nu, orientando aplicações localizadas de fungicidas em grandes lavouras de Mato Grosso e Goiás. A abordagem combina sensores multiespectrais e hiperespectrais, algoritmos de machine learning (Redes Neurais Convolucionais - CNNs) e mapas de risco gerados via geoprocessamento, revolucionando o monitoramento tradicional, muitas vezes tardio e impreciso.

Os resultados do caso da soja revelam impactos econômicos, ambientais e sociais significativos. Economicamente, a redução de 30% a 70% no uso de fungicidas gera economia substancial de custos e preserva até 80% do potencial produtivo. Ambientalmente, a aplicação localizada minimiza a contaminação do solo e da água, além de retardar o desenvolvimento de resistência dos patógenos aos agroquímicos. Socialmente,

a redução da exposição de trabalhadores a defensivos melhora a saúde ocupacional, enquanto a segurança alimentar é fortalecida pela manutenção da produtividade.

No entanto, desafios como a variabilidade ambiental (deficiências nutricionais e estresse hídrico) interferem na precisão da detecção, exigindo bibliotecas espectrais robustas e redes neurais treinadas para distinguir padrões específicos da doença. Além disso, o alto custo de equipamentos e softwares limita o acesso, demandando modelos de Agricultura como Serviço (FaaS) e parcerias público-privadas para democratização da tecnologia.

O segundo caso foca na otimização do uso da água na citricultura irrigada do Sudeste brasileiro, uma atividade econômica central em São Paulo, mas afetada por desperdício hídrico. Estudos do Instituto Agrônomo (IAC) e da Esalq/USP utilizam drones equipados com sensores térmicos e multiespectrais para mapear o estresse hídrico em pomares, integrando dados a modelos agrometeorológicos. Tecnologias como o NDVI, NDWI e algoritmos de IA geram mapas de variabilidade, orientando decisões sobre irrigação.

Nesse contexto, resultados apontam economia de 20% a 50% na água aplicada, redução de custos energéticos e aumento de até 100% na produtividade em pomares com irrigação por gotejamento, além de melhorias na qualidade dos frutos. Ambientalmente, a gestão precisa reduz a lixiviação de nutrientes e a salinização do solo, enquanto socialmente garante a sustentabilidade da citricultura e a disponibilidade de água para outros usos.

Apesar dos avanços, desafios técnicos persistem. A interpretação de dados térmicos, por exemplo, é afetada por fatores como vento e umidade, exigindo protocolos de voo padronizados e correções atmosféricas. A calibração de modelos de demanda hídrica também precisa de validação contínua em diferentes solos e variedades, com auxílio de sensores de campo. Além disso, a integração entre drones e sistemas automatizados de irrigação carece de interoperabilidade, resolvida por meio de plataformas de apoio à decisão e treinamento técnico. Esses obstáculos ilustram a complexidade da transição para a Agricultura 4.0, que exige adaptação de tecnologias às condições locais e investimento em pesquisa colaborativa.

Os impactos econômicos, ambientais e sociais dos dois casos reforçam o potencial da Agricultura 4.0. Economicamente, a redução de insumos e o aumento da produtividade são impulsionados pela precisão na aplicação de recursos. Na soja, economias de até 70% em fungicidas e na citricultura, de 50% em água, evidenciam ganhos de eficiência. Ambientalmente, a aplicação direcionada reduz a pegada de carbono, conserva ecossistemas e preserva recursos hídricos, alinhando-se aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ONU, 2015). Socialmente, a diminuição da exposição a agroquímicos melhora a saúde dos trabalhadores, enquanto a demanda por mão de obra qualificada cria oportunidades técnicas, embora exija políticas de capacitação.

Desafios recorrentes, no entanto, permeiam a adoção dessas tecnologias. O custo elevado de drones avançados e softwares especializados limita o acesso, especialmente de pequenos produtores, exacerbando desigualdades no setor agrícola. A falta de profissionais qualificados para operar e interpretar dados de IA e sensores cria gargalos na implementação, enquanto a infraestrutura rural deficiente, como conectividade e energia, dificulta o uso de soluções digitais em áreas remotas. Regulamentações em constante evolução e a falta de padrões de interoperabilidade entre plataformas também complicam a integração de sistemas, exigindo políticas públicas que incentivem a padronização e a inovação local.

