

A INTERSECÇÃO ENTRE A TRANSFORMAÇÃO DIGITAL E A BIOECONOMIA CIRCULAR NO AGRONEGÓCIO

DIEGO DURANTE MÜHL

UFRGS - UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

LETICIA DE OLIVEIRA

Introdução

O desenvolvimento sustentável e a digitalização são questões importantes do século XXI. A poluição do ar e da água, o esgotamento de recursos naturais, a mudança climática e a perda da biodiversidade são problemas que precisam ser enfrentados pela humanidade. Por outro lado, a digitalização favoreceu a melhoria da comunicação, a automação de processos e o acesso a informações. O sistema de produção agrícola está intrinsecamente relacionado ao desenvolvimento sustentável e poderá sofrer grandes alterações com as tecnologias digitais.

Problema de Pesquisa e Objetivo

A transformação digital pode ser uma ferramenta importante para auxiliar o setor agrícola no combate à crise energética e alimentar. Não obstante, a transformação digital e a sustentabilidade são temas estudados separadamente dificultando o entendimento das transformações pelas quais o sistema agrícola está passando pois no mundo real ambos fenômenos ocorrem concomitantemente e influenciam um ao outro. Desse modo, esse estudo se propõe a investigar os impactos das tecnologias digitais como meio para a promoção da bioeconomia circular no agronegócio.

Fundamentação Teórica

A digitalização pode permitir que o sistema agrícola seja reconfigurado e que as cadeias produtivas sejam projetadas para evitar impactos ambientais negativos a partir da bioeconomia e economia circular (BIRNER; DAUM; PRAY, 2021; GORLOV et al., 2020; MÜHL; OLIVEIRA, 2022).

Metodologia

Os artigos que compõem essa revisão de literatura foram coletados da base Scopus. Usamos a ferramenta de inteligência artificial chatGPT 3.5 para definir conjuntos de palavras-chave que foram usadas como chave de pesquisa (OPENAI, 2023). A análise consistiu numa revisão de literatura parcialmente sistemática. Foram seguidos alguns critérios, mas a avaliação heurística dos pesquisadores também esteve presente no processo de análise.

Análise dos Resultados

O uso de insumos agrícolas pode ser otimizado e recursos críticos podem ser incluídos em rotas circulares com a ajuda das TICs. Os equipamentos tradicionais pode ser digitalizados; novos equipamentos estão sendo desenvolvidos; e, ambientes artificiais controlados para o cultivo estão se desenvolvendo para garantir maior controle das operações agrícolas. Perdas de perda de alimentos podem ser evitadas e as assimetrias de informações reduzidas.

Conclusão

A transformação digital promove a sustentabilidade na agricultura, otimizando o uso de insumos, digitalizando equipamentos, automatizando operações e melhorando a gestão de recursos, envolvendo diversos stakeholders. Entretanto, requer regulação para garantir a sustentabilidade. Existe uma intersecção entre a transformação digital e a bioeconomia circular. Entretanto, essa relação não é direta e necessita ser guiada por parâmetros e diretrizes que devem ser discutidos pelos pesquisadores para evitar um processo de inovação que agrave as externalidades negativas no agronegócio.

Referências Bibliográficas

BIRNER, R.; DAUM, T.; PRAY, C. Who drives the digital revolution in agriculture? A review of supply-side trends, players and challenges. *Applied Economic Perspectives and Policy*, v. 43, n. 4, p. 1260–1285, 2021. FRIHA, O. et al. Internet of Things for the Future of Smart Agriculture: A Comprehensive Survey of Emerging Technologies. *IEEE*, v. 8, n. 4, p. 718–752, 2021. MÜHL, D. D.; OLIVEIRA, L. de. A bibliometric and thematic approach to agriculture 4.0. *Heliyon*, v. 8, n. 5, p. e09369, 2022. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2405844022006570>. Acesso em: 14 fev. 2023.

Palavras Chave

Sustentabilidade Agrícola, Revolução Digital, Segurança Alimentar

Agradecimento a órgão de fomento

Este trabalho foi parcialmente apoiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Brasil (CNPq), através de bolsa de doutorado, processo n. 140931/2022-8.

A INTERSECÇÃO ENTRE A TRANSFORMAÇÃO DIGITAL E A BIOECONOMIA CIRCULAR NO AGRONEGÓCIO

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento sustentável e a digitalização são questões importantes do século XXI. De um lado a problemática ambiental é uma ameaça, a poluição do ar e da água, o esgotamento de recursos naturais, a mudança climática e a perda da biodiversidade são problemas que precisam ser enfrentados pela humanidade. Por outro lado, a digitalização favoreceu a melhoria da comunicação, a automação de processos e o acesso a informações. Ambos os fenômenos, a digitalização e a necessidade do desenvolvimento sustentável, tem impacto significativo na vida das pessoas do presente e do futuro em todo o planeta. Adicionalmente o sistema de produção agrícola está intrinsecamente relacionado ao desenvolvimento sustentável e poderá sofrer grandes alterações com as tecnologias digitais.

O relatório do fórum econômico mundial de 2023 apresenta alguns dos riscos mais graves que podemos enfrentar nos próximos anos. Segundo o relatório estamos entrando em uma época de baixa cooperação entre os países e compromissos mais difíceis, motivados pelo baixo crescimento econômico. Esses fatores colocam em risco os acordos climáticos o que poderá comprometer a biodiversidade e o próprio desenvolvimento humano nos próximos anos. Entre os problemas concretos apresentados estão a crise energética e alimentar que se refletem no aumento da inflação, somado a isso, estão a possibilidade de ataques cibernéticos e o enfraquecimento dos direitos humanos (WORLD ECONOMIC FORUM, 2023).

