

**AGRICULTURA DIGITAL E A SUSTENTABILIDADE NO
CAMPO: *STATUS* ATUAL E TENDÊNCIAS**

**DIGITAL AGRICULTURE AND SUSTAINABILITY IN THE
FIELD: CURRENT STATUS AND TRENDS**

DOI: <https://doi.org/10.31692/2764-3425/v4i1.418>

¹ AFONSO HENRIQUE DA SILVA JÚNIOR

Doutor em Engenharia Química, UFSC, afonso.silva@posgrad.ufsc.br

² TARCÍSIO WOLFF LEAL

Doutor em Engenharia Química, UFSC, tarcisio.leal@ufpr.br

³ JÚLIA DE OLIVEIRA MARTINS MÜLLER

Doutoranda em Engenharia Química, UFSC, julia.omm@posgrad.ufsc.br

⁴ CARLOS RAFAEL SILVA DE OLIVEIRA

Doutor em Engenharia Química, UFSC, carlos.oliveira@ufsc.br

⁵ PATRÍCIA VIERA DE OLIVEIRA

Doutora em Engenharia Química, UFSC, p.v.oliveira@posgrad.ufsc.br

RESUMO

A produção sustentável de alimentos e a digitalização do campo estão cada vez mais interligadas, no qual a tecnologia vem desempenhando um papel importante na busca por sistemas agrícolas mais eficientes e ambientalmente responsáveis. A produção sustentável de alimentos se refere a práticas agrícolas que minimizam os impactos negativos ao meio ambiente, promovem o equilíbrio e a manutenção do solo e preservam os recursos naturais. Neste sentido, a digitalização do campo desempenha um papel crucial. Nos últimos anos, a aplicação de tecnologias avançadas no campo está se tornando recorrente, por exemplo, o uso de drones e de sensores. A presença de tecnologia avançada na lavoura vem possibilitando a coleta de dados mais precisa e em tempo real sobre o solo, as plantas, as condições climáticas e outras variáveis relevantes. Essas informações possibilitam ao agricultor uma tomada de decisão mais assertiva e estratégica em relação ao manejo das culturas. Diante desse cenário, o objetivo deste trabalho de revisão foi abordar a relação entre a produção sustentável de alimentos e a transformação digital no campo, discutindo os benefícios, os desafios, as tendências e os exemplos de tecnologias inovadoras que estão revolucionando o campo. Além disso, pesquisas relevantes dos últimos anos sobre a produção sustentável de alimentos e a aplicação de tecnologias na agricultura foram apresentadas. Para o desenvolvimento deste artigo de revisão foram realizadas buscas nas principais bases científicas utilizando inúmeras palavras-chave (Produção Sustentável de Alimentos; Transformação Digital no Campo; Tecnologias Habilitadoras; Inteligência Artificial, *Big Data* Aplicado na Lavoura; Agricultura Sustentável; Agricultura Orgânica; Eficiência na Produção de Alimentos; Agricultura 4.0; e Agroflorestas).

Palavras-chave: Agricultura 4.0; Agricultura Sustentável; Tecnologias Habilitadoras; Segurança Alimentar; Agroecologia..

ABSTRACT

Sustainable food production and the digitalization of the field are increasingly intertwined, in which technology has been playing an essential role in the search for more efficient and environmentally responsible agricultural systems. Sustainable food production refers to agricultural practices that minimize negative environmental impacts, promote soil balance and maintenance, and preserve natural resources. In this sense, the digitization of the field plays a crucial role. In recent years, the application of advanced technologies in the field is becoming recurrent, for example, the use of drones and sensors. The presence of advanced technology in farming has enabled the collection of more accurate and real-time data on the soil, plants, weather conditions, and other relevant variables. This information enables the farmer to make a more assertive and strategic decision about

crop management. Given this scenario, the objective of this review was to address the relationship between sustainable food production and digital transformation in the field, discussing the benefits, challenges, trends, and examples of innovative technologies that are revolutionizing the field. In addition, relevant research from recent years on sustainable food production and the application of technologies in agriculture was presented. For the development of this review article, searches were carried out on the main scientific bases using numerous keywords (Sustainable Food Production; Digital Transformation in the Field; Enabling Technologies; Artificial Intelligence, *Big Data* Applied in Farming; Sustainable Agriculture; Organic Agriculture; Efficiency in Food Production; Agriculture 4.0; and Agroforestry).

Keywords: Agriculture 4.0; Sustainable Agriculture; Enabling Technologies; Food Security; Agroecology.

INTRODUÇÃO

A produção de alimentos é uma das atividades essenciais para a sobrevivência humana e desempenha um papel vital na nossa sociedade e economia. No entanto, à medida que a população mundial cresce, os recursos naturais se tornam cada vez mais escassos, surgindo a necessidade de repensar e transformar a forma como se produz alimentos (ARORA *et al.*, 2022; DE OLIVEIRA *et al.*, 2023). Nesse sentido, a produção sustentável de alimentos surge como uma resposta a esse desafio, buscando garantir a disponibilidade de alimentos de qualidade para as gerações de agora e do futuro, ao mesmo tempo em que minimiza os impactos negativos no meio ambiente (DA SILVA JÚNIOR *et al.*, 2022). Além disso, a transformação digital no campo emerge como uma poderosa ferramenta para impulsionar a sustentabilidade e a eficiência na produção de alimentos. A produção sustentável de alimentos envolve a adoção de práticas agrícolas e pecuárias que buscam equilibrar as necessidades econômicas, sociais e ambientais da agricultura, em que se baseia em princípios como a conservação dos recursos naturais, a proteção da biodiversidade, o uso de práticas agrícolas sustentáveis e a maximização da eficiência na produção. Também, a produção sustentável de alimentos visa garantir a segurança alimentar, promover a preservação do meio ambiente e proteger a saúde humana (MGOMEZULU *et al.*, 2023).

