

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE ECONOMIA E RELAÇÕES INTERNACIONAIS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS ECONÔMICAS

LORENA CRISTINA DE JESUS OLIVEIRA

UTILIZAÇÃO DA MAQUINARIA AVANÇADA NA AGRICULTURA 4.0

UBERLÂNDIA

2025

LORENA CRISTINA DE JESUS OLIVEIRA

UTILIZAÇÃO DA MAQUINARIA AVANÇADA NA AGRICULTURA 4.0

Trabalho apresentado a Universidade Federal de Uberlândia – UFU, Campus Santa Mônica, como requisito para obtenção do título de bacharel em ciências econômicas.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Alves do Nascimento

Uberlândia

2025

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE ECONOMIA E RELAÇÕES INTERNACIONAIS

LORENA CRISTINA DE JESUS OLIVEIRA

Matrícula 11921ECO020

UTILIZAÇÃO DA MAQUINARIA AVANÇADA NA AGRICULTURA 4.0

Monografia apresentada ao Instituto de Economia da Universidade Federal de Uberlândia, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Ciências Econômicas.

BANCA EXAMINADORA:

Uberlândia, 17 de setembro de 2025

Prof. Dr. Carlos Alves do Nascimento (orientador)

Prof. Dr. Clésio Marcelino de Jesus

Prof. Dr. Bruno Damasceno Xavier

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	O empresário, o fluxo circular e a inovação	15
Figura 2	Desafios enfrentados	22
Figura 3	Exportação do agro	32

LISTA DE TABELA

Tabela 1	Eficiência de distribuição de fertilizantes	42
-----------------	---	-----------

RESUMO

A presente pesquisa tem como objetivo identificar e analisar os fatores que explicam a resistência dos agricultores à adoção de maquinaria avançada no contexto da Agricultura 4.0, considerando os impactos econômicos, sociais e estruturais desse processo de modernização. Para tanto, adotou-se como metodologia a revisão bibliográfica, que possibilitou a sistematização de diferentes estudos nacionais e internacionais sobre mecanização agrícola, inovação tecnológica no campo e barreiras à sua implementação. A análise evidenciou que os principais entraves à adoção dessas tecnologias estão relacionados ao alto custo de investimento, à limitação de conectividade em áreas rurais, à falta de capacitação técnica, ao conservadorismo cultural e à insegurança quanto ao retorno econômico das inovações. Como contribuição, o trabalho busca oferecer uma reflexão crítica sobre tais barreiras e propor caminhos que envolvem políticas públicas, capacitação contínua e maior integração entre produtores, instituições de pesquisa e empresas de tecnologia. Assim, ao ler este estudo, o leitor encontrará não apenas uma síntese dos desafios enfrentados na transição para a Agricultura 4.0, mas também subsídios para pensar em estratégias de superação que tornem a modernização agrícola mais inclusiva e sustentável.

Palavras-chave: agricultura 4.0, maquinaria avançada, automação, inteligência artificial, sustentabilidade.

ABSTRACT

This research aims to identify and analyze the factors that explain farmers' resistance to adopting advanced machinery within the framework of Agriculture 4.0, taking into account the economic, social, and structural impacts of this modernization process. The study adopts a bibliographic review as its methodology, which allowed the systematization of national and international studies on agricultural mechanization, technological innovation in farming, and the barriers to its implementation. The analysis revealed that the main obstacles to the adoption of such technologies are related to the high initial investment cost, limited connectivity in rural areas, lack of technical training, cultural conservatism, and uncertainty regarding the economic return of innovations. As a contribution, this work offers a critical reflection on these barriers and proposes pathways that involve public policies, continuous training, and stronger integration among producers, research institutions, and technology companies. Therefore, readers will find not only a synthesis of the challenges faced in the transition to Agriculture 4.0 but also insights into strategies to overcome them, aiming at a more inclusive and sustainable agricultural modernization.

Keywords: agriculture 4.0, advanced machinery, automation, artificial intelligence, sustainability.

SUMÁRIO

Sumário

1. INTRODUÇÃO	9
1. AGRICULTURA E SEUS CONCEITOS	13
1.1. AGRICULTURA 4.0 – CONCEITO	13
1.2. INOVAÇÃO EM SCHUMPETER	15
1.3. REVOLUÇÃO VERDE NO BRASIL	18
1.4. AGRICULTURA E TECNOLOGIAS	21
2. DESAFIOS NA ADOÇÃO DE TECNOLOGIAS NO CAMPO E OPORTUNIDADES NA AGRICULTURA 4.0 NO BRASIL	23
2.1. CONECTIVIDADE NO CAMPO	25
2.2. CUSTO DE INVESTIMENTO	28
2.3. OPORTUNIDADES DA AGRICULTURA 4.0	30
2.4. DEPENDÊNCIA DO AGRO BRASILEIRO	34
3. DESEMPENHO DAS TECNOLOGIAS NO CAMPO	37
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS	45
REFERÊNCIAS	48

1. INTRODUÇÃO

A utilização da maquinaria avançada na agricultura 4.0 representa uma transformação significativa na forma como as atividades agrícolas são conduzidas, otimizando processos, aumentando a eficiência e promovendo a sustentabilidade (Souza, 2020). O conceito de Agricultura 4.0 se refere à integração de tecnologias digitais, automação e análise de dados nas práticas agrícolas. Este novo paradigma não apenas melhora a produtividade, mas também contribui para a gestão responsável dos recursos naturais, respondendo às crescentes demandas por alimentos em um mundo em rápida urbanização e crescimento populacional (Vian; Andrade; Baricelo; Silva, 2013).

A introdução de maquinaria avançada na agricultura inclui uma ampla gama de equipamentos e tecnologias, como tratores autônomos, drones, sensores de solo e sistemas de irrigação inteligentes (Varella et al., 2022). Esses equipamentos, quando integrados a um sistema digital, permitem que os agricultores monitorem e gerenciem suas operações de maneira mais precisa. Por exemplo, tratores autônomos são equipados com sensores e GPS, permitindo que realizem operações de plantio e colheita com mínima intervenção humana (Silveira, 2005). Isso não só aumenta a eficiência operacional, mas também reduz os custos de mão de obra, que podem ser significativos em muitas regiões agrícolas.

Os drones, por sua vez, têm se tornado uma ferramenta indispensável na agricultura moderna (Cunha, J. P.; Soares Filho, R. 2016). Eles são utilizados para a aplicação de insumos, monitoramento de culturas e avaliação da saúde das plantas. Equipados com câmeras de alta resolução e sensores espectrais, os drones conseguem coletar dados em tempo real sobre as condições das plantações, identificando áreas que precisam de atenção especial, como irrigação ou fertilização (Vieira, 2013). Essa análise precisa e em tempo real permite que os agricultores tomem decisões mais informadas, aumentando a produtividade e reduzindo o desperdício de insumos.

Além disso, a utilização de sensores de solo proporciona um entendimento mais aprofundado das condições do terreno, como umidade,

temperatura e composição química (Souza, 2020). Esses sensores podem ser instalados em diferentes pontos de uma propriedade, fornecendo dados contínuos que ajudam os agricultores a otimizar a irrigação e a aplicação de fertilizantes. A análise desses dados pode ser feita por meio de softwares que utilizam inteligência artificial, que não apenas processam as informações, mas também oferecem recomendações sobre as melhores práticas de manejo (Varella et al., 2022). Assim, a maquinaria avançada se torna uma parte integral do sistema de tomada de decisões, proporcionando uma agricultura mais precisa e personalizada.

Outro aspecto importante da maquinaria avançada na Agricultura 4.0 é a sua contribuição para a sustentabilidade (Vian; Andrade; Baricelo; Silva, 2013). Com a pressão crescente para produzir mais alimentos com menos recursos, tecnologias avançadas permitem que os agricultores utilizem insumos de forma mais eficiente, minimizando o impacto ambiental. A agricultura de precisão, por exemplo, permite que os agricultores apliquem fertilizantes e pesticidas apenas onde e quando necessário, reduzindo o uso excessivo desses produtos (Silveira, 2005). Isso não apenas diminui os custos operacionais, mas também ajuda a preservar a biodiversidade e a qualidade do solo, contribuindo para um ecossistema agrícola mais saudável.

Um estudo de caso que ilustra a eficácia da maquinaria avançada na Agricultura 4.0 pode ser observado em uma fazenda de grãos nos Estados Unidos, que implementou um sistema de agricultura de precisão com a ajuda de tecnologias avançadas (Cunha, J. P.; Soares Filho, R. 2016).

A política pública também desempenha um papel crucial na promoção da maquinaria avançada na agricultura (Vian; Andrade; Baricelo; Silva, 2013). Governos podem incentivar a adoção dessas tecnologias por meio de subsídios, incentivos fiscais e investimento em infraestrutura de dados. O acesso a informações sobre clima, solo e mercado, por exemplo, pode ser melhorado com investimentos em tecnologia e em redes de dados, beneficiando não apenas os grandes produtores, mas também pequenos agricultores que podem ser mais vulneráveis às mudanças no clima e às flutuações de mercado (Souza, 2020).

A transição para a Agricultura 4.0, com a utilização de maquinaria avançada, também enfrenta desafios (Cunha, J. P.; Soares Filho, R. 2016).

Questões como o custo elevado de implementação, a necessidade de conectividade em áreas rurais e a resistência à mudança por parte de alguns agricultores são obstáculos que devem ser superados. Além disso, a dependência excessiva da tecnologia pode levar a vulnerabilidades, como a possibilidade de falhas técnicas e ciberataques. Portanto, é fundamental que as soluções adotadas sejam robustas e que exista um plano de contingência para lidar com possíveis interrupções.

A crescente demanda por alimentos, aliada ao aumento da população mundial e às mudanças climáticas, apresenta um desafio significativo para a agricultura contemporânea. Nesse contexto, a agricultura tradicional enfrenta limitações em termos de eficiência, sustentabilidade e resiliência. A implementação de maquinaria avançada na agricultura 4.0 surge como uma resposta a esses desafios, oferecendo soluções que potencializam a produtividade e minimizam os impactos ambientais. No entanto, a transição para este novo paradigma não é isenta de dificuldades, e a compreensão dos problemas associados à adoção dessas tecnologias é crucial para o sucesso da modernização agrícola.

Com base no exposto até aqui, o problema de pesquisa que orienta este estudo está relacionado à resistência dos agricultores à adoção de maquinaria avançada na agricultura 4.0, que se reflete em baixa taxa de implementação das tecnologias disponíveis, mesmo diante de suas evidências de eficácia. Essa resistência pode ser atribuída a diversos fatores como será visto mais adiante. Assim, a pergunta central que norteia a investigação é: quais são os fatores que influenciam a resistência dos agricultores à adoção de maquinaria avançada na agricultura 4.0, e como é possível superá-los?

Os objetivos deste estudo são, primeiramente, identificar e analisar os fatores que contribuem para a resistência dos agricultores à adoção de maquinaria avançada na agricultura 4.0. A partir dessa análise, o segundo objetivo é propor estratégias de capacitação e apoio técnico que possam facilitar a transição para o uso dessas tecnologias. Finalmente, o terceiro objetivo é avaliar o impacto da implementação dessas estratégias sobre a aceitação e a utilização de maquinaria avançada pelos agricultores. Através desse trabalho, espera-se ter contribuído para a compreensão das dinâmicas envolvidas na

adoção de tecnologias na agricultura e, conseqüentemente, promover um avanço significativo em direção a uma agricultura mais moderna, eficiente e sustentável.