O cenário apresentado pelo fórum econômico mundial torna-se ainda mais preocupante quando consideramos os dados do painel intergovernamental da mudança climática – IPCC. O IPCC de 2023 reafirma que as atividades humanas e especialmente a emissão de gases de efeito estufa que se intensificaram a partir da revolução industrial estão favorecendo o aquecimento global. A temperatura da superfície global está 1,1°C mais quente de 2011 até 2020 em comparação com o período de 1850 até 1900. Adicionalmente, as emissões globais de gases continuam a aumentar pelo uso insustentável da energia, do solo e de outros recursos, alinhado a desigualdades de consumo e produção entre regiões países e indivíduos (IPCC, 2023).

Para lidar com a crise climática a economia circular e a bioeconomia embora sejam conceitos diferentes compartilham objetivos em comum, como um uso mais sustentável e eficiente de recursos, redução do uso de carbono fóssil, redução das emissões de gases do efeito estufa e criação de fluxos secundários para a valorização de resíduos. O conceito de bioeconomia circular nasce da convergência dos conceitos de economia circular e bioeconomia (CARUS; DAMMER, 2018).

Nessa perspectiva a transformação digital pode ser uma ferramenta importante para auxiliar o setor agrícola no combate à crise energética e alimentar. A digitalização pode permitir que o sistema agrícola seja reconfigurado e que as cadeias produtivas sejam projetadas para evitar impactos ambientais negativos a partir da bioeconomia e economia circular (BIRNER; DAUM; PRAY, 2021; GORLOV *et al.*, 2020; MÜHL; OLIVEIRA, 2022). Portanto, dois fenômenos com origem distintas, a crise ambiental e as tecnologias digitais convergem para transformar a sociedade e o sistema agrícola. Não obstante, esses temas são estudados separadamente dificultando o entendimento das transformações pelas quais o sistema agrícola está passando pois no mundo real ambos fenômenos ocorrem concomitantemente e influenciam um ao outro. Desse modo, esse estudo se propõe a investigar os impactos das tecnologias digitais como meio para a promoção da bioeconomia circular no agronegócio.

Essa lacuna no conhecimento exige uma abordagem capaz de integrar as temáticas. A própria transformação digital precisa de parâmetros, de diretrizes ou paradigmas que guiem o processo de inovação a fim de evitar possíveis desdobramentos negativos (KLERKX; ROSE, 2020). Usar as tecnologias digitais para promover a circularidade dos recursos do sistema agrícola, segundo o conceito de bioeconomia circular, parece uma alternativa promissora diante do cenário apresentado (VENKATA MOHAN *et al.*, 2016).

2 METODOLOGIA

O sistema agrícola está inserido nesse cenário de crise ambiental e transformação digital. Para investigar como as novas tecnologias e a bioeconomia circular podem impactar o agronegócio podemos tomar como ponto de partida a definição clássica de agronegócio: O agronegócio é a soma das operações de fabricação e distribuição de suprimentos agrícolas, produção na fazenda e armazenamento, processamento e distribuição das commodities agrícolas (DAVIS; GOLDBERG, 2021). Entretanto, com o desenvolvimento do campo de pesquisas outras variáveis relacionadas foram identificadas e passaram a ser estudadas como: custos de transação, contratos, direitos de propriedade, legislação e instituições (ZYLBERSZTAJN, 2017).

A partir dos segmentos do agronegócio destacados por Davis e Goldberg (2021) e Zylbersztajn (2017) dividimos o agronegócio nos seguintes segmentos: a) insumos; b) equipamentos; c) produção nas fazendas; d) logística e armazenamento de produtos agrícolas; e) custos de transação e contratos; f) instituições; e, g) legislação e direito de propriedade.

2.1 COLETA

Os artigos que compõe essa revisão de literatura foram coletados da base Scopus. A Scopus é uma base de dados multidisciplinar que compreende o maior banco de dados de resumos, citações, e artigos completos da literatura científica mundial apresentando boa cobertura para a finalidade pretendida nesse trabalho (ELSEVIER, 2023).

Realizamos uma busca na base de dados para cada segmento do agronegócio, conforme supracitado. As buscas foram realizadas de primeiro de Junho de 2023 e quatro de Setembro de 2023. Usamos a ferramenta de inteligência artificial chatGPT 3.5 para definir conjuntos de palavras-chave que foram usadas como chave de pesquisa (OPENAI, 2023). A expressão base de pesquisa combinou três principais tópicos de interesse: (*área do agronegócio AND transformação digital AND bioeconomia circular*). Basicamente, o chatGPT forneceu um conjunto de termos sinônimos que foram agrupados com os operadores booleanos e usados para a formar as chaves de pesquisa.

2.2 ANÁLISE

A análise consistiu numa revisão de literatura parcialmente sistemática. Foram seguidos alguns critérios, mas a avaliação heurística dos pesquisadores também esteve presente no processo de análise, conforme será destacado.

O número de documentos recuperado para cada área do agronegócio definidas apresentou grande variabilidade. a) insumos: 121 documentos; b) equipamentos: 318 documentos; c) produção nas fazendas: 384 documentos; d) logística e armazenamento de produtos agrícolas: 733 documentos; e) custos de transação e contratos: 2 documentos; f) instituições: 8 documentos; e, g) legislação e direito de propriedade: 2 documentos. Desse modo, para alguns segmentos do agronegócio a quantidade de documentos foi muito grande dificultando uma revisão sistemática completa enquanto para outros segmentos a quantidade de documentos foi insuficiente para se estabelecer uma compreensão sobre o assunto abordado. Para sanar essas dificuldades os pesquisadores adotaram dois critérios:

2.2.1 Quando houve muitos artigos foram considerados apenas os documentos publicados nos últimos 5 anos; os documentos foram ranqueados a partir da quantidade de citações recebidas; o pesquisador leu os títulos dos artigos segundo a ordem ranqueada selecionando artigos que julgou relevantes; o pesquisador leu os resumos dos artigos antes de acessar o conteúdo; o pesquisador parou a pesquisa quando julgou ter elementos necessários para compreender e responder as questões a seguir.

2.2.2 Quando não houve artigos suficientes: para embasar os resultados o pesquisador usou artigos que a princípio seriam de outros segmentos para responder as questões. Essa escolha se justifica porque não existem muitos estudos publicados abordando áreas específicas do agronegócio em relação a transformação digital, já que se trata de um fenômeno muito recente.