Hoje em dia, um dos principais desafios da produção sustentável de alimentos é a redução do impacto ambiental provocado pela agricultura. A agricultura convencional muitas vezes depende do uso intensivo de agroquímicos, como nutrientes e pesticidas, que podem contaminar o solo e a água, comprometendo o equilíbrio dos ecossistemas (MAI *et al.*, 2025). Além disso, práticas inadequadas de manejo do solo podem levar à erosão, a degradação da biodiversidade e a perda de nutrientes (DIWAN; RASHID; VAISHNAV, 2022). Neste sentido, a produção sustentável de alimentos busca minimizar esses impactos, adotando técnicas como a agricultura orgânica, a agroecologia e a agricultura de conservação, que promovem o uso eficiente dos recursos naturais e a proteção da biodiversidade. Outro aspecto importante da produção sustentável de alimentos é a busca pela eficiência na produção (LIU, 2023). Com o aumento da demanda global por alimentos, é essencial maximizar a produtividade agrícola sem comprometer os recursos naturais. A produção sustentável de alimentos busca utilizar tecnologias e priorizar práticas que reduzam o desperdício de água, energia e insumos. Isso inclui o uso de sistemas de irrigação eficientes, a adoção de métodos de cultivo diferenciados, a

utilização de energias renováveis na produção agrícola e de tecnologias de precisão (ZSCHEISCHLER *et al.*, 2022).

A transformação digital tem impactado profundamente diversos setores da economia, e a agricultura não é uma exceção. A transformação digital no campo refere-se à aplicação de tecnologias digitais, como a internet das coisas (IoT), a inteligência artificial, o *big data* e a automação, para otimizar os processos agrícolas, melhorar a eficiência, aumentar a produtividade e reduzir os impactos ambientais (SACHITHRA; SUBHASHINI, 2023). Um dos principais benefícios da transformação digital no campo é a coleta e a análise de dados em tempo real utilizando plataformas apropriadas. Através de IoT e da sensorização, por exemplo, é possível monitorar diversas variáveis no ambiente agrícola, como o teor de nutrientes e a umidade do solo, a temperatura, a umidade do ar e a incidência de pragas (KARAMIAN; MIRAKZADEH; AZARI, 2023). Logo, esses dados podem ser analisados por algoritmos para fornecer informações precisas sobre a situação das culturas, permitindo a tomada de decisões assertivas e ações preventivas. Ou seja, isso possibilita a redução do uso de insumos agrícolas exagerada, como pesticidas, resultando em uma produção eficiente e sustentável (VIGOROSO *et al.*, 2023).

Outra área em que a transformação digital tem desempenhado um papel fundamental é na gestão da cadeia de suprimentos agrícolas. Através do uso de tecnologias como *blockchain* é possível rastrear e monitorar todo o processo de produção, desde a origem até o consumidor final (ZHENG; ZHOU, 2023). A aplicação da tecnologia de rastreamento garante maior transparência e confiabilidade na cadeia agrícola, reduzindo o desperdício, combatendo possíveis fraudes e promovendo práticas ainda mais sustentáveis, como a produção local e a agricultura familiar. Além disso, a automação e a robótica têm ganhado espaço na agricultura moderna. Desde robôs para a colheita até drones para o monitoramento e a pulverização de lavouras. Essas tecnologias automatizadas ajudam a reduzir a dependência de trabalho manual intensivo, melhoram a eficiência e reduzem o impacto ambiental (INGRAM *et al.*, 2022). Portanto, o objetivo deste trabalho de revisão foi abordar a relação entre a produção sustentável de alimentos e a transformação digital no campo, discutindo os benefícios, os desafios, as tendências e os exemplos de tecnologias inovadoras que estão revolucionando o campo.

REFERENCIAL TEÓRICO

A agricultura de precisão é um dos principais aspectos da digitalização do campo.

O uso de tecnologias avançadas na lavoura, como sensores, drones e sistemas de mapeamento, propicia a aplicação precisa de insumos agrícolas, por exemplo, fertilizantes e agrotóxicos, reduzindo o desperdício e minimizando os impactos ambientais ocasionados (DA SILVA JÚNIOR *et al.*, 2022). A capacidade de monitoramento em tempo real das condições do solo, da água e das culturas, com o auxílio de satélites e sistemas de posicionamento global, permite uma análise detalhada do estado das plantações, promovendo intervenções mais assertivas e direcionadas. Este nível de controle e automação não apenas aumenta a produtividade, mas também favorece a sustentabilidade ao reduzir o uso excessivo de produtos químicos e a degradação do solo (KARAMIAN; MIRAKZADEH; AZARI, 2023).