A metodologia adotada para este estudo consistiu em uma revisão bibliográfica, um método que se revelou fundamental para a compreensão do tema da utilização da maquinaria avançada na agricultura 4.0. A revisão bibliográfica permitiu reunir, sistematizar e analisar as produções científicas já existentes sobre o assunto, oferecendo uma base teórica sólida que fundamenta a investigação. A escolha desse tipo de metodologia se justifica pela necessidade de aprofundar o conhecimento sobre as tecnologias disponíveis, os desafios enfrentados pelos agricultores e as estratégias que podem ser implementadas para promover a adoção dessas inovações.

Esta monografia está estruturada, além desta introdução, em três capítulos e nas considerações finais. O primeiro capítulo explora a evolução histórica da agricultura até a Agricultura 4.0, explicando seu conceito e características. Destaca a relação entre inovação e desenvolvimento econômico a partir da teoria de Schumpeter e apresenta um panorama da Revolução Verde no Brasil, ressaltando seus impactos positivos e negativos. O segundo capítulo analisa as barreiras enfrentadas pelos agricultores, como falta de conectividade, alto custo de investimento, resistência cultural e falta de capacitação técnica. Aponta também as oportunidades geradas pela Agricultura 4.0, como aumento de produtividade, sustentabilidade e acesso a novos mercados. Já o terceiro capítulo apresenta exemplos práticos da aplicação de maquinaria avançada, como drones, tratores autônomos e sensores de solo. Analisa resultados observados em propriedades que adotaram tais tecnologias, com ganhos em produtividade, eficiência e sustentabilidade, mas também ressalta os desafios para pequenos agricultores.

1. AGRICULTURA E SEUS CONCEITOS

1.1. AGRICULTURA 4.0 – CONCEITO

A agricultura é uma prática essencial para a sobrevivência humana, envolvendo o cultivo de plantas e a criação de animais com o objetivo de produzir alimentos, fibras, biocombustíveis e outros produtos. Esse setor é um dos pilares da economia global e tem se adaptado constantemente às mudanças sociais, tecnológicas e ambientais ao longo da história. Com a evolução das técnicas e ferramentas utilizadas, a agricultura também passou por diversas revoluções, sendo a mais recente a chamada Agricultura 4.0. Este conceito representa uma transformação significativa na forma como a agricultura é praticada, impulsionada pelo avanço das tecnologias digitais e pela integração de sistemas inteligentes no campo. A Agricultura 4.0 não se limita apenas à introdução de novas tecnologias, mas busca uma integração harmoniosa entre processos, produtos e informações que promovam uma gestão mais eficiente e sustentável da produção agrícola (Britto et al., 2023).

O conceito de Agricultura 4.0 é muitas vezes associado à quarta revolução industrial, que é caracterizada pela convergência de tecnologias físicas, digitais e biológicas. Nesse contexto, a agricultura não apenas se beneficia de inovações tecnológicas, mas também integra práticas que permitem a coleta e análise de dados em tempo real, possibilitando decisões mais informadas e precisas. Isso se traduz em um uso mais eficiente dos recursos naturais, como água e solo, além de otimizar o tempo e reduzir custos. Tecnologias como a Internet das Coisas (IoT), Big Data, inteligência artificial e drones estão cada vez mais presentes no cotidiano agrícola, permitindo o monitoramento das culturas de maneira mais eficaz e a realização de intervenções pontuais quando necessário (Campos, 2024).

Além da utilização dessas tecnologias, a Agricultura 4.0 também se preocupa com a sustentabilidade e a responsabilidade social. A produção agrícola não deve apenas atender às demandas do mercado, mas também considerar os impactos ambientais e sociais de suas práticas. Nesse sentido, a implementação de técnicas que minimizam o uso de insumos químicos, promovem a conservação do solo e da água e favorecem a biodiversidade é um aspecto central dessa nova abordagem. A ideia é que os agricultores não sejam apenas produtores de alimentos, mas também

gestores de ecossistemas que precisam ser preservados e respeitados (Silva Junior et al., 2024).

Outra característica marcante da Agricultura 4.0 é a adoção de modelos de negócios inovadores. A digitalização não apenas altera as práticas de produção, mas também transforma as cadeias de suprimentos, possibilitando o surgimento de sistemas de comercialização mais ágeis e diretos. O conceito de Short Food Supply Chains (SFSC), que envolve a aproximação entre produtores e consumidores, ganha destaque nesse contexto. Essa forma de comercialização permite que o agricultor tenha maior controle sobre sua produção e possa estabelecer relações mais diretas com seus clientes, promovendo a valorização dos produtos locais e a redução dos intermediários (Canever, Santoyo, Kaufmann, Da Rocha, 2023).

Para que a Agricultura 4.0 seja plenamente implementada, é fundamental que os agricultores recebam capacitação e formação adequadas. A transição para um modelo mais tecnológico requer não apenas a aquisição de novos equipamentos, mas também o desenvolvimento de habilidades que possibilitem o manuseio e a interpretação dos dados gerados. A educação continuada e o acesso a informações são aspectos essenciais para que os profissionais do campo possam se adaptar a essa nova realidade e explorar todo o potencial que as tecnologias oferecem (Antunes, 2020).

O uso de tecnologias avançadas também pode proporcionar um aumento significativo na eficiência energética das operações agrícolas. A automação e o uso de sistemas de irrigação inteligentes são exemplos de como a tecnologia pode otimizar o consumo de energia e água, reduzindo desperdícios e melhorando a produtividade. A irrigação de precisão, por exemplo, permite que os agricultores utilizem apenas a quantidade de água necessária para cada cultivo, levando em consideração fatores como o tipo de solo e as condições climáticas. Essa prática não apenas contribui para a sustentabilidade, mas também representa uma economia significativa em custos operacionais (Celin; Neves, 2020).

Ainda que a Agricultura 4.0 apresente inúmeras vantagens, é importante ressaltar que sua implementação não é isenta de desafios. A desigualdade no acesso a tecnologias e a falta de infraestrutura adequada em algumas regiões podem limitar a adoção dessas práticas. Além disso, a resistência cultural à mudança e a falta de apoio governamental para a modernização do setor também podem ser barreiras significativas. Assim, é crucial que haja políticas públicas que incentivem a

adoção de tecnologias na agricultura, promovendo a inclusão e garantindo que todos os agricultores, independentemente de sua localização ou recursos, possam se beneficiar dessa revolução (Cunha, J. P.; Soares Filho, R. 2016).

1.2. INOVAÇÃO EM SCHUMPETER

A inovação é um dos pilares fundamentais do desenvolvimento econômico, sendo frequentemente associada ao pensamento do economista Joseph Schumpeter. Para Schumpeter, a inovação não se limita apenas à criação de novos produtos, mas envolve uma transformação abrangente nos métodos de produção, na organização do trabalho e na introdução de novas formas de mercado. Ele argumenta que o empreendedor desempenha um papel crucial nesse processo, atuando como um agente de mudança que desafia o status quo e impulsiona o crescimento econômico. A inovação, para Schumpeter, é um motor da economia, sendo responsável por ciclos de expansão e recessão, refletindo a dinâmica de uma economia em constante transformação (Schumpeter, 1982).

“Introdução de um novo bem - ou seja, um bem com que os consumidores ainda não estejam familiarizados - ou de uma nova qualidade de um bem. 2) Introdução de um novo método de produção, ou seja, um método que ainda não tenha sido testado pela experiência no ramo próprio da indústria de transformação, que, de modo algum, precisa ser baseado numa descoberta cientificamente nova, e pode consistir também em nova maneira de manejar comercialmente uma mercadoria. 3) Abertura de um novo mercado, ou seja, de um mercado em que o ramo particular da indústria de transformação do país em questão não tenha ainda entrado, quer esse mercado tenha existido antes ou não. 4) Conquista de uma nova fonte de matérias-primas ou de bens semimanufaturados, mais uma vez independentemente do fato de que essa fonte já existia ou teve que ser criada. 5) Estabelecimento de uma nova organização de qualquer indústria, como a criação de uma posição de monopólio (por exemplo, pela trustificação) ou a fragmentação.” (Schumpeter, 1982, p. 48- 9)

Schumpeter categoriza a inovação em cinco tipos principais: a introdução de um novo produto, a implementação de um novo método de produção, a abertura de novos mercados, a conquista de novas fontes de fornecimento e a criação de novas organizações industriais. Cada uma dessas categorias

representa uma maneira pela qual os empreendedores podem alterar a estrutura de mercado e gerar lucro (figura 1). A introdução de novos produtos é talvez a forma mais visível de inovação, mas as outras categorias são igualmente importantes para a compreensão de como as economias evoluem e se adaptam às mudanças nas preferências dos consumidores e nas condições de mercado (Vieira, 2013).

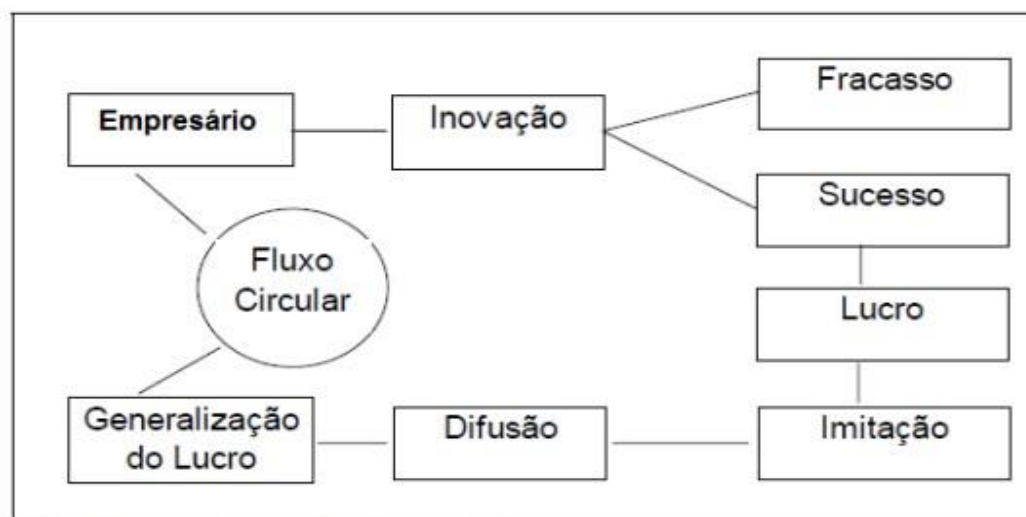


Figura 1 - O empresário, o fluxo circular e a inovação
 Fonte: ZAWISLAK (1996 *apud* LEMOS; MASCIMENTO 1998).

A visão de Schumpeter sobre a inovação destaca a importância do empreendedorismo. Para ele, os empreendedores são indivíduos que possuem a capacidade de identificar oportunidades onde outros veem apenas riscos. Eles são motivados pelo desejo de lucro, mas também possuem um espírito criativo que os impulsiona a experimentar novas ideias. Esse comportamento inovador é essencial para a renovação da economia, pois promove a concorrência e a eficiência, fatores que são cruciais para o crescimento a longo prazo. No contexto atual, as tecnologias da informação e da comunicação (TICs) têm desempenhado um papel transformador, oferecendo novas ferramentas e métodos que permitem aos empreendedores inovar de maneiras antes inimagináveis (Massruhá et al., 2005).

O impacto das TICs na agricultura, por exemplo, exemplifica como a inovação pode alterar fundamentalmente um setor. As práticas agrícolas têm sido revolucionadas por tecnologias como a automação, o uso de drones e a análise de dados, permitindo uma gestão mais eficiente e produtiva. Os agricultores que

adotam essas inovações são capazes de otimizar suas operações, reduzindo custos e aumentando a produção. Essa adaptação não é apenas uma resposta a desafios econômicos, mas também uma forma de explorar novas oportunidades no mercado, o que está em perfeita consonância com a perspectiva schumpeteriana sobre inovação e empreendedorismo (Vian et al., 2013).