Finalmente, para cada um dos segmentos definidos procuramos determinar a partir da literatura científica:

- a. Como a transformação digital altera cada um desses segmentos do agronegócio?
- b. Como a transformação digital favorece a sustentabilidade de cada um desses segmentos?

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. INSUMOS AGRÍCOLAS

Os insumos agrícolas são um aspecto crítico para a agricultura especialmente frente a possibilidade de escassez de recursos fundamentais como o fósforo (FREILING; VON TUCHER; SCHMIDHALTER, 2022). Nesse sentido existe pelo menos duas possibilidades que a digitalização do setor agrícola pode aprimorar: a primeira diz respeito a otimização do uso de insumos agrícolas; e a segunda diz respeito a gestão circular dos insumos agrícolas (GHORMADE; DESHPANDE; PAKNIKAR, 2011; TAGARAKIS *et al.*, 2021; WEGENER *et al.*, 2019).

A digitalização, uso de metodologias integradas e inteligentes seguindo o conceito de economia circular permitem a redução dos impactos ambientais das atividades agrícolas. Um sistema inteligente para agricultura circular demonstrou que é possível otimizar a tomada de decisão e gerenciar a circularidade dos recursos dentro da fazenda pela criação de processos digitais e subsistemas especializados que coletam e processam dados dos diversos setores da fazenda (TAGARAKIS *et al.*, 2021; WEGENER *et al.*, 2019).

Sensores equipamentos de IOT podem coletar dados de um amplo espectro numa fazenda. Dados meteorológicos e de umidade do solo de IoT, imagens de satélite e drones e dados de sensores para o cultivo de grãos; dados de umidade e temperatura da silagem no processo de produção e armazenagem de alimentos para animais; dados de condições ambientais de alojamento de animais (temperatura, umidade, concentrações de CO₂ e metano, etc.), status de saúde animal (temperatura, atividade e comportamento); volume de dejetos, teor e temperatura de águas residuais, volume de biogás produzido em fazendas com sistemas de processamento de dejetos animais. Especialmente a possibilidade de digitalizar e otimizar soluções como a digestão anaeróbica permitem que o processo de digitalização beneficie diretamente a circularidade dos recursos na fazenda (TAGARAKIS *et al.*, 2021).

Os robôs agrícolas e técnicas de alta precisão melhoram o uso de insumos críticos. Uma determinada área produtiva pode ser classificada em pontos individuais de acordo com suas características específicas do local. A semeadura, fertilização, aplicação de pesticidas em alta precisão podem otimizar o uso de insumos no futuro com a aplicação de automação (WEGENER *et al.*, 2019).

Portanto, a transformação digital permite a otimização do uso dos insumos agrícolas e facilita a gestão circular de insumos críticos, como resíduos que podem ser transformados em fertilizantes. Nesse sentido, as TICs tem potencial para ajudar a promover a sustentabilidade do uso de insumos agrícolas.

3.2 EQUIPAMENTOS AGRÍCOLAS

Os equipamentos usados para fazer a agricultura e produzir alimentos evoluíram com a história da humanidade e estiveram intimamente ligados ao desenvolvimento humano. Atualmente, tratores e equipamentos modernos permitem ultrapassar 200 ha por trabalhador. É assim que na América do Norte e no Oeste Europeu, uma população agrícola reduzida a menos de 5% da população total é capaz de alimentar a população total desses países (MAZOYER; ROUDART, 2002).

Os equipamentos agrícolas que surgiram durante as revoluções mecânica e elétrica como tratores, plantadeiras, colheitadeiras, com a transformação digital passam a ser conectados e integradas em plataformas digitais. As máquinas agrícolas incorporam controles eletrônicos e entraram na era digital. A eletrônica, por meio de sensores acoplados aos equipamentos agrícolas permite a coleta de dados e o controle de vários aspectos chave da agricultura (LEZOCHE *et al.*, 2020). A digitalização não apenas tornam as máquinas agrícolas inteligentes e eficientes, mas também ajudam a economizar insumos como sementes, fertilizantes, produtos químicos, água e energia para uma agricultura mais sustentável (MEHTA; CHANDEL; RAJWADE, 2020). Nesse sentido, os agrotóxicos podem ser gradualmente substituídos ou aplicados com maior especificidade, dado seus impactos negativos ao meio ambiente e saúde humana (JACQUET *et al.*, 2022).

O desenvolvimento de novos equipamentos, principalmente a possibilidade de aplicação de atuadores autônomos, como robôs agrícolas e veículos aéreos não tripulados, abrem margem para um novo modelo de agricultura que poderá se diferenciar bastante do modelo atual empregado (MÜHL; OLIVEIRA, 2022). Essas tecnologias, se encontram no estado da arte, estão sendo testadas como protótipos, as pesquisas sobre o assunto envolvem a adaptabilidade do design de robôs ao ambiente agrícola, a melhoria de sensores capazes de trabalhar em um ambiente com grande variabilidade de condições, umidade, poeira e a melhoria das condições de navegação para locomoção autônoma desses sistemas (LEZOCHE *et al.*, 2020).

No mesmo sentido, os ambientes de cultivo controlados são uma nova abordagem que pode combater a futura crise alimentar pois permite o cultivo ininterrupto durante todo o ano, independente de condições climáticas adversas; sensores inteligentes, dispositivos atuadores, topologias de rede, análise de big data e decisão inteligente devem viabilizar o plantio, crescimento e colheita de diferentes culturas em ambientes controlados (RAYHANA; XIAO; LIU, 2020).

Além da transformação de atividades individuais a digitalização dos equipamentos agrícolas combina técnicas da agricultura de precisão com ferramentas de gerenciamento baseadas em dados e plataformas (LEZOCHE *et al.*, 2020; MEHTA; CHANDEL; RAJWADE, 2020). Portanto, o aperfeiçoamento dos equipamentos agrícolas pode promover a sustentabilidade a medida que permite uma melhor gestão de recursos, substituí o uso de insumos nocivos (como agrotóxicos) e permite que a agricultura seja realizada independentemente de condições adversas pelo cultivo em ambientes artificiais controlados.