Para superar esses obstáculos, estratégias multifacetadas foram adotadas. Investimentos em pesquisa e desenvolvimento (P&D) visam criar drones multifuncionais e sensores acessíveis, adaptados às condições brasileiras, com IA treinada para variabilidade regional. Políticas públicas, como linhas de crédito e subsídios, buscam democratizar o acesso à tecnologia, enquanto parcerias entre universidades, startups e associações de produtores promovem validação em campo e difusão. Programas de capacitação técnica e extensão rural digital visam formar operadores e analistas, e a expansão da conectividade rural (5G, redes LoRaWAN) é priorizada para viabilizar o processamento de dados em tempo real. Essas iniciativas são complementadas pelo desenvolvimento de plataformas de apoio à decisão e modelos de negócios inclusivos, como o FaaS, que oferecem serviços sob demanda.

Assim, a discussão dos resultados revela que os casos analisados se alinham aos princípios da Agricultura 4.0, integrando digitalização,

automação e gestão baseada em dados. A capacidade de coletar e processar informações em alta resolução espacial e temporal permite decisões informadas, otimizando recursos e mitigando riscos. No entanto, a transição para uma agricultura digitalizada enfrenta barreiras estruturais, como desigualdade no acesso à tecnologia e infraestrutura deficiente em áreas rurais. A dependência de algoritmos e plataformas estrangeiras também levanta questões de soberania tecnológica e governança de dados, exigindo políticas que promovam inovação local e proteção das informações dos agricultores. Além disso, a resistência cultural de produtores conservadores demanda esforços de educação e demonstração de resultados práticos para acelerar a adoção.

Em síntese, a integração de drones e IA na agricultura brasileira demonstra potencial para revolucionar a produtividade e a sustentabilidade. No entanto, sua ampla adoção depende de soluções coordenadas envolvendo tecnologia, política pública e capacitação humana. Investir nessa transição é essencial para consolidar o Brasil como líder global em agricultura sustentável, resiliente às mudanças climáticas e alinhada aos princípios do desenvolvimento socioeconômico e ambiental. A colaboração entre academia, setor privado, governo e sociedade civil será crucial para superar desafios técnicos, econômicos e éticos, garantindo que os benefícios da Agricultura 4.0 sejam amplamente distribuídos, inclusive na agricultura familiar, que desempenha papel vital na segurança alimentar e no desenvolvimento rural.

Perspectivas futuras indicam que a replicação das experiências bem-sucedidas exigirá adaptação a realidades locais, fortalecimento das redes de assistência técnica e políticas públicas inclusivas. Estudos longitudinais quantificando impactos em diferentes culturas e regiões, modelos de negócio como cooperativas de drones e investigações sobre transformações sociais da automação são prioridades.

Ademais, métricas de sustentabilidade adaptadas ao contexto brasileiro e pesquisas sobre ética e governança de dados serão fundamentais para garantir inovação responsável. Ao equilibrar avanços tecnológicos com justiça social e proteção ambiental, o Brasil pode pavimentar um caminho único na era da Agricultura 4.0, consolidando-se como referência em práticas agrícolas eficientes e sustentáveis.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A aplicação de drones e Inteligência Artificial (IA) na agricultura brasileira revela um potencial transformador para a sustentabilidade e eficiência do setor agrícola. Estudos de caso, como a detecção precoce de doenças na soja e o manejo de precisão da irrigação na citricultura, demonstram impactos econômicos significativos, com redução de 20% a 70% no uso de insumos (fungicidas e água), além de benefícios ambientais, como conservação de recursos hídricos e mitigação da pegada de carbono (FAO, 2023).

Tecnologias como sensores multiespectrais, algoritmos de Deep Learning e sistemas de geoprocessamento permitem monitoramento em alta resolução espacial e temporal, identificando problemas antes da percepção humana e intervindo de forma localizada. Essas inovações, respaldadas por pesquisas da Embrapa, universidades e tendências do mercado (Times Brasil, 2025), consolidam-se como pilares da Agricultura 4.0, alinhadas aos princípios de precisão, rentabilidade e responsabilidade socioambiental.

No entanto, a ampla adoção enfrenta desafios estruturais e técnicos. O alto custo de equipamentos e softwares limita o acesso de pequenos e médios produtores, enquanto a falta de mão de obra qualificada para operar e interpretar dados tecnológicos cria gargalos na implementação. Infraestrutura rural deficiente, como conectividade e energia, e questões regulatórias em constante evolução também obstaculizam a escalabilidade. Além disso, a dependência de tecnologias e algoritmos desenvolvidos por corporações estrangeiras levanta preocupações sobre soberania tecnológica e governança de dados, exigindo políticas que promovam inovação local e proteção das informações dos agricultores (Borelli; Senise, 2024). Parcerias entre academia, setor privado e governo são essenciais para superar essas barreiras, adaptando soluções às condições brasileiras e fortalecendo ecossistemas de inovação.