Além disso, Schumpeter enfatiza que a inovação é frequentemente acompanhada por um processo de destruição criativa, onde novas tecnologias e métodos substituem os antigos. Esse processo pode ser doloroso para aqueles que não conseguem se adaptar, mas é essencial para o progresso econômico. Por exemplo, a introdução de máquinas agrícolas mais avançadas tem levado à obsolescência de métodos tradicionais, exigindo que os trabalhadores se requalifiquem para permanecer relevantes no mercado de trabalho. Essa dinâmica ressalta a necessidade de um contínuo investimento em educação e treinamento, a fim de garantir que a força de trabalho esteja preparada para as exigências de um mercado em constante mudança (Schumpeter, 1982).

A relação entre inovação e crescimento econômico também é evidente na análise dos ciclos econômicos. Schumpeter argumenta que períodos de inovação intensa frequentemente coincidem com fases de expansão econômica, enquanto períodos de estagnação podem ser atribuídos à falta de novas ideias e à resistência à mudança. Essa teoria sugere que as economias que incentivam e apoiam a inovação tendem a experimentar crescimento sustentável. No entanto, é importante notar que a inovação não ocorre de maneira uniforme; algumas indústrias e regiões são mais propensas a inovar do que outras, dependendo de fatores como o ambiente regulatório, o acesso ao financiamento e a cultura empreendedora (Vieira, 2013).

A pesquisa e o desenvolvimento (P&D) são componentes cruciais do processo de inovação, sendo responsáveis pela criação de novas ideias e pela implementação de novas tecnologias. Schumpeter reconhece a importância do investimento em P&D, pois esse é um dos meios pelos quais as empresas podem diferenciar seus produtos e processos. A colaboração entre empresas, universidades e instituições de pesquisa também desempenha um papel significativo nesse contexto, permitindo a troca de conhecimentos e a formação de parcerias que podem resultar em inovações revolucionárias. Essa interação

entre diferentes setores é um aspecto essencial da economia moderna, que está cada vez mais interconectada e globalizada (Massruhá et al., 2005).

A capacidade de uma economia de se adaptar e inovar é, portanto, um determinante chave de sua competitividade. Regiões que fomentam um ambiente propício para a inovação tendem a atrair investimentos e talentos, resultando em um ciclo positivo de crescimento e desenvolvimento. Em contrapartida, aquelas que falham em criar esse ambiente podem enfrentar desafios significativos, incluindo a perda de relevância no cenário econômico global. A análise schumpeteriana nos leva a concluir que a inovação deve ser vista não apenas como uma responsabilidade individual das empresas, mas como uma missão coletiva que envolve governos, instituições educacionais e a sociedade civil (Vian et al., 2013).

Em suma, a inovação, conforme abordada por Joseph Schumpeter, é um elemento central para a dinâmica econômica. Ela não se limita à introdução de novos produtos, mas abrange uma ampla gama de transformações que influenciam todos os aspectos da economia. Os empreendedores são os protagonistas desse processo, desafiando as normas estabelecidas e impulsionando o progresso. A relação entre inovação e crescimento econômico é complexa e multifacetada, refletindo a importância de um ambiente favorável à criatividade e à experimentação. À medida que avançamos em um mundo cada vez mais tecnológico, a compreensão e a aplicação dos princípios schumpeterianos se tornam mais relevantes do que nunca, pois a capacidade de inovar determinará o futuro das economias e das sociedades (Schumpeter, 1982).

1.3. REVOLUÇÃO VERDE NO BRASIL

A Revolução Verde no Brasil, iniciada na década de 1960, representa um marco significativo na história da agricultura brasileira. Esse movimento teve como principal objetivo aumentar a produção agrícola por meio da introdução de tecnologias inovadoras e práticas de cultivo intensivas.

Este processo foi impulsionado pela necessidade de atender à crescente demanda por alimentos, resultante do rápido crescimento populacional e da urbanização acelerada. Em meio a esse contexto, o governo brasileiro, em

colaboração com instituições de pesquisa, como a Embrapa (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária), buscou implementar programas que promoviam a adoção dessas novas tecnologias, tornando a agricultura mais eficiente e produtiva (Ferreira et al., 2021).

As práticas adotadas durante a Revolução Verde incluíram a utilização de variedades de culturas geneticamente melhoradas, que eram mais resistentes a pragas e doenças, além de apresentarem um maior potencial produtivo. Essas inovações foram fundamentais para aumentar a produtividade, especialmente em culturas como arroz, milho e soja, que se tornaram pilares da agricultura brasileira. O uso de fertilizantes químicos também desempenhou um papel crucial, pois permitiu a fertilização adequada do solo, aumentando a disponibilidade de nutrientes essenciais para o crescimento das plantas. Embora esses avanços tenham contribuído significativamente para a produção agrícola, também geraram críticas e preocupações sobre os impactos ambientais e sociais dessa intensificação (OZORIO, 2023).

Um dos aspectos mais discutidos da Revolução Verde no Brasil é a sua relação com a agricultura familiar. Embora o movimento tenha favorecido em grande parte os grandes produtores e a agroindústria, as pequenas propriedades enfrentaram dificuldades para se adaptar a esse novo modelo. A mecanização e o uso de insumos químicos exigiam investimentos que muitas vezes estavam além das possibilidades dos agricultores familiares. Isso resultou em um aumento das desigualdades no campo, uma vez que muitos pequenos agricultores não conseguiram acompanhar as inovações e, consequentemente, perderam competitividade (Machava et al., 2024).

Além disso, a Revolução Verde trouxe à tona questões relacionadas à sustentabilidade. O uso intensivo de fertilizantes e pesticidas gerou preocupações sobre a degradação do solo e a contaminação dos recursos hídricos. Estudos demonstraram que práticas agrícolas inadequadas podem levar à perda de biodiversidade, erosão do solo e poluição de rios e lagos, afetando diretamente a saúde ambiental e a qualidade de vida das comunidades rurais. Nesse sentido, é imprescindível que as políticas agrícolas busquem um equilíbrio entre a produtividade e a preservação ambiental, promovendo a agroecologia e práticas sustentáveis que respeitem a natureza (Crocco, 2021).

Nos últimos anos, a Revolução Verde passou por um processo de transformação, incorporando novos conceitos e tecnologias, como a agricultura de precisão e o uso de inteligência artificial na gestão das propriedades rurais. A agricultura de precisão permite um manejo mais eficiente dos recursos, utilizando dados geoespaciais e sensores para otimizar o uso de insumos e melhorar a produtividade das lavouras. Essa nova abordagem tem o potencial de reduzir os impactos ambientais associados à agricultura intensiva, promovendo uma produção mais sustentável (Mendes, 2022).

A integração de tecnologias digitais na agricultura também contribui para o empoderamento dos pequenos agricultores, proporcionando acesso a informações e ferramentas que podem melhorar sua produtividade e competitividade. Por meio do uso de aplicativos e plataformas digitais, os agricultores podem monitorar suas culturas, receber orientações sobre melhores práticas de manejo e até mesmo comercializar seus produtos de forma mais eficaz. Essa transformação digital pode ajudar a superar algumas das limitações impostas pela Revolução Verde original, promovendo uma agricultura mais inclusiva e sustentável.

É importante ressaltar que, apesar das críticas e dos desafios enfrentados, a Revolução Verde no Brasil foi responsável por avanços significativos na produção de alimentos e na segurança alimentar. O aumento da produção agrícola permitiu ao país não apenas atender às demandas internas, mas também se destacar como um dos principais exportadores de produtos agrícolas no cenário global. Esse sucesso é um reflexo da capacidade do Brasil de se adaptar e inovar frente aos desafios do setor agropecuário (Silva, 2020).

Contudo, a Revolução Verde no Brasil representa um processo complexo e multifacetado que gerou tanto benefícios quanto desafios. A necessidade de aumentar a produção agrícola para atender à demanda crescente levou à adoção de tecnologias e práticas que transformaram o setor. No entanto, é fundamental que os aprendizados dessa experiência sejam incorporados nas políticas agrícolas atuais, buscando um desenvolvimento que equilibre produtividade, sustentabilidade e inclusão social. A evolução das práticas agrícolas, com a introdução de novas tecnologias e enfoques, é um passo importante para garantir

um futuro sustentável para a agricultura brasileira e para as comunidades rurais que dela dependem (Ferreira et al., 2021).

1.4. AGRICULTURA E TECNOLOGIAS

A agricultura tem se transformado significativamente ao longo das últimas décadas, impulsionada por inovações tecnológicas que visam aumentar a produtividade, a sustentabilidade e a eficiência na produção de alimentos. As tecnologias aplicadas na agricultura abrangem uma vasta gama de áreas, desde o uso de máquinas e equipamentos modernos até a implementação de sistemas de informação que permitem o monitoramento e a gestão precisa das culturas. Essa transformação é vital para atender à crescente demanda global por alimentos, em um contexto de aumento populacional e mudanças climáticas que impactam a produção agrícola (Embrapa, 2014).

A utilização de maquinário adequado para cada tipo de operação é fundamental para otimizar o uso dos recursos e minimizar perdas durante o processo produtivo (Cunha; Da Silva; Dias, 2016). Além disso, a mecanização tem promovido uma revolução nas práticas de cultivo, permitindo a adoção de técnicas como plantio direto e agricultura de precisão, que têm se mostrado eficazes na conservação do solo e na redução do impacto ambiental (Cunha; Soares Filho, 2016).

A agricultura de precisão, por sua vez, é uma abordagem que se utiliza de tecnologias avançadas para monitorar e gerenciar a variabilidade das culturas em nível de campo. Essa prática envolve o uso de sensores, imagens de satélite e drones para coletar dados sobre a umidade do solo, a fertilidade e a saúde das plantas. Com essas informações, os agricultores podem tomar decisões mais informadas sobre a aplicação de insumos, como fertilizantes e pesticidas, além de realizar a irrigação de maneira mais eficiente. Essa gestão precisa dos recursos não apenas aumenta a produtividade, mas também contribui para a sustentabilidade, reduzindo o desperdício e o uso excessivo de produtos químicos (Embrapa, 2012).

Outra inovação importante é a biotecnologia, que tem permitido o desenvolvimento de culturas geneticamente modificadas, com características desejáveis, como resistência a pragas, tolerância a condições climáticas

adversas e maior valor nutricional. Essas variedades têm se mostrado fundamentais para aumentar a segurança alimentar, especialmente em regiões onde as condições de cultivo são desafiadoras. No entanto, o uso de organismos geneticamente modificados (OGMs) também levanta questões éticas e ambientais que precisam ser cuidadosamente consideradas, uma vez que a aceitação social e a regulamentação variam entre os países (Embrapa, 2014).

A irrigação também desempenha um papel crucial na agricultura moderna, especialmente em áreas onde a água é escassa. Tecnologias de irrigação, como a irrigação por gotejamento e a aspersão, têm permitido uma gestão mais eficiente da água, reduzindo o desperdício e garantindo que as plantas recebam a quantidade adequada de água no momento certo. A utilização de sistemas automatizados para monitorar e controlar a irrigação é uma tendência crescente que não apenas melhora a eficiência, mas também minimiza os custos operacionais (Cunha; Soares Filho, 2016).