Portanto, a transformação digital parece impactar os equipamentos agrícolas de três maneiras principais: Pela digitalização de equipamentos tradicionais; pelo desenvolvimento

de novos equipamentos; e, pelo desenvolvimento de ambientes artificiais controlados para o cultivo.

3.3 PRODUÇÃO NAS FAZENDAS

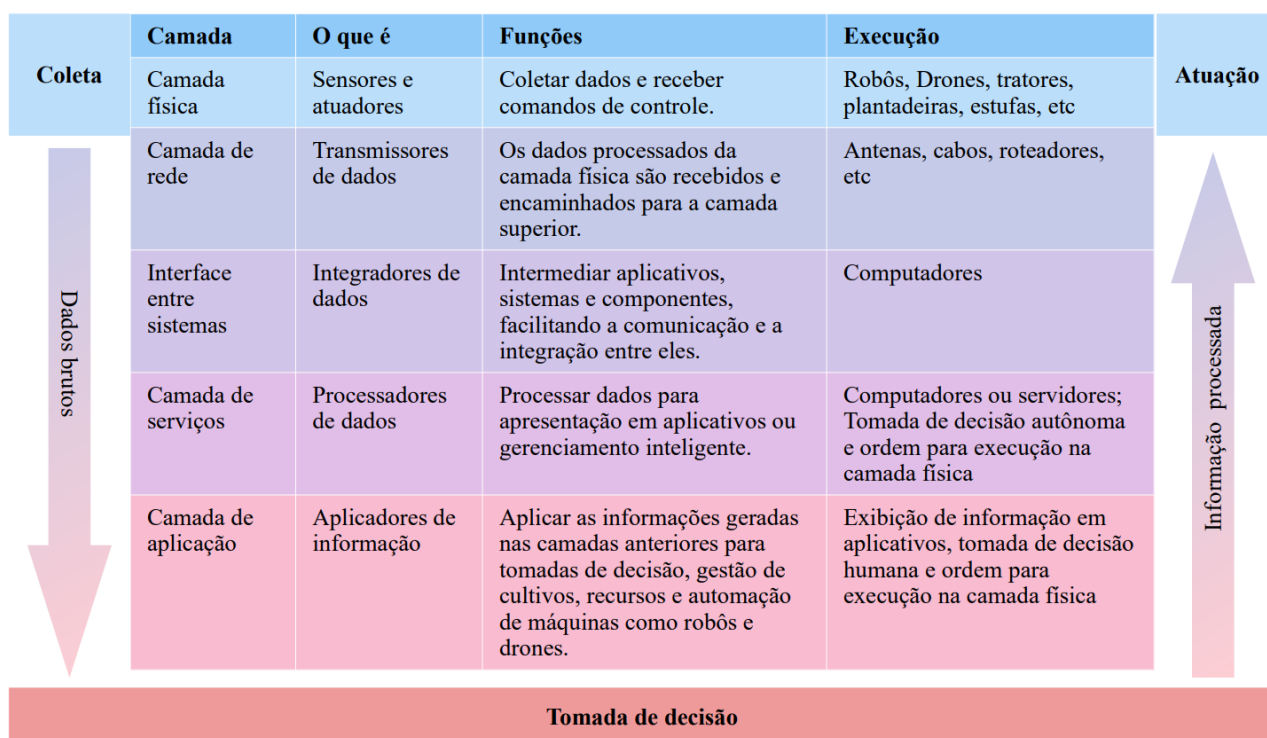
Havendo alterações nos insumos agrícolas e nos equipamentos agrícolas necessariamente isso estará refletido nos processos produtivos das fazendas. A premissa que direciona as pesquisas se baseia no aumento da produtividade e na ecoeficiência. Entretanto, a produção nas fazendas está diretamente relacionada a fatores sociais. As novas tecnologias podem reescrever a história das sociedades agrícolas e isso requer um processo de inovação responsável, especialmente no que diz respeito a inclusão social (ROSE; CHILVERS, 2018).

O aumento da complexidade do processo produtivo nas fazendas é uma característica marcante da agricultura 4.0. Tecnologias de IoT, sensores, atuadores e microprocessadores, tecnologias de transmissão de dados sem fio em banda larga, sistemas baseados em computação de nuvem, análise de big data, IA e robótica, entre outras soluções compõem o processo produtivo das fazendas na agricultura 4.0 (FRIHA *et al.*, 2021).

A introdução de automação nas atividades de cultivo é um anseio dos pesquisadores. Sensores e algoritmos de visão computacional estão sendo desenvolvidos e acoplados em atuadores com a finalidade de realizar o cultivo de plantas, substituindo e aprimorando diversas atividades realizadas somente por humanos atualmente (LOTES *et al.*, 2018; ROSE; CHILVERS, 2018).

Entretanto, para que atuadores autônomos como robôs agrícolas e veículos aéreos não tripulados sejam capazes de executar tarefas nas fazendas é preciso que um conjunto de tecnologias IOT seja aplicado. Essas tecnologias podem ser mais facilmente compreendidas se classificadas em camadas (CODELUPPI *et al.*, 2020; FRIHA *et al.*, 2021).

Figura 1 - Camadas de tecnologias de IOT relacionadas ao processo produtivo da agricultura 4.0 nas fazendas



Fonte: Autores 2023

A tomada de decisão baseada em dados e a total automação de atividades operacionais são duas características marcantes da agricultura 4.0 no processo produtivo das fazendas. Isso pode contribuir para a sustentabilidade de diversas maneiras. Por exemplo, robôs ou veículos autônomos não tripulados podem realizar o controle automatizado de cultivos e combate direcionado de ervas daninhas, reduzindo significativamente o uso de pesticidas (LOTES *et al.*, 2018; SA *et al.*, 2018). Entretanto, pesquisas práticas testando a viabilidade técnica dessas soluções ainda estão em estágio primário de desenvolvimento, a viabilidade econômica é outra variável importante que precisa ser melhor explorada.