Além disso, a digitalização facilita a gestão inteligente da produção agrícola, permitindo o controle automatizado de sistemas de irrigação, climatização de estufas e alimentação de animais. Isso contribui para o uso mais eficiente de recursos vitais, como a água, cuja escassez é uma das maiores preocupações globais em termos de sustentabilidade (ZSCHEISCHLER *et al.*, 2022). Tecnologias como a IoT e a IA estão sendo cada vez mais aplicadas para prever as necessidades das plantas e otimizar o uso de recursos naturais, de maneira a maximizar a produtividade sem comprometer o meio ambiente. O uso de sensores de umidade, por exemplo, pode determinar exatamente quando e quanto irrigar, evitando tanto o desperdício quanto a subutilização da água (LIU, 2023).

Outro aspecto importante da digitalização é a adoção de plataformas digitais e tecnologias de comunicação e conectividade no campo. Estas ferramentas permitem a troca rápida de informações entre agricultores, instituições de pesquisa e outras entidades, facilitando a disseminação de conhecimento e boas práticas (ZHENG; ZHOU, 2023). A utilização de *big data* na agricultura também é um componente central na tomada de decisões, oferecendo aos produtores acesso a dados climáticos, previsões de safra e análise de desempenho das culturas em tempo real. Essas inovações não só melhoram a eficiência operacional das fazendas, como também contribuem para a tomada de decisões estratégicas e mais informadas (SACHITHRA; SUBHASHINI, 2023).

A digitalização do campo desempenha, portanto, um papel crucial na promoção da produção sustentável de alimentos. Através do uso inteligente e responsável da tecnologia, é possível aumentar a eficiência, a produtividade e a sustentabilidade da agricultura, contribuindo para enfrentar os desafios globais da segurança alimentar e da preservação do meio ambiente. Além disso, a integração dessas tecnologias com políticas

públicas de incentivo à sustentabilidade pode catalisar mudanças profundas na forma como os recursos naturais são utilizados no setor agrícola, promovendo a recuperação de ecossistemas e a conservação da biodiversidade. Neste sentido, a digitalização oferece oportunidades significativas para criar sistemas agrícolas ambientalmente responsáveis, ao mesmo tempo em que atende às necessidades alimentares de uma população crescente.

METODOLOGIA

Para o desenvolvimento deste artigo de revisão foram realizadas buscas nas principais bases científicas, como ScienceDirect, Scopus, Google Scholar, Springer e Wiley Online Library. As palavras-chave utilizadas foram: produção sustentável de alimentos, transformação digital no campo, tecnologias habilitadoras, inteligência artificial, *big data* aplicado na lavoura, agricultura sustentável, agricultura orgânica, eficiência na produção de alimentos, agricultura 4.0 e agroflorestas. As buscas foram executadas em português e em inglês. Realizou-se a leitura dos títulos e dos resumos para a escolha das referências. Assim, incluíram-se as publicações que estavam dentro do escopo proposto pelo trabalho. Portanto, nessa revisão objetivou abordar a relação entre a produção sustentável de alimentos e a transformação digital no campo, discutindo as vantagens e desvantagens, lacunas e a apresentação de alguns exemplos de tecnologias inovadoras que estão revolucionando a lavoura.

PRÁTICAS AGRÍCOLAS SUSTENTÁVEIS

O rápido crescimento populacional global é um dos maiores desafios enfrentados pela humanidade. Estima-se que a população mundial alcance cerca de 10 bilhões de pessoas até 2050 (DE OLIVEIRA *et al.*, 2021). Neste sentido, a produção de alimentos precisa acompanhar esse crescimento exponencial para garantir a segurança alimentar e o bem-estar da sociedade no planeta. A relação entre o aumento populacional e a produção de alimentos é complexa e apresenta múltiplos aspectos (DA SILVA JÚNIOR *et al.*, 2022). Por um lado, o crescimento populacional impõe uma pressão adicional sobre os recursos naturais, como terra, água e energia, necessários para a produção de alimentos. Também, a urbanização resulta em perda de terras agrícolas para o desenvolvimento urbano, limitando a disponibilidade de áreas cultiváveis. Além disso, a mudança nos padrões alimentares, especialmente em países emergentes, em que a classe média está em expansão, aumenta ainda mais a demanda por alimentos, incluindo produtos de origem animal, que requerem mais recursos para serem produzidos (ZHANG; OKI, 2023).

Por outro lado, o aumento populacional também impulsiona a inovação e a melhoria da produtividade agrícola. A necessidade de produzir mais alimentos em uma área limitada impulsiona a adoção de técnicas agrícolas avançadas, como a agricultura de precisão, a biotecnologia e a agricultura vertical. Além disso, a globalização e a tecnologia têm permitido o comércio internacional de alimentos, ajudando a suprir a demanda em regiões onde a produção local não é suficiente. Diante desses desafios, a produção de alimentos precisa se adaptar e se tornar mais eficiente e sustentável (TAO *et al.*, 2023).