A adoção de softwares de gestão agrícola e plataformas digitais tem facilitado o planejamento e a monitorização das atividades rurais, permitindo um melhor controle sobre os processos produtivos. Essas ferramentas ajudam os agricultores a analisar dados históricos, prever tendências e tomar decisões baseadas em informações concretas, promovendo uma gestão mais eficaz e competitiva das propriedades rurais (Embrapa, 2012).

O desenvolvimento de práticas que respeitam o meio ambiente e promovem a conservação dos recursos naturais é fundamental para garantir a viabilidade a longo prazo da produção agrícola. A adoção de técnicas agroecológicas, o uso de insumos orgânicos e a recuperação de áreas degradadas são algumas das práticas que visam alinhar a produção agrícola com os objetivos de sustentabilidade (Embrapa, 2014). Assim, a interação entre tecnologias e práticas sustentáveis pode resultar em sistemas agrícolas mais resilientes e adaptados às mudanças climáticas.

2. DESAFIOS NA ADOÇÃO DE TECNOLOGIAS NO CAMPO E OPORTUNIDADES NA AGRICULTURA 4.0 NO BRASIL

A adoção de tecnologias no campo representa um dos principais desafios enfrentados pela agricultura brasileira na atualidade. Embora a transformação digital na agricultura, muitas vezes referida como Agricultura 4.0, traga inúmeras oportunidades, a implementação dessas tecnologias ainda enfrenta barreiras significativas. O Brasil, com sua vasta extensão territorial e diversidade de clima e solo, tem um potencial imenso para a agricultura de precisão, mas a realidade é que muitos produtores ainda lutam para integrar essas inovações em suas práticas diárias. Um dos principais desafios é a falta de infraestrutura adequada (figura 2), especialmente em áreas rurais remotas, onde o acesso à internet de alta qualidade e às tecnologias digitais é limitado. Isso dificulta a implementação de sistemas de monitoramento e controle que são cruciais para a Agricultura 4.0 (Embrapa, 2012).

Figura 2: Desafios enfrentados



Fonte: Bolfe et al. (2020a)

Muitos pequenos e médios produtores carecem de formação adequada para entender e utilizar as tecnologias disponíveis, como sensores de umidade, drones para monitoramento de lavouras e softwares de gestão agrícola. A falta

de assistência técnica qualificada, que pode orientar esses produtores sobre como integrar as tecnologias ao seu dia a dia, torna-se um obstáculo a ser superado (Cunha; Soares Filho, 2016). Além disso, a cultura conservadora que ainda permeia muitos setores da agricultura também atua como uma barreira, com muitos agricultores relutantes em abandonar métodos tradicionais que, embora menos eficientes, são mais familiares.

Por outro lado, a Agricultura 4.0 também oferece oportunidades valiosas que podem transformar a realidade da agricultura no Brasil. Tecnologias como inteligência artificial, big data e Internet das Coisas (IoT) permitem que os agricultores realizem um acompanhamento mais preciso das condições de suas lavouras e tomem decisões informadas. Por exemplo, a análise de dados coletados por sensores pode ajudar a otimizar a irrigação e a aplicação de insumos, resultando em uma maior eficiência na utilização de recursos e redução de custos (Cunha; Da Silva; Dias, 2016). Com isso, é possível aumentar a produtividade e a sustentabilidade da agricultura, permitindo que os produtores se adaptem às demandas de um mercado cada vez mais exigente.

Iniciativas que promovem a capacitação e o intercâmbio de conhecimento entre produtores são essenciais para disseminar o uso de tecnologias, e algumas cooperativas têm se destacado nesse aspecto, promovendo treinamentos e encontros que visam a formação contínua (Embrapa, 2014). Além disso, a parceria com startups e empresas de tecnologia pode acelerar a inovação no setor, trazendo soluções que atendam às necessidades específicas dos agricultores brasileiros.

A integração de tecnologias avançadas também pode contribuir para a sustentabilidade da agricultura no Brasil. O uso de técnicas de cultivo de precisão, que consideram variáveis como tipo de solo, clima e estágio de desenvolvimento das plantas, pode levar a uma diminuição do uso de insumos químicos e ao aumento da eficiência no uso da água, o que é particularmente relevante em um país que enfrenta problemas de escassez hídrica em algumas regiões (Embrapa, 2012). Isso não apenas ajuda a preservar os recursos naturais, mas também atende a uma demanda crescente por práticas agrícolas mais sustentáveis, tanto no mercado interno quanto no externo.

Além disso, a tecnologia pode desempenhar um papel crucial na mitigação dos efeitos das mudanças climáticas na agricultura. Com ferramentas de previsão e monitoramento climático, os agricultores podem se preparar melhor para eventos extremos, como secas e chuvas intensas, ajustando suas práticas de manejo e aumentando sua resiliência (Cunha; Da Silva; Dias, 2016). Essa adaptação é essencial para garantir a segurança alimentar e a viabilidade econômica das propriedades rurais.

Contudo, para que os benefícios da Agricultura 4.0 se tornem realidade, é fundamental que haja um esforço conjunto entre o governo, as empresas de tecnologia e as instituições de pesquisa. Políticas públicas que incentivem a inovação e a pesquisa no setor agrícola são essenciais para promover a adoção de tecnologias. Isso inclui a criação de programas de subsídio para a compra de equipamentos tecnológicos, bem como a promoção de investimentos em infraestrutura de internet nas áreas rurais, para que todos os agricultores possam acessar as informações necessárias para melhorar sua produção (Embrapa, 2014). Além disso, é vital que os programas de formação e capacitação sejam ampliados e adaptados às necessidades dos agricultores, levando em conta suas realidades e desafios específicos.

A promoção de eventos, feiras e workshops que apresentem novas tecnologias e suas aplicações práticas também pode facilitar a adoção dessas inovações. A troca de experiências entre agricultores que já utilizam tecnologias avançadas e aqueles que estão começando a se familiarizar com elas pode ser extremamente enriquecedora e motivadora. Esse tipo de interação pode ajudar a criar uma cultura de inovação no campo, estimulando mais agricultores a adotarem tecnologias que podem melhorar sua produtividade e sustentabilidade.

2.1. CONECTIVIDADE NO CAMPO

A conectividade no campo é um tema de crescente relevância, especialmente em um mundo cada vez mais digitalizado e interconectado. A transformação digital nas áreas rurais não é apenas uma tendência; ela se tornou uma necessidade para garantir a competitividade e a sustentabilidade da

agricultura¹. A conectividade permite que os agricultores acessem informações em tempo real, monitorem suas colheitas, utilizem técnicas de agricultura de precisão e, em última análise, aumentem sua produtividade. Além disso, a conectividade propicia o acesso a novas tecnologias, como Internet das Coisas (IoT), inteligência artificial e big data, que podem revolucionar as práticas agrícolas (Ferreira et al., 2020).

O acesso à internet e a tecnologias digitais têm o potencial de transformar a agricultura em diversas frentes. Por meio da conectividade, os agricultores podem integrar suas operações com cadeias de suprimento e mercado, o que facilita o acesso a informações sobre preços, demandas de mercado e tendências de consumo. Essa integração não só melhora a tomada de decisões, mas também possibilita uma gestão mais eficiente dos recursos. Com a análise de dados, é possível identificar padrões e otimizar o uso de insumos, como água e fertilizantes, contribuindo para a sustentabilidade e redução de custos (Bastos et al., 2022).

A agricultura de precisão é um dos setores mais beneficiados pela conectividade no campo. Tecnologias como sensores e drones permitem que os agricultores monitorem suas lavouras de forma detalhada, identificando áreas que necessitam de intervenção. Essa abordagem não só aumenta a eficiência, mas também minimiza o impacto ambiental, uma vez que se utiliza somente o necessário para maximizar a produção. Além disso, a conectividade facilita o compartilhamento de dados entre produtores, pesquisadores e órgãos governamentais, promovendo a troca de conhecimento e a inovação (De Oliveira Marques-Eluadoeng et al., 2020).

Outro aspecto importante da conectividade no campo é a sua contribuição para a bioeconomia e a economia circular. A interconexão entre as práticas agrícolas e as tecnologias emergentes pode promover uma abordagem mais sustentável e circular, em que os resíduos e subprodutos da agricultura são utilizados como recursos para novas atividades econômicas. Esse modelo não só gera valor agregado, mas também ajuda a reduzir o desperdício e a promover a conservação dos recursos naturais. A adoção de práticas de agroindústria 4.0,

¹Não deixamos de reconhecer que se trata de uma tendência genérica que não necessariamente atinge todos os produtores da agropecuária, uma vez que, uma parte destes produtores estão a margem dessa tendência.

que incluem a integração de tecnologias digitais na produção agrícola, é fundamental para essa transição (Bastos et al., 2022).

A melhoria das infraestruturas de conectividade, como redes de internet de alta velocidade, é essencial para apoiar a digitalização no campo. Muitos agricultores ainda enfrentam desafios relacionados ao acesso limitado à internet, o que pode criar disparidades significativas entre aqueles que têm acesso a tecnologias digitais e aqueles que não têm. Para que a conectividade beneficie todos os agricultores, especialmente os pequenos e médios, é crucial que políticas públicas e iniciativas privadas sejam implementadas para melhorar a infraestrutura digital nas áreas rurais (Minas da Mata, 2023).

Além disso, a formação e capacitação dos agricultores no uso das tecnologias digitais é um aspecto fundamental para maximizar os benefícios da conectividade. A falta de conhecimento sobre como utilizar as ferramentas digitais pode limitar o potencial de inovação e transformação. Programas de educação e treinamento voltados para as comunidades rurais podem ajudar os agricultores a compreenderem melhor as vantagens das novas tecnologias e como elas podem ser aplicadas em suas atividades diárias. Essa capacitação é essencial para que os agricultores possam se adaptar às mudanças do mercado e das práticas agrícolas (Ozorio, 2023).

A conectividade também desempenha um papel importante na resiliência das comunidades rurais diante de crises, como desastres naturais e pandemias. O acesso à informação em tempo real permite que os agricultores tomem decisões mais informadas e rápidas em situações de emergência. Além disso, as redes sociais e as plataformas digitais possibilitam que os agricultores se conectem entre si, compartilhem experiências e busquem apoio em tempos difíceis. Essa rede de solidariedade é vital para a manutenção da agricultura familiar e para o fortalecimento da segurança alimentar nas comunidades rurais (Ferreira et al., 2021).

Por fim, é importante reconhecer que a conectividade no campo não é uma solução isolada, mas parte de um ecossistema mais amplo que inclui políticas públicas, investimento em pesquisa e desenvolvimento, e o envolvimento de diferentes stakeholders, como empresas, governos e organizações da sociedade civil. A colaboração entre esses atores é essencial

para criar um ambiente favorável à inovação e à adoção de tecnologias digitais na agricultura. Assim, é possível construir um futuro mais sustentável e resiliente para as comunidades rurais, aproveitando ao máximo as oportunidades que a conectividade pode oferecer (Bastos et al., 2022).

2.2. CUSTO DE INVESTIMENTO

O custo de investimento em qualquer setor, especialmente na agricultura e agroindústria, desempenha um papel crucial na viabilidade e sustentabilidade dos projetos. Em um mundo onde a inovação tecnológica se torna cada vez mais preponderante, as decisões sobre investimentos precisam ser cuidadosamente ponderadas. A modernização das práticas agrícolas através da implementação de tecnologias avançadas, como a Agricultura 4.0, exige não apenas conhecimento técnico, mas também uma análise aprofundada dos custos envolvidos. Esses custos não se restringem apenas à aquisição de equipamentos e maquinários, mas abrangem também o treinamento da força de trabalho, a adaptação das práticas de gestão e o impacto ambiental das novas tecnologias. Por isso, compreender os custos de investimento é essencial para que as empresas possam maximizar seu retorno sobre investimento (ROI) e minimizar riscos (Scoles, 2020).