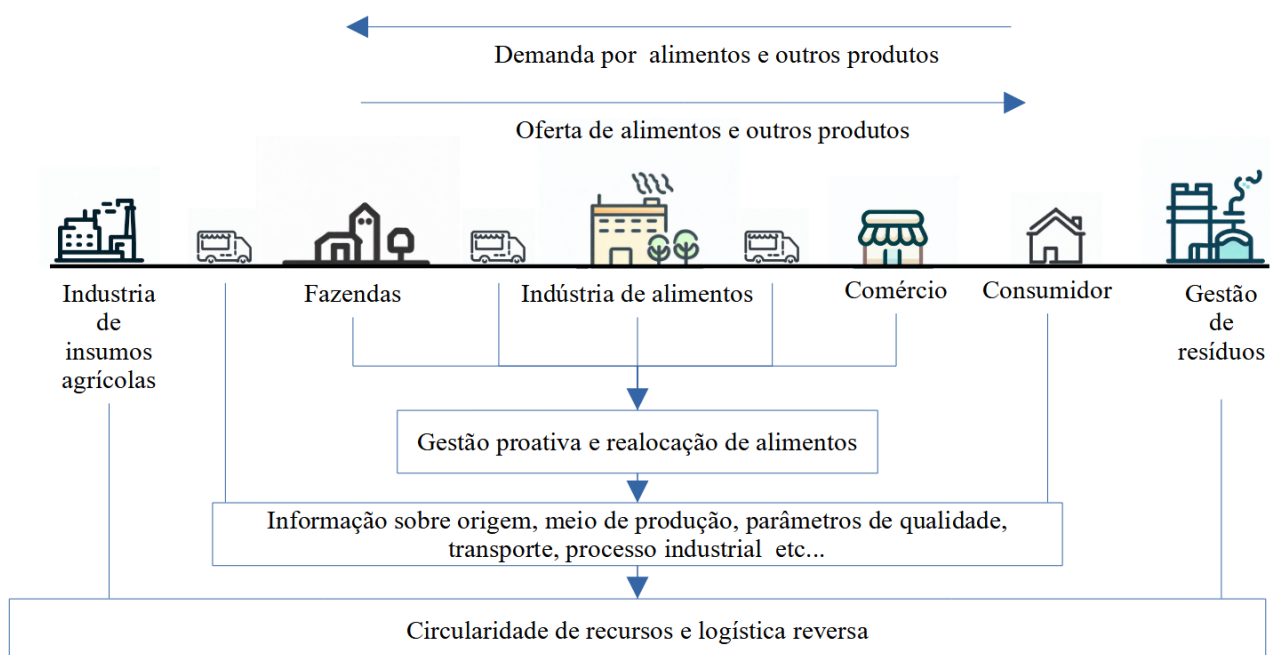
Portanto, a automação das atividades agrícolas operacionais e a tomada de decisão baseada em dados são as principais alterações que a agricultura 4.0 deve causar no processo produtivo das fazendas. Isso pode ser benéfico a bioeconomia circular na medida que as operações se tornam mais eficientes e a gestão de recursos críticos mais apurada.

3.4 LOGÍSTICA E ARMAZENAMENTO DE PRODUTOS AGRÍCOLAS

A Internet das coisas, a blockchain e as tecnologias de big data são potenciais facilitadores de cadeias de abastecimento agrícolas sustentáveis a medida que permitem a integração dos elementos de uma cadeia de suprimentos em uma espécie de “ecossistema digital”. A capacidade de análise de dados permite a visibilidade total da cadeia de suprimentos, possibilitando uma gestão apurada dos recursos em tempo real para tomada de decisões proativas que favorecem a eficiência e a sustentabilidade (KAMBLE; GUNASEKARAN; GAWANKAR, 2020; SHARMA *et al.*, 2020).

A produção, o processamento, a distribuição, o varejo e consumo são as principais fases de uma cadeia de suprimentos genérica. Diversos processos de liquidação complexos e não muito transparentes tornam essas transações arriscadas, vulneráveis à fraude, exigindo diversos intermediários, aumentando os custos globais de transações. Soluções de blockchain podem simplificar as cadeias de suprimentos agrícolas, oferecendo informações integradas em tempo real (KAMILARIS; FONTS; PRENAFETA-BOLDY, 2019).

Figura 2 - Ecossistema digital para cadeias de suprimentos agrícolas mais sustentáveis



Fonte: Autores 2023

A figura representa de maneira simplificada os atores relacionados a logística das cadeias de suprimentos de alimentos. Nesse ínterim, se destaca o fluxo de informações que

pode ser implementado para que os processos decisórios sejam mais assertivos e informativos para os consumidores e outros interessados.

As cadeias agrícolas passam a incluir o consumo, a redução de resíduos e a logística reversa para atender as necessidades de sustentabilidade. Assim, tecnologias como o big data e a inteligência artificial podem auxiliar na tomada de decisões relacionadas a valorização de resíduos agrícolas e gestão circular de recursos (BELAUD *et al.*, 2019; MONTEIRO; BARATA, 2021).

Portanto, a transformação digital favorece a sustentabilidade a medida que é capaz de evitar a perda de alimentos, redistribui excedentes alimentares, facilita a circularidade de recursos e permite a logística reversa.

3.5 CUSTOS DE TRANSAÇÃO E CONTRATOS

As negociações podem se basear em contratos digitais inteligentes, a IoT e os registros de transações com tecnologia blockchain permitem uma completa identificação de origem, rastreabilidade e controle dos parâmetros de qualidade dos produtos agrícolas na cadeia de suprimentos (AGNUSDEI *et al.*, 2023; RONAGHI, 2021). A adoção de tecnologias digitais é benéfica para reduzir as assimetrias de informação favorecendo uma maior orientação social a respeito da produção agrícola. As comunidades locais tendem a ser mais envolvidas nos processos produtivos e mercados secundários passam a oferecer maior transparência (KUSUMOWARDANI; TIAHJONO; PRIADI, 2021).