A produção sustentável de alimentos é uma temática de extrema importância na atualidade, pois está diretamente relacionada à preservação do meio ambiente, à segurança alimentar e ao bem-estar da atual e futuras gerações. Com a crescente demanda global por alimentos devido ao aumento populacional, a necessidade de adotar práticas agrícolas sustentáveis se tornou crucial para garantir a disponibilidade de alimentos nutritivos e de qualidade, ao mesmo tempo em que minimiza os impactos negativos no ecossistema (DE OLIVEIRA *et al.*, 2021). No presente tópico foi discutido os princípios da produção sustentável de alimentos, destacando as vantagens e os desafios, além de apresentar algumas soluções inovadoras que estão promovendo avanços no campo. A produção sustentável de alimentos se baseia em princípios fundamentais que visam equilibrar as necessidades econômicas, sociais e ambientais da agricultura (HAMEED *et al.*, 2023). Os aspectos mais relevantes incluem:

- I. A produção sustentável busca utilizar os recursos naturais de forma consciente e responsável, evitando o esgotamento dos solos, a contaminação da água e a degradação dos ecossistemas (KARAMIAN; MIRAKZADEH; AZARI, 2023). Ou seja, isso envolve inúmeras práticas como o manejo adequado do solo, o uso eficiente da água e a proteção da biodiversidade;
- II. A biodiversidade é essencial para o equilíbrio dos ecossistemas e a adaptação das espécies às mudanças ambientais (BOIX-FAYOS; DE VENTE, 2023). Na produção sustentável de alimentos, é importante proteger e promover a biodiversidade, seja por meio da conservação de ambientes naturais ou da utilização de métodos de cultivo que favoreçam a diversidade de espécies;
- III. Técnicas como a agricultura orgânica, a agroecologia e a agricultura de conservação, que buscam reduzir o uso de produtos químicos sintéticos, promover a fertilidade do solo, conservar a água e proteger a saúde dos agricultores e consumidores (HAMEED *et al.*, 2023); e

IV. A produção sustentável de alimentos objetiva maximizar a eficiência na utilização dos recursos, produzindo mais alimentos com menor consumo de água, energia e insumos. Conseqüentemente, isso envolve o uso de tecnologias modernas, como sistemas de irrigação eficientes, monitoramento remoto de cultivos e o uso de energias renováveis na produção agrícola (DA SILVA JÚNIOR *et al.*, 2022). Portanto, a busca pela eficiência na produção de alimentos tem como finalidade utilizar os recursos disponíveis de maneira inteligente e otimizada, adotando técnicas agrícolas avançadas, como a agricultura de precisão, que utiliza sensores e tecnologia de monitoramento para fornecer informações precisas sobre as condições do solo, a umidade e a incidência de pragas (LAGO-OLVEIRA *et al.*, 2023). Assim, com essas informações os agricultores podem tomar decisões “mais inteligentes” sobre o momento certo de plantar, irrigar, fertilizar e colher, evitando desperdícios e maximizando a produtividade.

A produção sustentável de alimentos traz uma série de vantagens tanto para a natureza quanto para a sociedade como um todo, ou seja, a eficiência na produção de alimentos e a sustentabilidade são dois aspectos interligados e essenciais para garantir a segurança alimentar no contexto de um mundo em constante crescimento populacional e com recursos limitados. A eficiência na produção se refere à capacidade de obter o máximo rendimento possível dos recursos disponíveis, como terra e água, minimizando o desperdício e maximizando a produtividade (DA SILVA JÚNIOR *et al.*, 2022). A sustentabilidade, por sua vez, busca garantir que a produção de alimentos seja ambientalmente responsável, socialmente justa e economicamente viável, atendendo às necessidades presentes sem comprometer as gerações futuras (ARORA *et al.*, 2022). Além disso, a eficiência na produção de alimentos está relacionada ao uso de variedades de culturas mais produtivas e resistentes a doenças, à utilização de técnicas de cultivo adequadas, como a rotação de culturas e a integração de sistemas, e ao desenvolvimento de sistemas de irrigação e manejo de água eficientes. A modernização dos sistemas de produção, a mecanização e a automação também podem contribuir para aumentar a eficiência na produção agrícola, reduzindo o trabalho manual intensivo e otimizando os processos (BOIX-FAYOS; DE VENTE, 2023). Assim, a produção sustentável de alimentos interligada com a digitalização do campo pode promover algumas vantagens no segmento, como:

- I. A adoção de práticas agrícolas sustentáveis como, por exemplo, a rotação de culturas e o manejo integrado de pragas, na qual é possível preservar a qualidade do solo, evitar a erosão e reduzir a necessidade de fertilizantes químicos (TAO *et al.*, 2023). A aplicação dessas práticas contribui para a conservação dos recursos naturais a longo prazo;
- II. A manutenção da biodiversidade ao preservar ambientes naturais utilizando variedades de culturas locais e promovendo a integração entre agricultura e natureza (Ex.: Agroflorestas) (DE OLIVEIRA *et al.*, 2021), logo, contribuindo para a conservação de espécies vegetais e animais e para a manutenção dos ecossistemas;
- III. A garantia ao acesso a alimentos nutritivos e de qualidade para a população. Ao adotar essas práticas, é possível aumentar a produtividade agrícola, diversificar a produção e reduzir os impactos negativos na saúde humana, como o uso excessivo de pesticidas ou outros insumos (FU *et al.*, 2022); e
- IV. A resiliência dos sistemas agrícolas às mudanças climáticas, ao favorecer práticas que aumentam a capacidade de adaptação das culturas e reduzem a vulnerabilidade aos eventos extremos, como secas e enchentes (ARORA *et al.*, 2022).