Além dos custos diretos, que incluem a compra de insumos e tecnologias, existem também custos indiretos que podem impactar a operação a longo prazo. Por exemplo, a transição para sistemas mais automatizados pode exigir investimentos substanciais em infraestrutura de TI e na atualização de sistemas existentes. O financiamento dessas iniciativas muitas vezes depende de parcerias e incentivos governamentais, o que pode alterar a dinâmica de como as empresas abordam suas estratégias de investimento. A falta de planejamento adequado pode levar a surpresas financeiras indesejadas, o que destaca a importância de um planejamento financeiro sólido antes da implementação de novas tecnologias (Borba et al., 2021).

Uma análise minuciosa dos custos também deve incluir a avaliação dos riscos associados às inovações tecnológicas. A agricultura é um setor sensível às flutuações de mercado e às mudanças climáticas, e a introdução de novas

tecnologias pode não apenas resultar em benefícios, mas também em desafios inesperados. Por exemplo, a dependência excessiva de tecnologias específicas pode criar vulnerabilidades em momentos de crise, o que exige uma abordagem equilibrada no processo de adoção de inovações. As empresas precisam considerar não apenas o custo inicial, mas também os custos associados a potenciais falhas e à necessidade de manutenção e atualizações contínuas (Ferreira et al., 2020).

A implementação de tecnologias avançadas, como a automação e a análise de dados, exige uma força de trabalho qualificada que compreenda não apenas como operar novos equipamentos, mas também como interpretar e utilizar os dados gerados. Isso representa um custo adicional para as empresas, que devem investir em programas de formação e treinamento. A falta de qualificação pode resultar em uma subutilização das tecnologias, impactando diretamente na eficiência e na produtividade esperadas. Assim, o desenvolvimento de um plano de capacitação adequado deve ser parte integrante de qualquer estratégia de investimento (Bastos et al., 2022).

Além disso, o contexto econômico e as políticas públicas também influenciam os custos de investimento na agroindústria. Os incentivos governamentais, como subsídios e financiamentos com taxas de juros reduzidas, podem tornar certos investimentos mais acessíveis e viáveis. No entanto, mudanças nas políticas públicas podem criar incertezas, afetando a disposição das empresas em investir. Assim, um monitoramento contínuo do ambiente regulatório é essencial para que os investidores possam ajustar suas estratégias e mitigar riscos (Scoleso, 2020).

Em relação à avaliação dos impactos a longo prazo dos investimentos, é importante adotar métricas que vão além do simples retorno financeiro. A análise do impacto social e ambiental das práticas agrícolas deve ser uma prioridade, especialmente em um mundo cada vez mais consciente da sustentabilidade. Investimentos que promovem práticas agrícolas sustentáveis não apenas contribuem para a preservação do meio ambiente, mas também podem abrir novos mercados e oportunidades de negócio. Portanto, a sustentabilidade deve ser considerada como um componente central na avaliação de custo e benefício dos investimentos na agroindústria (Borba et al., 2021).

A integração de tecnologias de informação, como Business Intelligence e Business Analytics, pode auxiliar na otimização dos custos de investimento. Essas ferramentas permitem a coleta e análise de dados em tempo real, oferecendo informações valiosas para a tomada de decisões estratégicas. Com essas informações, as empresas podem identificar áreas de desperdício, melhorar a eficiência operacional e, conseqüentemente, reduzir os custos. Essa abordagem analítica permite que as empresas façam ajustes rápidos e informados em suas operações, resultando em um uso mais eficiente dos recursos investidos (Ferreira et al., 2020).

Por fim, a análise de custos de investimento na agroindústria não pode ser vista isoladamente, mas sim como parte de um sistema interconectado. As decisões de investimento afetam não apenas a própria empresa, mas também seus fornecedores, clientes e a comunidade em geral. Uma abordagem colaborativa, que considere as interações entre diferentes partes interessadas, pode resultar em investimentos mais sustentáveis e resilientes. A busca por parcerias estratégicas pode proporcionar acesso a novos recursos e conhecimento, ampliando as capacidades das empresas e contribuindo para a inovação no setor (Bastos et al., 2022).

2.3. OPORTUNIDADES DA AGRICULTURA 4.0

A agricultura 4.0 representa uma revolução significativa na forma como a agricultura é praticada, incorporando tecnologias avançadas para otimizar a produção, melhorar a eficiência e minimizar o impacto ambiental. Uma das principais oportunidades que surgem com essa nova abordagem é a capacidade de aumentar a produtividade das lavouras. Com a implementação de soluções tecnológicas, como sensores, drones e inteligência artificial, os agricultores podem monitorar em tempo real as condições do solo e das culturas, permitindo uma gestão mais precisa dos recursos e uma tomada de decisão informada (Silva e Cavichioli, 2020). Isso se traduz em um aumento da eficiência na utilização de insumos, reduzindo desperdícios e promovendo uma produção mais sustentável.

As tecnologias disponíveis permitem que os agricultores adaptem suas práticas a diferentes áreas de uma mesma propriedade, levando em

consideração variáveis como tipo de solo, microclima e necessidades específicas das culturas. Essa abordagem não apenas melhora a produtividade, mas também contribui para a sustentabilidade, uma vez que evita o uso excessivo de produtos químicos e fertilizantes, respeitando o equilíbrio ecológico (Varella et al., 2022). Além disso, essa personalização pode resultar em produtos de maior qualidade, atendendo melhor às demandas do mercado e aumentando a competitividade dos produtores.

A digitalização da agricultura também abre novas oportunidades para a coleta e análise de dados. Através do uso de ferramentas de big data e análise preditiva, os agricultores podem obter insights valiosos sobre o desempenho das suas culturas e as tendências de mercado. Essas informações podem ser usadas para prever safras, planejar a produção e ajustar estratégias de comercialização. A capacidade de tomar decisões baseadas em dados pode reduzir riscos e aumentar a lucratividade das operações agrícolas (Silveira, 2023). Assim, a agricultura 4.0 se posiciona como uma aliada essencial na gestão moderna das propriedades rurais.

Além disso, a integração de tecnologias inovadoras, como drones e máquinas autônomas, contribui significativamente para a otimização das operações agrícolas. Os drones, por exemplo, são capazes de realizar monitoramento aéreo, mapear áreas de cultivo e até mesmo aplicar insumos com alta precisão. Essa tecnologia não apenas economiza tempo e mão de obra, mas também aumenta a precisão das aplicações, resultando em menos perdas e maior eficiência (De Alarcão Júnior e Nuñez, 2024). Essa automação das atividades agrícolas proporciona aos agricultores mais tempo para se concentrar em atividades estratégicas, como planejamento e gestão de negócios.

A implementação de tecnologias que favoreçam a reciclagem de recursos e a minimização de desperdícios é fundamental para a sustentabilidade do setor agrícola. Com a utilização de sistemas de produção integrados, os resíduos gerados por uma atividade podem ser reaproveitados em outra, fechando ciclos produtivos e reduzindo o impacto ambiental. Essa abordagem não apenas contribui para a sustentabilidade, mas também pode gerar novas fontes de receita para os agricultores, que podem comercializar subprodutos ou insumos reciclados (Varella et al., 2022).

A formação de parcerias estratégicas é outro elemento que pode ser explorado no contexto da agricultura 4.0. O trabalho conjunto entre agricultores, empresas de tecnologia e instituições de pesquisa pode facilitar a troca de conhecimentos e experiências, promovendo a inovação no setor. Essa colaboração pode resultar em soluções mais eficazes e adaptadas às necessidades específicas dos produtores, além de fomentar a adoção de práticas sustentáveis (Martins, 2023). A troca de informações entre diferentes elos da cadeia produtiva também é essencial para o desenvolvimento de políticas públicas que incentivem a modernização e a sustentabilidade da agricultura.

Ademais, a implementação de tecnologias avançadas na agricultura 4.0 proporciona a oportunidade de acesso a novos mercados e consumidores. Com a digitalização, os agricultores podem expandir suas operações para além das fronteiras locais, aproveitando plataformas de e-commerce e redes sociais para comercializar seus produtos diretamente aos consumidores. Essa mudança não só amplia o alcance dos agricultores, mas também permite que eles se conectem diretamente com seus clientes, entendendo suas preferências e ajustando suas ofertas de acordo (Monteleone et al., 2021). Essa nova dinâmica de mercado pode resultar em melhores preços e margens de lucro para os agricultores.

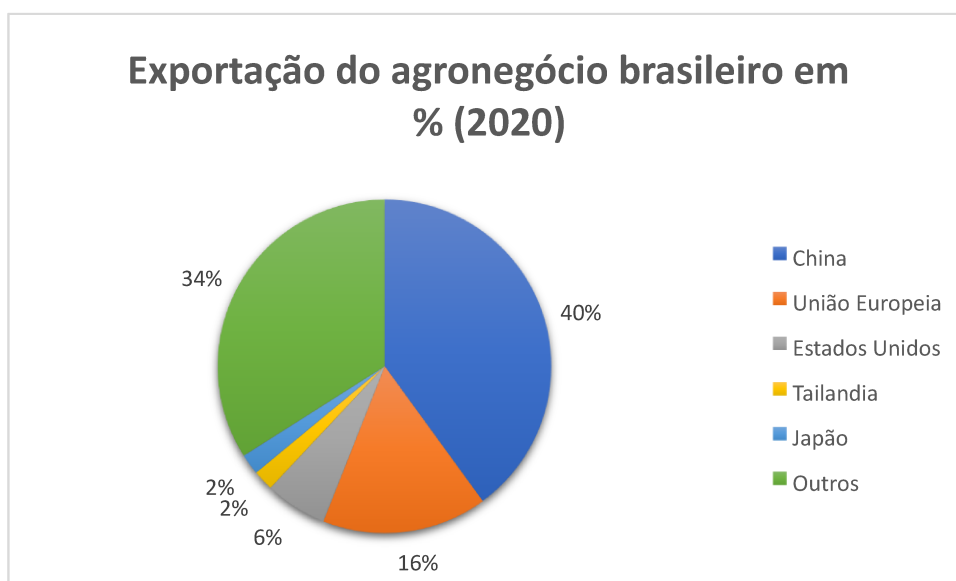
Por fim, a educação e a capacitação de agricultores e trabalhadores rurais são essenciais para a plena realização das oportunidades da agricultura 4.0. Investir em formação e treinamento permite que os profissionais do campo se familiarizem com as novas tecnologias e práticas, tornando-os mais aptos a enfrentar os desafios da modernização agrícola. Programas de capacitação que integrem o uso de tecnologias digitais e práticas sustentáveis são fundamentais para garantir que todos os envolvidos na cadeia produtiva estejam preparados para os novos desafios e oportunidades que surgem com a agricultura 4.0 (Silveira, 2023). Dessa forma, a educação se torna um pilar crucial para o desenvolvimento sustentável e a competitividade do setor agrícola.

A capacidade de produzir com maior eficiência e sustentabilidade coloca os agricultores em uma posição competitiva no mercado global. À medida que os consumidores internacionais se tornam cada vez mais conscientes da qualidade e da origem dos alimentos, a adoção de práticas agrícolas avançadas pode ser um diferencial decisivo. A agricultura 4.0 permite que os produtores

brasileiros atendam a esses critérios, utilizando tecnologias que garantem rastreabilidade, qualidade e segurança alimentar (Silva e Cavichioli, 2020).