Para consolidar a Agricultura 4.0 no Brasil de forma inclusiva e sustentável, é necessário ampliar pesquisas longitudinais que quantifiquem impactos em diferentes culturas e regiões, além de explorar modelos de negócio acessíveis, como cooperativas de drones e plataformas de Agricultura como Serviço (FaaS), que democratizem o acesso. Investigações

sobre transformações no mercado de trabalho rural, novas competências exigidas e políticas de transição justa são urgentes, assim como métricas para avaliar a sustentabilidade multidimensional dessas tecnologias. Por fim, estudos éticos e jurídicos sobre governança de dados e segurança digital devem guiar a inovação, garantindo que os benefícios da Agricultura 4.0 sejam amplamente distribuídos, fortalecendo não apenas grandes produtores, mas também a agricultura familiar e o desenvolvimento rural sustentável (Rose; Chilvers, 2018; Fernandes *et al.*, 2024).

REFERÊNCIAS

- BARDIN, L. **Análise de conteúdo**. São Paulo: Edições 70, 2016.
- BORELLI, E.; SENISE, D. D. Agricultura Digital, Geopolítica de Dados e Desenvolvimento Rural: uma análise a partir do Brasil. **Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais**, v. 26, p. e202402, 2024.
- CHERUBIN, M. R. *et al.* Precision Agriculture in Brazil: The Trajectory of 25 Years of Scientific Research. **Agriculture**, v. 12, n. 11, p. 1882, 2022.
- COELHO FILHO, M. A.; ANDRADE JÚNIOR, A. S. de; FOLEGATTI, M. V.; FRIGO, E. P. Manejo de irrigação em citros com uso de imagens termais obtidas por VANT. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA - CONBEA, 49., 2020, Campinas. **Anais [...]**. Campinas: SBEA, 2020.
- CONAB. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos**. Brasília, DF: Conab. Publicações mensais.
- COULDRY, N.; MEJIAS, U. A. **The Costs of Connection: How Data is Colonizing Human Life and Appropriating It for Capitalism**. Stanford: Stanford University Press, 2019.
- EASTWOOD, C. *et al.* Data Ethics and a FATE-ful Agetechnology Future. In: **Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems**. ACM, 2019.
- ELKINGTON, J. **Cannibals with Forks: The Triple Bottom Line of 21st Century Business**. Oxford: Capstone Publishing, 1997.
- EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Inteligência Artificial na Agricultura**. Embrapa Informática Agropecuária, 2021.
- EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Visão 2030: o futuro da agricultura brasileira**. Brasília, DF: Embrapa, 2018.
- FAO. FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **The State of Food and Agriculture 2023: Revealing the true cost of food to transform agrifood systems**. Rome: FAO, 2023.
- FERNANDES, G. B.; ROCHA, L. C. S.; POSSAMAI, A. J. Indústria 4.0 e o futuro do trabalho no setor agropecuário brasileiro. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 62, n. 1, p. e260014, 2024.
- FRANCO, A.; MALHOTRA, N.; SIMONOVITS, G. Publication bias in the social sciences: Unlocking the file drawer. **Science**, v. 345, n. 6203, p. 1502-1505, 2014.
- GEBBERS, R.; ADAMCHUK, V. I. Precision agriculture and food security. **Science**, v. 327, n. 5967, p. 828-831, 2010.