A necessidade de encontrar alternativas de aumentar a produção de alimentos de forma sustentável, protegendo os recursos naturais, preservando a biodiversidade e reduzindo os impactos ambientais é cada vez mais indispensável (BOIX-FAYOS; DE VENTE, 2023; LAGO-OLIVEIRA *et al.*, 2023). No entanto, isso requer o uso de práticas agrícolas inovadoras, o desenvolvimento de variedades de culturas mais resistentes e adaptáveis, o investimento em infraestrutura agrícola e a promoção de sistemas alimentares equitativos e inclusivos (LAGO-OLIVEIRA *et al.*, 2023). Diante disso, o aumento populacional coloca uma pressão significativa sobre a produção de alimentos, exigindo abordagens inovadoras e sustentáveis para garantir a segurança alimentar global. O equilíbrio entre o aumento da produção de alimentos e a preservação dos recursos naturais é essencial para enfrentar os desafios e construir um futuro em que todos tenham acesso a alimentos nutritivos e suficientes. Embora a produção sustentável de alimentos ofereça inúmeras vantagens, também enfrenta desafios significativos (DE OLIVEIRA *et al.*, 2021). Alguns dos desafios mais relevantes incluem:

- I. A transição para práticas agrícolas sustentáveis que muitas vezes requer mudanças significativas nos métodos de produção e no pensamento dos agricultores. A resistência à adoção de novas tecnologias e práticas pode dificultar a ampliação da produção sustentável de alimentos;
- II. A necessidade dos agricultores em ter acesso a recursos e tecnologias apropriadas, como sementes adaptadas, fertilizantes e sistemas de irrigação eficientes. Em muitas regiões, especialmente em países emergentes, o acesso a essas ferramentas ainda é muito limitado;
- III. A viabilidade em que a metodologia seja economicamente viável para os agricultores. No entanto, muitas vezes, a transição para práticas sustentáveis necessita de investimentos significativos, o que pode ser um obstáculo para os produtores de pequeno e médio porte; e
- IV. A promoção da produção sustentável de alimentos, a qual requer conscientização e educação tanto dos agricultores quanto dos consumidores. É necessário fornecer informações sobre os benefícios das práticas sustentáveis e incentivar a demanda por alimentos produzidos de forma responsável.

Apesar de haver inúmeros aspectos para superar, já existem muitas soluções inovadoras que estão impulsionando a produção sustentável de alimentos ao redor do mundo. Entretanto, atingir a sustentabilidade na lavoura ainda é considerado desafiador. A sustentabilidade na produção de alimentos visa minimizar os impactos ambientais negativos, promover a equidade social e garantir a viabilidade econômica dos sistemas de produção. Ou seja, isso envolve a conservação dos recursos naturais, como o solo, a redução da emissão de gases de efeito estufa, a promoção do bem-estar animal e a proteção dos direitos dos trabalhadores rurais (BEHROOZEH; HAYATI; KARAMI, 2022). Ademais, a sustentabilidade está relacionada à promoção de sistemas alimentares inclusivos, que valorizem a agricultura familiar, incentivem a produção local e reduzam as desigualdades no acesso aos alimentos.

A interconexão entre a eficiência na produção de alimentos e a sustentabilidade é essencial para enfrentar os desafios globais, como a escassez de recursos naturais, a degradação ambiental e as mudanças climáticas. A produção de alimentos deve ser capaz de atender às demandas crescentes da população mundial, sem comprometer a capacidade dos ecossistemas de se regenerarem e de fornecer serviços ambientais vitais (FU *et al.*, 2022). Nesse sentido, a adoção de práticas agrícolas sustentáveis, a promoção da

agricultura orgânica e agroecológica, a redução do desperdício de alimentos e a implementação de políticas e incentivos adequados são fundamentais para garantir a segurança alimentar e a preservação do planeta (INGRAM; MAYE, 2023). Assim, a eficiência na produção de alimentos e a sustentabilidade são elementos interligados e indispensáveis para enfrentar os desafios da produção de alimentos em um mundo em crescimento populacional e com recursos limitados. Ao adotar práticas agrícolas eficientes e sustentáveis, pode-se garantir a disponibilidade de alimentos, minimizando os impactos ambientais negativos e promovendo sistemas alimentares mais resilientes. Atualmente, há diversas soluções interessantes usadas para promover a produção sustentável de alimentos, como:

- I. O uso de tecnologias avançadas, por exemplo, drones, sensores e análise de dados, para monitorar e gerenciar os cultivos de forma mais eficiente, permitindo a aplicação precisa de insumos (Ex.: fertilizantes e pesticidas). Ou seja, reduzindo o desperdício e minimizando os impactos ambientais;
- II. A implementação das agroflorestas, as quais combinam árvores, culturas agrícolas e criação de animais em um sistema integrado, promovendo a diversidade de espécies e a recuperação de áreas degradadas. Já os sistemas agroecológicos buscam imitar os processos naturais, promovendo a saúde do solo, a conservação de água e a biodiversidade;
- III. A agricultura urbana, a qual está ganhando popularidade nas cidades, em que cada vez mais as pessoas estão cultivando alimentos em pequenos espaços, como telhados, varandas e jardins verticais. A implementação da agricultura urbana pode promover inúmeros benefícios, por exemplo, a redução da distância entre a produção e o consumo, a promoção da segurança alimentar local e a redução das emissões de carbono relacionadas ao transporte de alimentos; e
- IV. A aquaponia, a qual combina a criação de peixes com o cultivo de plantas em um sistema simbiótico. Os resíduos dos peixes podem ser utilizados como fertilizantes para as plantas, que, por sua vez, filtram a água, criando um sistema altamente eficiente e sustentável.