Além disso, a automação e a digitalização permitem que os agricultores reduzam custos operacionais e aumentem a eficiência, o que pode se traduzir em preços mais competitivos no mercado externo. O mercado externo tem significativa importância para o agronegócio brasileiro, conforme a figura 3, os principais mercados como o da China, União Europeia e Estados Unidos, cada vez mais tem interesses na transparência da qualidade da produção. A utilização de tecnologias como drones para monitoramento de culturas e a implementação de sistemas de irrigação de precisão são exemplos de como a agricultura 4.0 contribui para a produtividade e a qualidade dos produtos (De Alarcão Júnior e Nuñez, 2024). Com isso, os agricultores podem explorar novos mercados, aumentando a participação do Brasil no comércio global de alimentos.

Figura 3: Exportação do agronegócio brasileiro em %, 2020.



Fonte: Ministério de Agricultura, Pecuária e Abastecimento do Brasil-MAPA (2020).

Outro aspecto importante é a adaptação dos produtos às exigências de mercados específicos. A agricultura 4.0 permite que os agricultores realizem análises detalhadas do mercado e ajustem sua produção com base nas demandas dos consumidores internacionais. Por exemplo, práticas de cultivo sustentável e certificações de produção orgânica são cada vez mais valorizadas

em mercados como o europeu e o norte-americano. Dessa forma, a capacidade de inovar e se adaptar rapidamente às tendências de consumo pode ser um fator decisivo para o sucesso na exportação (Varella et al., 2022).

Além disso, a utilização de plataformas digitais e e-commerce não só facilita a comercialização de produtos a consumidores finais, mas também permite que os produtores brasileiros se conectem diretamente com distribuidores e atacadistas internacionais. Essa nova dinâmica elimina intermediários, resultando em melhores margens de lucro e uma relação mais transparente entre produtores e consumidores. Assim, a agricultura 4.0 se torna uma ferramenta poderosa para expandir as fronteiras do agronegócio brasileiro (Monteleone et al., 2021).

Por último, a promoção de políticas públicas que incentivem a exportação de produtos agrícolas com tecnologia 4.0 é fundamental. O governo pode atuar como um facilitador, apoiando os agricultores com incentivos fiscais, investimentos em infraestrutura e acesso a mercados internacionais. A colaboração entre setores público e privado é essencial para criar um ambiente favorável à inovação e à exportação, permitindo que o Brasil se posicione como um líder global na agricultura sustentável (Martins, 2023).

2.4. DEPENDÊNCIA DO AGRO BRASILEIRO

A dependência do agronegócio brasileiro é uma questão complexa que envolve uma série de fatores econômicos, sociais e políticos. O Brasil é um dos maiores produtores e exportadores de commodities agrícolas do mundo, como soja, milho, café e açúcar. Essa posição de destaque no mercado internacional traz inúmeras vantagens, mas também expõe o país a diversas vulnerabilidades. Um dos principais aspectos dessa dependência é a relação intrínseca entre o agronegócio e a economia nacional, que se manifesta em diversos níveis. Por um lado, o agronegócio é responsável por uma parcela significativa do Produto Interno Bruto (PIB) e das exportações brasileiras, o que o torna um setor estratégico para o desenvolvimento econômico do país.

Além disso, a dependência do agronegócio brasileiro é marcada por uma forte relação com os insumos utilizados na produção agrícola. O Brasil depende significativamente da importação de fertilizantes e defensivos agrícolas, o que o

torna vulnerável a flutuações nos preços internacionais e nas relações comerciais. A guerra entre Rússia e Ucrânia, por exemplo, impactou diretamente o setor de exportação do agronegócio brasileiro devido à restrição de fertilizantes importados (Silva et al., 2023). Essa situação evidencia como a dependência de insumos estrangeiros pode comprometer a produção interna e, consequentemente, as exportações, afetando não apenas a economia agrícola, mas toda a economia do país (Felema, 2021).

A dependência do agronegócio também se reflete nas políticas públicas voltadas para o setor. O governo brasileiro, historicamente, tem incentivado a produção agrícola, oferecendo subsídios e financiamentos para a aquisição de insumos. No entanto, essa dependência financeira pode criar um ciclo vicioso em que os produtores ficam reféns de políticas governamentais que, muitas vezes, são insuficientes para garantir a competitividade do agronegócio no mercado internacional (Martins et al., 2023). Além disso, essa dependência pode levar a um descaso com outras áreas da economia, como a indústria e os serviços, que poderiam diversificar a economia e reduzir a vulnerabilidade do país às flutuações do mercado agrícola (De Oliveira Fernandes et al., 2020).

Outro ponto a ser destacado é a relação entre o agronegócio e as questões ambientais. O Brasil possui vastas áreas de floresta e biodiversidade, mas a expansão do agronegócio tem sido responsável por um significativo desmatamento e degradação ambiental. Essa situação gera conflitos entre a necessidade de produção agrícola e a preservação ambiental, criando uma dependência que muitas vezes ignora a sustentabilidade (Souza et al., 2020). Além disso, a crescente pressão internacional por práticas agrícolas sustentáveis pode impactar o acesso do Brasil a mercados consumidores, especialmente na Europa e na América do Norte, que exigem garantias de que os produtos foram cultivados de maneira sustentável (De Melo, 2024).

A dependência do agronegócio brasileiro também está relacionada a aspectos sociais. O crescimento do setor muitas vezes ocorre à custa da concentração de terras e da marginalização de pequenos produtores. A lógica do agronegócio privilegia grandes proprietários e empresas, que têm maior capacidade de investimento em tecnologia e insumos. Isso gera uma desigualdade social que se reflete na vida rural, onde pequenos produtores

enfrentam dificuldades para competir no mercado e garantir sua subsistência (Martins et al., 2023). A falta de políticas públicas eficazes para apoiar esses agricultores contribui para a manutenção da dependência do agronegócio e a vulnerabilidade das comunidades rurais.

Ademais, a dependência do agronegócio brasileiro está atrelada às questões de mercado externo e à oscilação dos preços das commodities. O Brasil é altamente vulnerável às variações nos preços internacionais, o que pode impactar diretamente a renda dos agricultores e a estabilidade econômica do país. A volatilidade dos preços das commodities é um fator que pode gerar incertezas no setor agrícola, levando os produtores a adotar estratégias de mitigação que nem sempre são viáveis a longo prazo (Felema, 2021). Esse cenário revela a fragilidade da economia brasileira diante de um cenário global em constante mudança, onde os preços das commodities estão sujeitos a especulações e decisões de mercado que fogem do controle dos produtores brasileiros.

Por fim, a dependência do agronegócio brasileiro é um tema que deve ser abordado com cautela. É fundamental que o país busque alternativas para diversificar sua economia e reduzir a vulnerabilidade do setor agrícola. Isso envolve a adoção de políticas públicas que promovam a sustentabilidade ambiental, o apoio aos pequenos produtores e a inovação tecnológica. O Brasil precisa encontrar um equilíbrio entre a exploração de suas vastas riquezas agrícolas e a necessidade de garantir um futuro sustentável para as próximas gerações. A dependência do agronegócio pode ser vista como uma oportunidade para o país se posicionar como um líder em práticas agrícolas sustentáveis, mas para isso, é essencial que haja um comprometimento de todos os setores da sociedade (Souza et al., 2020).

3. DESEMPENHO DAS TECNOLOGIAS NO CAMPO

A utilização da maquinaria avançada na agricultura 4.0 representa uma transformação significativa na forma como as atividades agrícolas são conduzidas, otimizando processos, aumentando a eficiência e promovendo a sustentabilidade. O conceito de Agricultura 4.0 se refere à integração de tecnologias digitais, automação e análise de dados nas práticas agrícolas. Este novo paradigma não apenas melhora a produtividade, mas também contribui para a gestão responsável dos recursos naturais, respondendo às crescentes demandas por alimentos em um mundo em rápida urbanização e crescimento populacional.

A introdução de maquinaria avançada na agricultura inclui uma ampla gama de equipamentos e tecnologias, como tratores autônomos, drones, sensores de solo e sistemas de irrigação inteligentes. Esses equipamentos, quando integrados a um sistema digital, permitem que os agricultores monitorem e gerenciem suas operações de maneira mais precisa. Por exemplo, tratores autônomos são equipados com sensores e GPS, permitindo que realizem operações de plantio e colheita com mínima intervenção humana. Isso não só aumenta a eficiência operacional, mas também reduz os custos de mão de obra, que podem ser significativos em muitas regiões agrícolas.

Os drones, por sua vez, têm se tornado uma ferramenta indispensável na agricultura moderna. Eles são utilizados para a aplicação de insumos, monitoramento de culturas e avaliação da saúde das plantas. Equipados com câmeras de alta resolução e sensores espectrais, os drones conseguem coletar dados em tempo real sobre as condições das plantações, identificando áreas que precisam de atenção especial, como irrigação ou fertilização. Essa análise precisa e em tempo real permite que os agricultores tomem decisões mais informadas, aumentando a produtividade e reduzindo o desperdício de insumos.

Além disso, a utilização de sensores de solo proporciona um entendimento mais aprofundado das condições do terreno, como umidade, temperatura e composição química. Esses sensores podem ser instalados em diferentes pontos de uma propriedade, fornecendo dados contínuos que ajudam os agricultores a otimizar a irrigação e a aplicação de fertilizantes. A análise desses dados pode ser feita por meio de softwares que utilizam inteligência artificial, que não apenas

processam as informações, mas também oferecem recomendações sobre as melhores práticas de manejo. Assim, a maquinaria avançada se torna uma parte integral do sistema de tomada de decisões, proporcionando uma agricultura mais precisa e personalizada. (Cunha, J. P.; Soares Filho, R. 2016)

Outro aspecto importante da maquinaria avançada na Agricultura 4.0 é a sua contribuição para a sustentabilidade. Com a pressão crescente para produzir mais alimentos com menos recursos, tecnologias avançadas permitem que os agricultores utilizem insumos de forma mais eficiente, minimizando o impacto ambiental. A agricultura de precisão, por exemplo, permite que os agricultores apliquem fertilizantes e pesticidas apenas onde e quando necessário, reduzindo o uso excessivo desses produtos. Isso não apenas diminui os custos operacionais, mas também ajuda a preservar a biodiversidade e a qualidade do solo, contribuindo para um ecossistema agrícola mais saudável.

Um estudo de caso que ilustra a eficácia da maquinaria avançada na Agricultura 4.0 pode ser observado em uma fazenda de grãos nos Estados Unidos (Cunha, J. P.; Soares Filho, R. 2016), que implementou um sistema de agricultura de precisão com a ajuda de tecnologias avançadas. Nesta propriedade, o proprietário investiu em tratores autônomos equipados com GPS e sensores, drones para monitoramento de culturas e um sistema de irrigação inteligente que ajusta automaticamente a quantidade de água com base nas condições do solo e nas previsões climáticas. (Cunha, J. P.; Soares Filho, R. 2016)

Os resultados foram impressionantes. Após a implementação dessas tecnologias, a produtividade da fazenda aumentou em 20%, enquanto o uso de água foi reduzido em 30%. O monitoramento por drones permitiu que o agricultor identificasse problemas nas culturas de forma rápida e eficiente, resultando em uma diminuição significativa nas perdas devido a pragas e doenças. Além disso, o uso de sensores de solo ajudou a otimizar a aplicação de fertilizantes, reduzindo os custos e melhorando a saúde do solo a longo prazo.