A tecnologia blockchain pode criptografar, de modo que um registro digital seja inalterável, e compartilhar as informações relevantes de uma negociação entre os diversos interessados (ROCHA *et al.*, 2023). Logo, todo o processo burocrático de uma transação pode ser digitalizado, ou seja, as negociações podem ser realizadas em plataformas digitais e os contratos podem tomar a forma de contratos digitais.

A transformação digital no agronegócio é um pré-requisito para um modelo de agronegócio baseado em plataformas digitais. Entretanto, a digitalização dos processos de negócio provavelmente aumenta a flexibilidade das negociações e reduz os custos de transação (LITVINOVA *et al.*, 2020). Portanto, os contratos digitais e as negociações em plataformas são duas características que a transformação digital poderá fortalecer nos próximos anos.

Reduzir as assimetrias de informação favorece uma maior orientação social a respeito da produção agrícola. Em um ecossistema digital onde organizações trocam energia, materiais e subprodutos para reduzir custos de produção os impactos ambientais podem ser reduzidos (BRUEL; GODINA, 2023). A tecnologia blockchain pode permitir a criação de ecossistemas digitais, onde diversas organizações trabalham em simbiose, dessa maneira diferentes materiais e a energia gasta podem ser rastreados ao longo do ciclo de vida de determinado produto, isso permite a otimização do uso de recursos a um nível sistêmico. As negociações e os contratos podem considerar antecipadamente os impactos de uma futura negociação e evitá-la se conveniente. Assim o blockchain e as plataformas digitais permitem a otimização e o planejamento contínuo de ciclos fechados para a gestão circular de recursos, se houver sinergia entre as organizações envolvidas (ELGHAISH *et al.*, 2023).

Entretanto as inovações orientadas para a sustentabilidade e promoção da economia circular parecem ser impulsionadas quando uma empresa ou organização líder cria rotinas específicas para a troca de informações e geração de contratos. Adicionalmente os custos de governação dos sistemas circulares devem ser comparados com outros arranjos para comprovar sua viabilidade (MIRANDA; MONTEIRO; RODRIGUES, 2021).

Portanto, a transformação digital favorece a sustentabilidade ao reduzir as assimetrias de informações, reduzindo especulações sobre os mercados de alimentos, oferecendo aos consumidores produtos a um preço justo. No mesmo sentido a simbiose entre as organizações agrícolas pode ser otimizada, permitindo um planejamento mais apurado e maior eficiência produtiva.

3.6 INSTITUIÇÕES

Dados e análises digitais podem orientar decisões ao longo das cadeias agrícolas. Comerciantes podem prever demanda e oferta de alimentos ligando produtores e mercados consumidores fornecendo produtos agrícolas no momento certo e em volumes adequados. No mesmo sentido, instituições como governo, bancos e outros stakeholders podem tomar decisões informadas sobre investimentos, subsídios, gestão de riscos, etc (BENFICA *et al.*, 2023).

Algumas instituições de extensão rural já usam as tecnologias digitais em favor dos agricultores. Por exemplo, a Digital Green, uma organização voltada para extensão agrícola, teve bons resultados com vídeos educativos e de treinamento. A organização difunde treinamentos nas línguas locais com agricultores conduzindo técnicas agrícolas na Índia, Etiópia, Gana, Moçambique e Tanzânia (ANNAN; DRYDEN, 2015).

Um estudo realizado na Índia com agricultores que conheciam e tinham acesso às plataformas digitais de insumos agrícolas sugere que os agricultores esperam que entidades governamentais e cooperativas também estejam incorporadas nas plataformas digitais, as instituições tradicionais, como cooperativas e governo, fornecem maior confiança aos agricultores. Adicionalmente, é importante para os agricultores que as plataformas ofereçam propostas de negociação, não se limitando a uma mera lista de contatos (SINGH; KAPOOR, 2023).

As instituições são fundamentais na pesquisa, desenvolvimento e difusão das novas tecnologias e práticas agrícolas. As inovações necessárias para a transformação digital requerem apoio institucional de longo prazo. O sucesso para o desenvolvimento e implementação de novas tecnologias depende do crescimento do know-how em todo o setor agrícola (COOK *et al.*, 2022).

Portanto, stakeholders, associações, sindicatos, cooperativas agrícolas, instituições de pesquisa e ensino, instituições financeiras, órgãos governamentais, indústria de alimentos, centros logísticos, organizações de certificação e qualidade e empresas de tecnologia agrícola deverão se relacionar de alguma maneira com as plataformas digitais. Essas instituições podem fornecer serviços aos produtores, consumidores e stakeholders ou podem se beneficiar do big-data para tomada de decisões. Adicionalmente, as instituições têm uma função fundamental no desenvolvimento da transformação digital.

3.7 LEGISLAÇÃO E DIREITO DE PROPRIEDADE

A transformação digital pode criar lacunas relacionadas a legislação e direitos de propriedade. Atualmente não existe um quadro jurídico holístico e ainda há muitas questões jurídicas a serem esclarecidas que dependem de uma melhor compreensão das aplicações e desdobramentos do uso das TICs em geral (MACPHERSON *et al.*, 2022).

Tecnologias como o blockchain têm potencial de eliminar grande parte dos intermediários das cadeias agrícolas (ELGHAISH *et al.*, 2023; ROCHA *et al.*, 2023). Adicionalmente o processo de transformação digital pode agravar a acumulação de capital e as desigualdades sociais no meio rural (ROSE; CHILVERS, 2018). Em um estudo realizado com agricultores na Austrália 34% dos participantes entrevistados acreditam que os

agricultores poderão ser os principais beneficiados com os dados gerados nas fazendas; entretanto, 35% acreditam que o agronegócio em geral se beneficiará dos dados e outros 21% acreditam que o governo será o principal beneficiado com o big data. Contudo, não existe consenso sobre a propriedade ou direitos de uso dos dados em muitos casos (ZHANG et al., 2021).