- GILES, D. K.; BILLING, R. C. Deployment and performance of a UAV for crop spraying. **Transactions of the ASABE**, v. 58, n. 4, p. 957-963, 2015.
- GODOY, C. V. *et al.* Asian soybean rust in Brazil: past, present, and future. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 5, p. 407-421, 2016.
- IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Agropecuário 2017: Resultados Definitivos**. Rio de Janeiro: IBGE, 2019.
- IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola (LSPA)**. Rio de Janeiro: IBGE. Publicações mensais. Disponível em: www.ibge.gov.br. Acesso em: 07 maio 2025.
- JORGE, L. A. C. *et al.* Artificial Intelligence and Deep Learning in Precision and Digital Agriculture in Brazil: Advances and Perspectives. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 44, (e20230079spe), 2024.
- KAMILARIS, A.; PRENAFETA-BOLDÚ, F. X. Deep learning in agriculture: A survey. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 147, p. 70-90, 2018.
- KLERKX, L.; JAKKU, E.; LABARTHE, P. 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, p. 100315, 2019.
- LIAKOS, K. G. *et al.* Machine learning in agriculture: A review. **Sensors**, v. 18, n. 8, p. 2674, 2018.
- MAHLEIN, A.-K. Plant disease detection by imaging sensors – parallels and specific demands for precision agriculture and plant phenotyping. **Plant Pathology**, v. 65, n. 1, p. 241-251, 2016.
- MATESE, A. *et al.* Intercomparison of UAV, aircraft and satellite remote sensing platforms for precision viticulture. **Remote Sensing**, v. 7, n. 3, p. 2971-2990, 2015.
- MISHRA, A. R.; GUPTA, R.; JOSHI, R.; DUTTA, M. K. Detection of Asian soybean rust using UAV-based multispectral imagery and machine learning. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 23, p. 100580, 2021.
- MOGILI, U. R.; DEEPAK, B. B. V. L. Review on application of drone systems in precision agriculture. **Procedia Computer Science**, v. 133, p. 502-509, 2018.
- MOLIN, J. P. Agricultura de Precisão no Brasil: conceitos e evolução. In: BORÉM, A.; ROCHA, M. M. (org.). **Agricultura de Precisão**. Viçosa, MG: UFV, 2017.
- MOLIN, J. P.; AMARAL, L. R. do; COUTINHO, H. L. C. (org.). **Agricultura de Precisão**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.
- ONU. ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**. Nova York: ONU, 2015.
- PRETTY, J. Agricultural sustainability: concepts, principles and evidence. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 363, n. 1491, p. 447-465, 2008.
- PURI, V.; NAYYAR, A.; RAJA, L. Agriculture drones: A modern boon for farmers. **Journal of Statistics and Management Systems**, v. 20, n. 4, p. 517-524, 2017.
- ROSE, D. C.; CHILVERS, J. Agriculture 4.0: Broadening responsible innovation in an era of smart farming. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 2, p. 8, 2018.
- RUSSELL, S. J.; NORVIG, P. **Artificial Intelligence: A Modern Approach**. 4. ed. Hoboken, NJ: Pearson, 2020.
- RYAN, M. **In AI We Trust: Power, Illusion and Control of Predictive Algorithms**. Cambridge, MA: MIT Press, 2020.

- SANTOS, L. N. dos; FIETZ, C. R.; SALVIANO, A. M. Uso de VANT para estimativa da necessidade hídrica em pomares de citros. **Irriga**, Botucatu, v. 28, n. 1, p. 1-15, 2023.
- SCHWAB, K. **The Fourth Industrial Revolution**. Geneva: World Economic Forum, 2016.
- SINDAG. SINDICATO NACIONAL DAS EMPRESAS DE AVIAÇÃO AGRÍCOLA. **Mercado Brasileiro de Drones Agrícolas**.
- TILMAN, D. *et al.* Agricultural sustainability and intensive production practices. **Nature**, v. 418, n. 6898, p. 671-677, 2002.
- TIMES BRASIL. Na Agrishow 2025, drones e IA oferecem soluções versáteis e eficiência no campo. **Times Brasil**, Agro, 2 maio 2025. Disponível em: <https://timesbrasil.com.br/empresas-e-negocios/agro/na-agrishow-2025-drones-e-ia-oferecem-solucoes-versateis-e-eficiencia-no-campo/>. Acesso em: 07 maio 2025.
- TSOUROS, D. C.; BIBI, S.; SARIGLANNIDIS, P. G. A review on UAV-based applications for precision agriculture. **Information**, v. 10, n. 11, p. 349, 2019.
- VIOLA, E.; MENDES, C. A. Agricultura 4.0 e Mudanças Climáticas no Brasil: Desafios e Oportunidades para uma Transição para a Sustentabilidade. **Ambiente & Sociedade**, v. 25, p. e00151, 2022.
- YAQOT, M.; MENEZES, B. C. Unmanned aerial vehicle (UAV) in precision agriculture: Business information technology towards farming as a service. In: 2021 INTERNATIONAL CONFERENCE ON INFORMATION TECHNOLOGY (ICIT). IEEE, 2021.
- YIN, R. K. **Case study research and applications: Design and methods**. 6. ed. Thousand Oaks, CA: Sage publications, 2018.
- ZHANG, J. *et al.* Detection of soybean diseases using UAV hyperspectral images and machine learning. **Remote Sensing**, v. 14, n. 1, p. 123, 2022.
- ZHANG, N.; WANG, M.; WANG, N. Precision agriculture—a worldwide overview. **Computers and electronics in agriculture**, v. 36, n. 2-3, p. 113-132, 2002.