Esse caso exemplifica não apenas a eficiência econômica que a maquinaria avançada pode trazer, mas também destaca a importância de uma abordagem sustentável na agricultura. Os agricultores estão cada vez mais conscientes de que a adoção de tecnologias avançadas não é apenas uma questão

de competitividade, mas uma responsabilidade social e ambiental. As pressões sobre os recursos naturais e as mudanças climáticas exigem que o setor agrícola encontre soluções inovadoras que garantam a produção de alimentos de forma sustentável.

Além disso, a formação e a educação dos agricultores são fundamentais para a implementação bem-sucedida dessas tecnologias. Muitos agricultores podem se sentir intimidados pela complexidade das novas ferramentas e podem não ter a formação necessária para operar e interpretar os dados gerados por esses sistemas. Portanto, programas de capacitação e suporte técnico são essenciais para garantir que os agricultores possam aproveitar ao máximo as oportunidades oferecidas pela Agricultura 4.0. A colaboração entre universidades, centros de pesquisa e empresas de tecnologia pode facilitar essa transferência de conhecimento, criando um ecossistema que apoia a inovação agrícola.

A política pública também desempenha um papel crucial na promoção da maquinaria avançada na agricultura. Governos podem incentivar a adoção dessas tecnologias por meio de subsídios, incentivos fiscais e investimento em infraestrutura de dados. O acesso a informações sobre clima, solo e mercado, por exemplo, pode ser melhorado com investimentos em tecnologia e em redes de dados, beneficiando não apenas os grandes produtores, mas também pequenos agricultores que podem ser mais vulneráveis às mudanças no clima e às flutuações de mercado.

A transição para a Agricultura 4.0, com a utilização de maquinaria avançada, também enfrenta desafios. Questões como o custo elevado de implementação, a necessidade de conectividade em áreas rurais e a resistência à mudança por parte de alguns agricultores são obstáculos que devem ser superados. Além disso, a dependência excessiva da tecnologia pode levar a vulnerabilidades, como a possibilidade de falhas técnicas e ciberataques. Portanto, é fundamental que as soluções adotadas sejam robustas e que exista um plano de contingência para lidar com possíveis interrupções.

A utilização da maquinaria avançada na agricultura 4.0 tem se mostrado uma revolução no setor agrícola, trazendo consigo uma série de benefícios e desafios. Este avanço tecnológico não apenas promete aumentar a produtividade, mas também oferece soluções para questões cruciais como sustentabilidade, eficiência no uso de recursos e adaptação às mudanças climáticas. A discussão a seguir analisa a implementação de tecnologias avançadas na agricultura, os resultados observados em diferentes contextos e as implicações para o futuro do setor.

Uma das principais inovações na Agricultura 4.0 é a adoção de drones, que têm se mostrado extremamente eficazes na monitorização de culturas. De acordo com um estudo recente, o uso de drones para a aplicação de insumos e monitoramento de plantas pode aumentar a eficiência da aplicação em até 25% (De Alarcão Júnior; Nuñez, 2024). Esses dispositivos permitem que os agricultores obtenham dados em tempo real sobre a saúde das plantas, identificando rapidamente áreas que necessitam de atenção. Além disso, o uso de drones reduz significativamente a necessidade de mão de obra, uma vez que a aplicação de produtos pode ser realizada de forma mais precisa e em menos tempo.

Além dos drones, a utilização de tratores autônomos é outra tendência crescente na agricultura 4.0. Estes equipamentos são equipados com tecnologia de navegação por GPS e sensores que permitem operações de plantio e colheita sem a necessidade de intervenção humana. A eficiência operacional desses tratores pode resultar em uma redução de custos de até 30% em comparação com métodos tradicionais (Cunha; Soares Filho, 2016). A tabela a seguir ilustra a comparação entre os custos operacionais de tratores tradicionais e autônomos em diversas operações agrícolas.

A redução de custos e o aumento da eficiência são fundamentais para a sustentabilidade econômica das propriedades agrícolas. Contudo, a resistência à adoção dessas tecnologias ainda é um obstáculo significativo. Muitos agricultores, especialmente os pequenos, enfrentam barreiras financeiras e de conhecimento que dificultam a implementação de maquinário avançado. É necessário que políticas públicas e iniciativas privadas sejam desenvolvidas para

oferecer apoio financeiro e treinamento adequado, de modo a fomentar uma transição mais suave para a Agricultura 4.0 (Crocco, 2021).

Outro aspecto relevante é a aplicação de técnicas de agricultura de precisão, que envolvem o uso de sensores de solo e tecnologia de dados para otimizar a aplicação de insumos. Estudos demonstram que a utilização de fertilizantes em taxa variável pode aumentar a eficiência de distribuição em até 30%, reduzindo o desperdício e minimizando os impactos ambientais (Cunha; Da Silva; Dias, 2016). A tabela 1 apresenta dados sobre a eficiência de distribuição de fertilizantes com o uso de técnicas de taxa variável em comparação com a aplicação convencional.

Tabela 1: Eficiência de distribuição de fertilizantes

Método de Aplicação	Eficiência de Distribuição (%)	Custo de Insumo (R\$/ha)
Aplicação Convencional	70	350
Aplicação com Taxa Variável	90	300

Fonte: Dados adaptados de Cunha et al. (2016).

Esses dados ressaltam a importância da adoção de maquinaria avançada e técnicas de precisão na maximização dos recursos agrícolas. Com o aumento da demanda por alimentos e a pressão sobre os recursos naturais, a necessidade de otimizar a produção de forma sustentável é mais urgente do que nunca. A implementação de tecnologias de precisão não apenas aumenta a produtividade, mas também contribui para a conservação do meio ambiente, um fator essencial em um cenário de mudanças climáticas.

Entretanto, o avanço da maquinaria na agricultura 4.0 não é isento de desafios. A dependência excessiva de tecnologia pode criar vulnerabilidades, como o risco de falhas técnicas e ciberataques. Para minimizar esses riscos, é essencial que os agricultores desenvolvam planos de contingência e se mantenham informados sobre as melhores práticas de segurança digital (De Oliveira Fernandes et al., 2020). Além disso, a formação contínua dos agricultores é crucial para garantir que eles possam utilizar efetivamente as novas tecnologias e se adaptar a um ambiente agrícola em constante evolução.

A adoção de maquinário avançado também pode influenciar positivamente as relações comerciais no setor agrícola. Com a modernização das práticas agrícolas, os produtores podem se tornar mais competitivos no mercado, aumentando a qualidade dos produtos e reduzindo os custos de produção. Isso pode resultar em um aumento da participação de mercado e em um fortalecimento das cadeias produtivas, beneficiando toda a economia rural (De Melo, 2024).

Além disso, a integração de tecnologias avançadas pode facilitar a implementação de práticas agrícolas sustentáveis, promovendo a economia circular e a utilização responsável dos recursos. As tecnologias de monitoramento e análise de dados podem ajudar os agricultores a tomar decisões informadas sobre a rotação de culturas, a conservação do solo e o manejo da água, contribuindo para a saúde do ecossistema agrícola a longo prazo (Crocco, 2021).

As perspectivas futuras para a utilização da maquinaria avançada na agricultura 4.0 são vastas e repletas de oportunidades que prometem transformar a forma como os alimentos são produzidos, gerenciados e distribuídos. À medida que o mundo enfrenta desafios crescentes, como o aumento da população global, a escassez de recursos naturais e as mudanças climáticas, a inovação tecnológica na agricultura torna-se essencial para garantir a segurança alimentar e a sustentabilidade ambiental. Nesse contexto, a integração de tecnologias avançadas não apenas revolucionará a prática agrícola, mas também promoverá uma transformação estrutural no setor, resultando em um ambiente mais eficiente e resiliente.

Uma das principais tendências a se observar é a crescente automação dos processos agrícolas. Com o avanço contínuo da inteligência artificial e da robótica, é esperado que o uso de máquinas autônomas se torne cada vez mais comum. Esses dispositivos, que podem realizar tarefas de plantio, colheita e monitoramento de culturas sem a necessidade de intervenção humana, oferecem uma solução eficaz para a escassez de mão de obra que muitos setores agrícolas enfrentam. Essa automação não só aumentará a eficiência operacional, como também permitirá que os agricultores se concentrem em atividades de maior valor agregado, como a gestão estratégica de suas

propriedades. A perspectiva de um setor agrícola cada vez mais autônomo promete aumentar a produtividade e reduzir os custos operacionais, criando um ciclo virtuoso de inovação e crescimento.

Além da automação, a utilização de big data e análise preditiva desempenhará um papel crucial na agricultura do futuro. O monitoramento em tempo real das condições climáticas, do solo e das culturas, aliado a algoritmos de machine learning, permitirá que os agricultores tomem decisões mais informadas e oportunas. Por exemplo, a previsão de pragas e doenças com base em dados históricos e condições climáticas pode possibilitar intervenções rápidas e eficazes, minimizando perdas e melhorando a qualidade das colheitas. As tecnologias de big data também poderão auxiliar na otimização do uso de insumos, como fertilizantes e pesticidas, promovendo uma agricultura mais precisa e sustentável.

A interconexão de dispositivos por meio da Internet das Coisas (IoT) será outro elemento fundamental na agricultura 4.0. Com sensores conectados que monitoram a umidade do solo, a temperatura e a saúde das plantas, os agricultores terão acesso a dados em tempo real que permitirão um manejo mais eficaz das culturas. Essa conectividade não apenas proporcionará um aumento na eficiência, mas também facilitará a rastreabilidade dos produtos agrícolas, promovendo a transparência na cadeia de suprimentos. A rastreabilidade se tornará uma exigência crescente dos consumidores, que buscam produtos mais sustentáveis e com garantias de qualidade. A possibilidade de rastrear a origem e as práticas de cultivo dos alimentos poderá agregar valor aos produtos e fortalecer a confiança do consumidor.

Outro aspecto relevante nas perspectivas futuras da agricultura 4.0 é o uso crescente de biotecnologia e genética avançada. O desenvolvimento de culturas geneticamente modificadas que são mais resistentes a pragas, doenças e condições climáticas adversas pode contribuir significativamente para a segurança alimentar. Essas inovações têm o potencial de aumentar a produtividade das culturas e reduzir a dependência de insumos químicos, promovendo práticas agrícolas mais sustentáveis. A biotecnologia também poderá desempenhar um papel importante na adaptação das práticas agrícolas

às mudanças climáticas, permitindo que os agricultores cultivem variedades de plantas que são mais adequadas a novos padrões climáticos.

A sustentabilidade será um pilar central nas práticas agrícolas do futuro. Com a pressão crescente sobre os recursos naturais e as demandas por uma produção mais responsável, os agricultores precisarão adotar práticas que minimizem o impacto ambiental. A utilização de tecnologias que promovam a conservação do solo, a gestão eficiente da água e a redução da emissão de gases de efeito estufa será essencial. Iniciativas como a agricultura regenerativa, que visa restaurar os ecossistemas agrícolas, podem ganhar destaque, oferecendo um modelo de produção que não apenas alimenta a população, mas também repara os danos causados ao meio ambiente.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em síntese, este estudo, baseado em uma revisão bibliográfica, permitiu identificar e analisar os principais fatores que contribuem para a resistência dos agricultores à adoção de maquinaria avançada na Agricultura 4.0. Observou-se que um dos obstáculos mais relevantes é o alto custo de investimento inicial, que inclui não apenas a aquisição de equipamentos, mas também gastos recorrentes com manutenção, atualização tecnológica e infraestrutura digital. Essa barreira é ainda mais expressiva para pequenos e médios produtores, que frequentemente carecem de acesso a crédito rural ou linhas de financiamento compatíveis com suas realidades.

Outro fator determinante é a limitação da conectividade no campo, especialmente em regiões afastadas dos grandes centros. A ausência de internet de qualidade inviabiliza o funcionamento pleno de tecnologias baseadas em sensores, drones e sistemas de gestão integrados, restringindo o alcance da Agricultura 4.0.