A produção sustentável de alimentos é fundamental para garantir um futuro equilibrado e sustentável para o planeta. Ao adotar princípios e práticas sustentáveis, pode-se preservar os recursos naturais, proteger a biodiversidade, promover a segurança

alimentar e enfrentar os desafios das mudanças climáticas (MAPELLI *et al.*, 2023). Portanto, com soluções inovadoras e o engajamento de todos, por exemplo, agricultores, consumidores e instituições públicas, pode-se transformar a maneira como se produz alimentos, criando um sistema agrícola mais sustentável e resiliente. Neste sentido, realizar escolhas conscientes de alimentos e apoiar iniciativas que promovam a produção sustentável de alimentos podem ser alternativas eficazes rumo à sustentabilidade no campo.

AGRICULTURA DIGITAL

A transformação digital no campo está revolucionando a forma como a agricultura é conduzida, impulsionando a eficiência, a produtividade e a sustentabilidade na produção de alimentos. Com o avanço das tecnologias digitais, como a IoT, a inteligência artificial e o *big data*, os agricultores têm acesso a uma variedade de ferramentas e recursos que podem auxiliar no gerenciamento das operações agrícolas, na tomada de decisões e na otimização dos recursos disponíveis (PORCIELLO *et al.*, 2022). A transformação no campo está permitindo uma agricultura cada vez mais inteligente, precisa e conectada, com benefícios significativos para os agricultores, os consumidores e a natureza. Na era digital, o campo está se tornando um ambiente em que a inovação tecnológica se une à tradição agrícola, resultando em um setor mais moderno e sustentável. Apesar dos benefícios evidentes da transformação digital no campo para a produção sustentável de alimentos, há ainda desafios que precisam ser considerados e superados (JIANG; ZHOU; QIU, 2022).

O acesso e a inclusão digital no campo, por exemplo, é um desafio significativo. Em muitas regiões, especialmente em países emergentes, a conectividade de internet é limitada ou inexistente, dificultando a adoção e o uso efetivo das tecnologias digitais. Além disso, muitos agricultores podem não ter acesso a dispositivos digitais ou conhecimento suficiente para utilizar as tecnologias disponíveis. Logo, é essencial garantir o acesso e a capacitação dos agricultores para que possam se beneficiar da transformação digital no campo (ABATE *et al.*, 2023). Um outro desafio está relacionado à privacidade e segurança dos dados. A coleta e o armazenamento de grandes volumes de dados agrícolas levantam questionamentos sobre a propriedade, o controle e a proteção das informações obtidas. Ou seja, a necessidade de estabelecer políticas e regulamentações adequadas a fim de garantir a privacidade dos agricultores e evitar o mau uso dos dados está cada vez mais imprescindível.

Além disso, é importante garantir que a transformação digital no campo seja acessível. Isso significa que as tecnologias digitais devem ser inclusivas e adaptadas às necessidades dos agricultores de diferentes contextos, incluindo pequenos produtores e comunidades rurais (TAO *et al.*, 2023). Também, é necessário considerar os impactos ambientais das tecnologias digitais, por exemplo, o consumo de energia e a geração de resíduos eletrônicos, e buscar alternativas que possam minimizar os impactos ao planeta. Atualmente, existem diversas tecnologias digitais que estão sendo aplicadas com sucesso na produção sustentável de alimentos (PURCELL; NEUBAUER, 2023). Alguns exemplos incluem:

- I. A agricultura de precisão utiliza sensores, drones e análise de dados para monitorar e gerenciar os cultivos de forma precisa, possibilitando a aplicação adequada de insumos em geral, reduzindo o desperdício e aumentando a eficiência (PORCIELLO *et al.*, 2022);
- II. Os sistemas de irrigação inteligentes utilizam sensores de umidade do solo e algoritmos para fornecer água à lavoura na quantidade necessária. Ou seja, evitando o uso excessivo de água e reduzindo os custos de irrigação;
- III. O uso de armadilhas inteligentes de insetos, câmeras e algoritmos preditivos, no qual é possível monitorar a presença de pragas e doenças nas lavouras. O monitoramento contínuo de pragas e doenças utilizando a tecnologia permite uma detecção precoce, conseqüentemente, uma resposta rápida, reduzindo a necessidade de agroquímicos e protegendo a saúde das plantas (ARORA *et al.*, 2022);
- IV. A agricultura vertical, a qual utiliza técnicas de cultivo em ambientes controlados, por exemplo, estufas e ambientes fechados. Também, sensores, iluminação LED e sistemas de automação podem ser utilizados para a otimização das condições de crescimento das plantas, reduzindo o consumo de recursos e aumentando a produtividade; e
- V. A tecnologia *blockchain*, a qual tem sido bastante utilizada para rastrear e verificar toda a cadeia de suprimentos agrícolas, garantindo a transparência, a rastreabilidade e a autenticidade dos produtos (ZHENG; ZHOU, 2023). Portanto, isso ajuda a combater possíveis fraudes, garantir a qualidade dos alimentos e a promoção de práticas sustentáveis.