Nesse sentido, existem duas principais frentes de pesquisa estabelecidas quando se trata de agricultura 4.0, a primeira voltada ao desenvolvimento de novas tecnologias e a segunda preocupada com os desdobramentos e com os impactos positivos e negativos que essas tecnologias podem causar (MÜHL; OLIVEIRA, 2022). Adicionalmente, as políticas de desenvolvimento da agricultura digital consideram de forma limitada os benefícios da digitalização, a legislação ainda é altamente fragmentada e a sustentabilidade da agricultura digital não está garantida e depende dos futuros arranjos legais, direitos de propriedade e regimes de uso de dados (MACPHERSON *et al.*, 2022).

Portanto, a legislação pode impulsionar ou retardar a adoção da transformação digital no agronegócio. A lei deve garantir a sustentabilidade e prevenir as externalidades negativas do processo de transformação digital no agronegócio.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A transformação digital promove a sustentabilidade na agricultura, otimizando o uso de insumos, digitalizando equipamentos, automatizando operações e melhorando a gestão de recursos, envolvendo diversos stakeholders. Entretanto, requer regulação para garantir a sustentabilidade. Assim a transformação digital pode favorecer cada segmento do agronegócio em direção a bioeconomia ou economia circular:

a) Insumos agrícolas, o uso de insumos agrícolas pode ser otimizado durante a aplicação nas fazendas. Recursos críticos podem ser incluídos em rotas circulares com a ajuda das TICs.

b) Equipamentos agrícolas, os equipamentos tradicionais pode ser digitalizados; novos equipamentos estão sendo desenvolvidos; e, ambientes artificiais controlados para o cultivo estão se desenvolvendo para garantir maior controle das operações.

c) Processo produtivo: a automação das operações agrícolas e a tomada de decisões baseada em dados tornam o processo produtivo nas fazendas mais eficiente e a gestão de recursos críticos mais apurada.

d) Logística: a transformação digital favorece a sustentabilidade a medida que é capaz de evitar a perda de alimentos, redistribuí excedentes alimentares, facilita a circularidade de recursos e permite a logística reversa.

e) Custos de transação e Contratos: as assimetrias de informações e especulação sobre mercados de alimentos podem ser reduzidas oferecendo aos consumidores produtos a um preço mais justo. Adicionalmente a simbiose entre as organizações agrícolas pode ser otimizada, permitindo um planejamento mais apurado e maior eficiência produtiva sistêmica.

f) Instituições: as instituições têm uma função fundamental no desenvolvimento da transformação digital. As instituições podem fornecer serviços aos produtores, consumidores e stakeholders ou podem se beneficiar do big-data para tomada de decisões.

g) Legislação e direito de propriedade: a legislação pode impulsionar ou retardar a adoção da transformação digital no agronegócio. A lei deve garantir a sustentabilidade e prevenir as externalidades negativas do processo de transformação digital.

O estudo abordou apenas artigos da base de dados Scopus, podem haver estudos muito interessantes indexados em outras bases de dados. No mesmo sentido devido a natureza do campo de estudos e as limitações de tempo e recursos dos pesquisadores a revisão de literatura não foi totalmente sistemática, portanto a generalização dos resultados apresentados requer cautela. Entretanto, para colaborar com a compreensão de transformação digital no agronegócio é possível que estudos futuros corroborem com o estudo atual com outras abordagens metodológicas como bibliometria, estudos de caso ou revisões sistemáticas de literatura mais aprofundadas em cada setor específico do agronegócio.

Esse estudo ofereceu uma visão consolidada da transformação digital no agronegócio e seus impactos na sustentabilidade. A principal contribuição dessa pesquisa para o campo científico reside em demonstrar que existe uma intersecção entre a transformação digital e a bioeconomia circular. Entretanto, essa relação não é direta e necessita ser guiada por parâmetros e diretrizes que garantam um ótimo desenvolvimento, difusão e aplicação das tecnologias digitais no meio agrícola, evitando um processo de inovação que agrave as externalidades negativas no agronegócio.

5 REFERÊNCIAS

AGNUSDEI, L. *et al.* Digitalization as driver to achieve circularity in the agroindustry: A SWOT-ANP-ADAM approach. **Science of The Total Environment**, [s. l.], v. 882, p. 163441, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969723020600>. Acesso em: 24 ago. 2023.

ANNAN, K.; DRYDEN, S. Food and the Transformation of Africa: Getting Smallholders Connected. **Foreign Affairs**, [s. l.], v. 94, n. 6, p. 124–129, 2015. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/43946549>. Acesso em: 30 ago. 2023.

BELAUD, J.-P. *et al.* Big data for agri-food 4.0: Application to sustainability management for by-products supply chain. **Computers in Industry**, [s. l.], v. 111, p. 41–50, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166361518306419>. Acesso em: 24 ago. 2023.

BENFICA, R. *et al.* Food System Innovations and Digital Technologies to Foster Productivity Growth and Rural Transformation. Em: VON BRAUN, J. *et al.* (org.). **Science and Innovations for Food Systems Transformation**. Cham: Springer International Publishing, 2023. p. 421–437. *E-book*. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-031-15703-5_22. Acesso em: 30 ago. 2023.

BIRNER, R.; DAUM, T.; PRAY, C. Who drives the digital revolution in agriculture? A review of supply-side trends, players and challenges. **Applied Economic Perspectives and Policy**, [s. l.], v. 43, n. 4, p. 1260–1285, 2021.

BRUEL, A.; GODINA, R. A Smart Contract Architecture Framework for Successful Industrial Symbiosis Applications Using Blockchain Technology. **Sustainability (Switzerland)**, [s. l.], v. 15, n. 7, 2023.

CARUS, M.; DAMMER, L. The Circular Bioeconomy—Concepts, Opportunities, and Limitations. **Industrial Biotechnology**, [s. l.], v. 14, n. 2, p. 83–91, 2018. Disponível em: <http://www.liebertpub.com/doi/10.1089/ind.2018.29121.mca>. Acesso em: 21 jun. 2023.

CODELUPPI, G. *et al.* LoraFarM: A LoRaWAN-based smart farming modular IoT architecture. **Sensors (Switzerland)**, [s. l.], v. 20, n. 7, 2020.