Além disso, identificou-se uma lacuna de capacitação técnica. Muitos agricultores ainda não possuem treinamento adequado para manusear softwares, interpretar dados e operar maquinários avançados. Essa deficiência reforça uma resistência cultural e comportamental, já que práticas tradicionais são vistas como mais seguras e conhecidas, ainda que menos eficientes.

Soma-se a esses elementos a desconfiança quanto à eficácia e à durabilidade das tecnologias, o que gera insegurança em relação ao retorno do investimento. Também se destacam os riscos associados à dependência excessiva da tecnologia, como falhas operacionais e vulnerabilidades cibernéticas, que aumentam a percepção de incerteza no meio rural.

Assim, conclui-se que a resistência dos agricultores não decorre de uma negação pura e simples do progresso tecnológico, mas de uma combinação de barreiras econômicas, estruturais, técnicas e socioculturais. Para superá-las, faz-se necessário um esforço coordenado entre governo, universidades, cooperativas e empresas de tecnologia, no sentido de ampliar políticas de crédito, garantir infraestrutura digital no campo, oferecer programas de capacitação e fortalecer redes de apoio técnico.

Portanto, ao enfrentar essas barreiras, a Agricultura 4.0 poderá consolidar-se como vetor estratégico para aumentar a competitividade do agronegócio brasileiro, ao mesmo tempo em que promove sustentabilidade e inclusão no meio rural.

Outra consideração importante é o papel das políticas públicas e das iniciativas governamentais na promoção da agricultura 4.0. A transição para práticas agrícolas mais modernas e sustentáveis não ocorre no vácuo; ela requer o apoio de regulamentações adequadas, incentivos financeiros e programas de capacitação. É fundamental que os governos reconheçam a importância da inovação tecnológica na agricultura e criem um ambiente propício para que os agricultores adotem essas práticas. Isso pode incluir subsídios para a compra de maquinário avançado, investimentos em infraestrutura de comunicação e tecnologia, bem como programas de educação que informem os agricultores sobre as melhores práticas e os benefícios da agricultura de precisão. O engajamento entre o setor privado, as instituições acadêmicas e os governos será crucial para fomentar um ecossistema de inovação que beneficie todos os envolvidos na cadeia produtiva.

Além das políticas públicas, o papel da pesquisa e desenvolvimento é fundamental para o avanço da agricultura 4.0. Universidades, centros de pesquisa e empresas de tecnologia precisam trabalhar em colaboração para desenvolver novas soluções que atendam às necessidades específicas dos agricultores. A pesquisa em biotecnologia, por exemplo, pode levar ao desenvolvimento de variedades de culturas mais resistentes a pragas e doenças, enquanto a inovação em tecnologias de informação pode resultar em sistemas de gestão que ajudem os agricultores a otimizar suas operações. O investimento em pesquisa não só impulsiona a inovação, mas também garante que a agricultura se adapte rapidamente às mudanças no clima e nas demandas do mercado.

As perspectivas futuras para a agricultura 4.0 também são influenciadas pelo comportamento do consumidor. À medida que os consumidores se tornam mais conscientes sobre a origem dos alimentos e as práticas de produção, há uma pressão crescente para que os agricultores adotem métodos mais sustentáveis e transparentes. Isso significa que as tecnologias avançadas não só devem ser eficientes em termos de produção, mas também capazes de proporcionar rastreabilidade e transparência em toda a cadeia de suprimentos. A capacidade de demonstrar práticas sustentáveis, como a redução de resíduos e o uso responsável

da água, pode se tornar um diferencial competitivo importante para os agricultores que buscam se destacar em um mercado cada vez mais exigente.

Um aspecto crucial que não pode ser negligenciado é o impacto social da agricultura 4.0. A modernização das práticas agrícolas pode ter implicações significativas para as comunidades rurais. Por um lado, a adoção de tecnologias avançadas pode gerar novas oportunidades de emprego e aumentar a renda dos agricultores, ao mesmo tempo em que melhora a segurança alimentar e a qualidade dos alimentos. Por outro lado, a automação pode levar à exclusão de trabalhadores menos qualificados, exacerbando as desigualdades sociais. Portanto, é essencial que a transição para a agricultura 4.0 seja acompanhada de um enfoque social que busque incluir todos os setores da população rural, garantindo que os benefícios da inovação sejam amplamente distribuídos.

O futuro da agricultura 4.0 também será marcado por uma maior colaboração entre os diferentes atores envolvidos na cadeia produtiva. A integração entre agricultores, empresas de tecnologia, instituições acadêmicas e consumidores pode promover um ciclo de inovação contínuo, onde as melhores práticas e as novas tecnologias são compartilhadas e adaptadas para atender às necessidades específicas de cada região. Essa colaboração não apenas fortalecerá as relações comerciais, mas também permitirá que os agricultores se beneficiem do conhecimento coletivo, impulsionando o setor como um todo.

REFERÊNCIAS

ANTUNES, Ricardo. *Uberização, trabalho digital e indústria 4.0*. São Paulo: Boitempo Editorial, 2020.

BASTOS, Bruno Gouvêa et al. Bioeconomia, economia circular e agroindústria 4.0: proposições para as transições tecnológicas emergentes. Colóquio – Revista do Desenvolvimento Regional, v. 19, n. 1, p. 312-338, jan./mar. 2022.

BORBA, Marcelo Costa et al. Análise da tomada de decisão nas smart farming: apoio, desenvolvimento e exploração de perspectivas futuras. Revista Livre de Sustentabilidade e Empreendedorismo, v. 6, n. 6, p. 27-44, 2021.

BRITTO, Pedro et al. Desafios e oportunidades para o uso de novas tecnologias digitais nas operações de silvicultura e colheita florestal em Portugal. Série Técnica IPEF, v. 26, n. 48, 2023.

CAMPOS, Amanda dos Santos Negreti. Inovações em produtos e processos de negócios na agricultura familiar: estudo comparativo entre casos do Rio Grande do Sul e São Paulo em Short Food Supply Chains (SFSC). Trabalho de Graduação – Universidade Federal de São Carlos, 2024.

CELIN, Leonardo; NEVES, Márcia Luzia Cardoso. Ciência, tecnologia e capitalismo monopolista. Germinal: marxismo e educação em debate, v. 12, n. 1, p. 215-227, 2020.

CROCCO, Fábio Luiz Tezini. Metamorfoses da globalização e a reestruturação produtiva da manufatura avançada. Cadernos do CEAS: Revista crítica de humanidades, v. 46, n. 253, p. 359-387, 2021.

CUNHA, J. P. B.; DA SILVA, F. M.; DIAS, R. E. B. A. Eficiência de campo em diferentes operações mecanizadas na cafeicultura. Coffee Science, v. 11, n. 1, p. 76-86, 2016.

CUNHA, J. P.; SOARES FILHO, R. Broadcast distribution uniformity of fertilizer with centrifugal spreaders used in variable rate application. Engenharia Agrícola, v. 36, p. 928-937, 2016.

DE ALARCÃO JÚNIOR, José Carlos; NUÑEZ, Daniel Noe Coaguila. O uso de drones na agricultura 4.0. Brazilian Journal of Science, v. 3, n. 1, p. 1-13, 2024.

DE MELO, Fabrício Gomes. Efeitos sobre o agronegócio: uma análise da comercialização de fertilizantes a partir das relações bilaterais entre Brasil e Rússia. EmpíricaBR – Revista Brasileira de Gestão Negócio e Tecnologia da Informação, v. 4, n. 1, p. 10-10, 2024.

DE OLIVEIRA FERNANDES, Rafael Cristian Mauricio et al. Desafios e perspectivas da política industrial brasileira: uma análise das cadeias produtivas estratégicas e da dependência energética. *Avanços em Ciência, Tecnologia e Inovação*, p. 20, 2020.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Agricultura, sustentabilidade e tecnologia. Brasília, DF: Embrapa, 2012.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Visão 2014-2034: O futuro do desenvolvimento tecnológico da agricultura brasileira. Brasília, DF: Embrapa, 2014.

FELEMA, João. Agropecuária brasileira: uma análise dos determinantes do crescimento da produtividade controlando a dependência espacial. 2021. Tese (Doutorado em Economia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2021.

MARTINS, Thyago Sebinelli. Potencial técnico para o uso de plásticos na agricultura 4.0 e em Eco Parques Agroindustriais (EPA). 2023. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2023.

MARTINS, Yasmin Silveira et al. Acumulação capitalista, regulação do trabalho e agronegócio no Brasil: uma relação de dependência e subdesenvolvimento. *Revista de Desenvolvimento Econômico*, 2023.

MASSRUHÁ, S. M. F. S.; LEITE, M. A. A.; MOURA, M. F. Os novos desafios e oportunidades das tecnologias da informação e da comunicação na agricultura (Agrotic). In: MASSRUHÁ, S. M. F. S.; LEITE, M. A. A.; LUCHIARI JUNIOR, A. (orgs.). *Tecnologias da informação aplicadas à agricultura*. Brasília: Embrapa, 2005.

MINAS DA MATA, Maria Sofia Palma Paio. Propostas de melhoria para a Herdade dos Penedos. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso – Escola Superior Agrária de Elvas, Elvas, 2020.

MONTELEONE, Sergio et al. Proposta de um modelo de simulação para análise de políticas de difusão da agricultura irrigada de precisão no contexto da Agricultura 4.0. In: 59º Congresso da Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural – SOBER. Anais [...]. Brasília: SOBER, 2021. p. 1-20.

SCHUMPETER, Joseph A. A teoria do desenvolvimento econômico: uma investigação sobre lucros, capital, crédito, juro e ciclo econômico. São Paulo: Nova Cultural, 1982.

SILVA, Juliane Máira Pedro; CAVICHIOLI, Fabio Alexandre. O uso da agricultura 4.0 como perspectiva do aumento da produtividade no campo. *Revista Interface Tecnológica*, v. 17, n. 2, p. 616-629, 2020.

SILVA, Mateus Freire Anselmo; DA SILVA, Bruno Macedo; FRIGELG, Ernestina de Lourdes Cardoso. Guerra Rússia–Ucrânia: impactos no setor de exportação do agronegócio brasileiro gerado pela restrição de fertilizantes importados pelo Brasil. *RECIMA21 – Revista Científica Multidisciplinar*, v. 4, n. 1, p. e463398, 2023.

SILVEIRA, G. M. Mecanização: custo horário das máquinas agrícolas. DBO Agrotecnologia, São Paulo, v. 4, p. 26-29, 2005.

SILVEIRA, João Marcos. O impacto da digitalização na agricultura 4.0. Revista Brasileira de Gestão Rural, v. 9, p. 55-70, 2023.

SOUZA, Amanda Barbosa. Reestruturação produtiva e dependência econômica: agronegócio de laticínios e pequenos produtores rurais de Bela Vista de Goiás (1986-2019). 2020. 125 f. Dissertação (Mestrado em Ambiente e Sociedade) - Câmpus Sudeste – Sede: Morrinhos, Universidade Estadual de Goiás, Morrinhos-GO.

VIAN, C. E. F.; ANDRADE, A. M. J.; BARICELO, L. G.; SILVA, R. P. Origens, evolução e tendências da indústria de máquinas agrícolas. Revista de Economia e Sociologia Rural, v. 51, n. 4, 2013.

VIEIRA, Raniére Rodrigues. Tempo de resposta de um controlador eletrônico em sistemas de aplicação a taxas variáveis em pulverizações agrícolas. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013.