De um modo geral, a presença de tecnologias no campo tem se tornado cada vez mais relevante e transformado significativamente a forma como a agricultura é conduzida. As tecnologias têm desempenhado um papel importante na busca por maior eficiência, produtividade e sustentabilidade na produção de alimentos. Desde as técnicas tradicionais até as mais avançadas, as inovações tecnológicas têm o potencial de impulsionar o setor agrícola e enfrentar os desafios complexos presentes no campo (PENG *et al.*, 2022). Uma outra área que está revolucionando a agricultura é a biotecnologia. A biotecnologia envolve a modificação genética de plantas e animais para melhorar as características, como resistência a pragas, tolerância a condições ambientais adversas e aumento do valor nutricional (ARORA *et al.*, 2022). A biotecnologia agrícola tem o potencial, por exemplo, de aumentar a produtividade, de reduzir o uso de defensivos agrícolas e de melhorar a qualidade dos alimentos. Portanto, a presença de tecnologias no campo está impulsionando uma transformação significativa na agricultura, tornando-a mais inteligente, eficiente e sustentável. Embora as tecnologias ofereçam uma série de benefícios, é importante que sejam adotadas de forma consciente e responsável. Além disso, a capacitação dos agricultores para utilizar as tecnologias de maneira adequada, a disponibilidade de acesso e a consideração dos impactos sociais, econômicos e ambientais são elementos fundamentais para garantir que a transformação digital no campo contribua para um futuro agrícola mais próspero e sustentável.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A produção sustentável de alimentos e a transformação digital no campo são duas áreas interligadas que desempenham um papel importante na construção de um sistema alimentar mais sustentável e eficiente. A transformação digital permite que um conjunto de tecnologias e abordagens inovadoras possam impulsionar a sustentabilidade na agricultura, melhorando a eficiência, reduzindo o desperdício e minimizando os impactos ambientais. No entanto, é importante garantir que as tecnologias sejam acessíveis, inclusivas e sustentáveis, e que os desafios relacionados à conectividade, privacidade e segurança dos dados sejam abordados de forma adequada. Ao unir a produção sustentável de alimentos e a transformação digital no campo, pode-se criar um futuro em que a agricultura seja cada vez mais capaz de alimentar a crescente população mundial de maneira sustentável, preservando os recursos naturais e protegendo o meio ambiente. As tendências emergentes na agricultura incluem o uso de tecnologias avançadas, como drones e sensores inteligentes, para otimizar o uso de insumos e tomar decisões baseadas

em dados em tempo real. Organismos geneticamente modificados e novos revestimentos de sementes aumentam a produtividade em áreas menores. A agricultura regenerativa visa restaurar ecossistemas e melhorar a saúde do solo, enquanto a agricultura sustentável e orgânica reduz o uso de agroquímicos.

REFERÊNCIAS

ABATE, G. T.; ABAY, K. A.; CHAMBERLIN, J.; KASSIM, Y.; SPIELMAN, D. J.; PAUL JR TABE-OJONG, M. Digital tools and agricultural market transformation in Africa: Why are they not at scale yet, and what will it take to get there? **Food Policy**, v. 116, n. March, p. 102439, abr. 2023.

ARORA, S.; MURMU, G.; MUKHERJEE, K.; SAHA, S.; MAITY, D. A comprehensive overview of nanotechnology in sustainable agriculture. **Journal of Biotechnology**, v. 355, n. March, p. 21–41, ago. 2022.

BEHROOZEH, S.; HAYATI, D.; KARAMI, E. Determining and validating criteria to measure energy consumption sustainability in agricultural greenhouses. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 185, n. September, p. 122077, dez. 2022.

BOIX-FAYOS, C.; DE VENETE, J. Challenges and potential pathways towards sustainable agriculture within the European Green Deal. **Agricultural Systems**, v. 207, n. December 2022, p. 103634, abr. 2023.

DA SILVA JÚNIOR, A. H.; MULINARI, J.; DE OLIVEIRA, P. V.; DE OLIVEIRA, C. R. S.; REICHERT JÚNIOR, F. W. Impacts of metallic nanoparticles application on the agricultural soils microbiota. **Journal of Hazardous Materials Advances**, v. 7, n. April, p. 100103, ago. 2022.

DE OLIVEIRA, C. R. S.; DA SILVA JÚNIOR, A. H.; MULINARI, J.; FERREIRA, A. J. S.; DA SILVA, A. Fibrous microplastics released from textiles: Occurrence, fate, and remediation strategies. **Journal of Contaminant Hydrology**, v. 256, n. February, p. 104169, maio 2023.

DE OLIVEIRA, C. R. S.; DA SILVA JÚNIOR, A. H.; MULINARI, J.; IMMICH, A. P. S. Textile Re-Engineering: Eco-responsible solutions for a more sustainable industry. **Sustainable Production and Consumption**, v. 28, p. 1232–1248, out. 2021.

DIWAN, D.; RASHID, M. M.; VAISHNAV, A. Current understanding of plant-microbe interaction through the lenses of multi-omics approaches and their benefits in sustainable agriculture. **Microbiological Research**, v. 265, n. September, p. 127180, dez. 2022.

FU, X.; ZHENG, Z.; SHA, Z.; CAO, H.; YUAN, Q.; YU, H.; LI, Q. Biorefining waste into nanobiotechnologies can revolutionize sustainable agriculture. **Trends in Biotechnology**, v. 40, n. 12, p. 1503–1518, dez. 2022.

HAMEED, A.; CHEN, Y.-P.; SHEN, F.-T.; LIN, S.-Y.; HUANG, H.-I.; LIN, Y.-W.; YOUNG, C.-C. Evaluation of a subtropical maize-rice rotation system maintained under long-term fertilizer inputs for sustainable intensification of agriculture. **Applied Soil Ecology**, v. 184, n. September 2022, p. 104772, abr. 2023.

INGRAM, J.; MAYE, D. “How can we?” the need to direct research in digital agriculture towards capacities. **Journal of Rural Studies**, v. 100, n. February, p. 103003, maio 2023.

INGRAM, J. et al. What are the priority research questions for digital agriculture? **Land Use Policy**, v. 114, n. July 2021, p. 105962, mar. 2022.

JIANG, S.; ZHOU, J.; QIU, S. Digital Agriculture and Urbanization: Mechanism and Empirical Research. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 180, n. April, p. 121724, jul. 2022.

KARAMIAN, F.; MIRAKZADEH, A. A.; AZARI, A. Application of multi-objective genetic algorithm for optimal combination of resources to achieve sustainable agriculture based on the water-energy-food nexus framework. **Science of The Total Environment**, v. 860, n. August 2022, p. 160419, fev. 2023.

LAGO-OLVEIRA, S.; EL-AREED, S. R. M.; MOREIRA, M. T.; GONZÁLEZ-GARCÍA, S. Improving environmental sustainability of agriculture in Egypt through a life-cycle perspective. **Science of The Total Environment**, v. 890, n. January, p. 164335, set. 2023.

LIU, S. Towards a sustainable agriculture: Achievements and challenges of Sustainable Development Goal Indicator 2.4.1. **Global Food Security**, v. 37, n. April, p. 100694, jun. 2023.

MAI, X.; TANG, J.; TANG, J.; ZHU, X.; YANG, Z.; LIU, X.; ZHUANG, X.; FENG, G.; TANG, L. Research progress on the environmental risk assessment and remediation technologies of heavy metal pollution in agricultural soil. **Journal of Environmental Sciences**, v. 149, n. March, p. 1-20, mar. 2025.

MAPELLI, F.; MENGONI, A.; RIVA, V.; BORIN, S. Bacterial culturing is crucial to boost sustainable agriculture. **Trends in Microbiology**, v. 31, n. 1, p. 1-4, jan. 2023.

MGOMEZULU, W. R.; EDRISS, A.; MACHIRA, K.; PANGAPANGA-PHIRI, I. Towards sustainability in the adoption of sustainable agricultural practices: Implications on household poverty, food and nutrition security. **Innovation and Green Development**, v. 2, n. 3, p. 100054, set. 2023.

PENG, W.; ZHENG, H.; ROBINSON, B. E.; LI, C.; LI, R. Comparing the importance of farming resource endowments and agricultural livelihood diversification for agricultural sustainability from the perspective of the food–energy–water nexus. **Journal of Cleaner Production**, v. 380, n. P2, p. 135193, dez. 2022.

PORCIELLO, J.; COGGINS, S.; MABAYA, E.; OTUNBA-PAYNE, G. Digital agriculture services in low- and middle-income countries: A systematic scoping review. **Global Food Security**, v. 34, n. June, p. 100640, set. 2022.

PURCELL, W.; NEUBAUER, T. Digital Twins in Agriculture: A State-of-the-art review. **Smart Agricultural Technology**, v. 3, n. July 2022, p. 100094, fev. 2023.

SACHITHRA, V.; SUBHASHINI, L. D. C. S. How artificial intelligence uses to achieve the agriculture sustainability: Systematic review. **Artificial Intelligence in Agriculture**, v. 8, p. 46–59, jun. 2023.

TAO, T.; MA, L.; WANG, X.; WU, S.; SHI, Z.; CUI, X. Resilience or efficiency? Strategic options for sustainable development of agricultural systems in ecologically fragile areas of China. **Science of The Total Environment**, v. 881, n. March, p. 163411, jul. 2023.

VIGOROSO, L.; CAFFARO, F.; MICHELETTI CREMASCO, M.; CAVALLO, E. Developing a more engaging safety training in agriculture: Gender differences in digital game preferences. **Safety Science**, v. 158, n. September 2022, p. 105974, fev. 2023.

ZHANG, C.-Y.; OKI, T. Water pricing reform for sustainable water resources management in China's agricultural sector. **Agricultural Water Management**, v. 275, n. April 2022, p. 108045, jan. 2023.

ZHENG, F.; ZHOU, X. Sustainable model of agricultural product logistics integration based on intelligent blockchain technology. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 57, n. May, p. 103258, jun. 2023.

ZSCHEISCHLER, J.; BRUNSCH, R.; ROGGA, S.; SCHOLZ, R. W. Perceived risks and vulnerabilities of employing digitalization and digital data in agriculture – Socially robust orientations from a transdisciplinary process. **Journal of Cleaner Production**, v. 358, n. April, p. 132034, jul. 2022.

Submetido em: 08/08/2024

Aprovado em: 13/09/2024

Publicado em: 31/10/2024

Avaliado pelo sistema double blind review