COOK, S. *et al.* Embedding digital agriculture into sustainable Australian food systems: pathways and pitfalls to value creation. **International Journal of Agricultural Sustainability**, [s. l.], v. 20, n. 3, p. 346–367, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/14735903.2021.1937881>. Acesso em: 1 set. 2023.

DAVIS, J. H.; GOLDBERG, R. A. **A Concept of Agribusiness**. [S. l.]: Martino Fine Books, 2021. *E-book*. Disponível em: https://books.google.com.br/books?id=EJMzzgEACAAJ&source=gbs_book_other_versions.

ELGHAISH, F. *et al.* Digitalised circular construction supply chain: An integrated BIM-Blockchain solution. **Automation in Construction**, [s. l.], v. 148, p. 104746, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580523000067>. Acesso em: 29 ago. 2023.

ELSEVIER. **Why choose Scopus**. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://www.elsevier.com/solutions/scopus/why-choose-scopus>. Acesso em: 4 set. 2023.

FREILING, M.; VON TUCHER, S.; SCHMIDHALTER, U. Factors influencing phosphorus placement and effects on yield and yield parameters: A meta-analysis. **Soil and Tillage Research**, [s. l.], v. 216, 2022.

FRIHA, O. *et al.* Internet of Things for the Future of Smart Agriculture: A Comprehensive Survey of Emerging Technologies. **IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica**, [s. l.], v. 8, n. 4, p. 718–752, 2021.

GHORMADE, V.; DESHPANDE, M. V.; PAKNIKAR, K. M. Perspectives for nano-biotechnology enabled protection and nutrition of plants. **Biotechnology Advances**, [s. l.], v. 29, n. 6, p. 792–803, 2011.

GORLOV, I. F. *et al.* Digital Technologies in the Development of the Agro-Industrial Complex. **Lecture Notes in Networks and Systems**, [s. l.], v. 87, p. 220–229, 2020.

IPCC. **Intergovernmental Panel on Climate Change**. [S. l.: s. n.], 2023. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/>. Acesso em: 8 maio 2023.

JACQUET, F. *et al.* Pesticide-free agriculture as a new paradigm for research. **Agronomy for Sustainable Development**, [s. l.], v. 42, n. 1, 2022.

KAMBLE, S. S.; GUNASEKARAN, A.; GAWANKAR, S. A. Achieving sustainable performance in a data-driven agriculture supply chain: A review for research and applications. **International Journal of Production Economics**, [s. l.], v. 219, p. 179–194, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925527319302038>. Acesso em: 23 ago. 2023.

KAMILARIS, A.; FONTS, A.; PRENAFETA-BOLDY, F. X. The rise of blockchain technology in agriculture and food supply chains. **Trends in Food Science & Technology**, [s. l.], v. 91, p. 640–652, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924224418303686>. Acesso em: 31 ago. 2023.

KLERKX, L.; ROSE, D. Dealing with the game-changing technologies of Agriculture 4.0: How do we manage diversity and responsibility in food system transition pathways?. **Global Food Security**, [s. l.], v. 24, p. 100347, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211912419301804>. Acesso em: 18 maio 2023.

KUSUMOWARDANI, N.; TJAHJONO, B.; PRIADI, C. R. Circular economy adoption in the upstream agri-food supply chain: Understanding the implications of the two theoretical lenses.

Em: PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRIAL ENGINEERING AND OPERATIONS MANAGEMENT, 2021. **Anais [...]**. [S. l.: s. n.], 2021. p. 5051–5060.

LEZOCHE, M. *et al.* Agri-food 4.0: A survey of the supply chains and technologies for the future agriculture. **Computers in Industry**, [s. l.], v. 117, p. 103187, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166361519307584>. Acesso em: 18 ago. 2023.

LITVINOVA, O. V. *et al.* Digital platform as a liaison mechanism and a business model in agribusiness. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, [s. l.], v. 604, n. 1, p. 012033, 2020. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/604/1/012033>. Acesso em: 28 ago. 2023.

LOTES, P. *et al.* Fully convolutional networks with sequential information for robust crop and weed detection in precision farming. **IEEE Robotics and Automation Letters**, [s. l.], v. 3, n. 4, p. 2870–2877, 2018.

MACPHERSON, J. *et al.* Future agricultural systems and the role of digitalization for achieving sustainability goals. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, [s. l.], v. 42, n. 4, p. 70, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13593-022-00792-6>. Acesso em: 4 set. 2023.

MAZOYER, M.; ROUDART, L. **Histoire des agricultures du monde: du néolithique à la crise contemporaine**. Paris: Éditions du Seuil, 2002. (Histoire). *E-book*. Disponível em: <https://codeagro.agricultura.sp.gov.br/uploads/capacitacao/historia-das-agriculturas-no-mundo-mazoyer-e-roudart.pdf>.

MEHTA, C. R.; CHANDEL, N. S.; RAJWADE, Y. A. Smart farm mechanization for sustainable indian agriculture. **AMA, Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America**, [s. l.], v. 51, n. 4, p. 99-105+95, 2020.

MIRANDA, B. V.; MONTEIRO, G. F. A.; RODRIGUES, V. P. Circular agri-food systems: A governance perspective for the analysis of sustainable agri-food value chains. **Technological Forecasting and Social Change**, [s. l.], v. 170, p. 120878, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0040162521003103>. Acesso em: 4 set. 2023.

MONTEIRO, J.; BARATA, J. Artificial Intelligence in Extended Agri-Food Supply Chain: A Short Review Based on Bibliometric Analysis. **Procedia Computer Science**, [s. l.], v. 192, Knowledge-Based and Intelligent Information & Engineering Systems: Proceedings of the 25th International Conference KES2021, p. 3020–3029, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050921018111>. Acesso em: 24 ago. 2023.

MÜHL, D. D.; OLIVEIRA, L. de. A bibliometric and thematic approach to agriculture 4.0. **Heliyon**, [s. l.], v. 8, n. 5, p. e09369, 2022. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2405844022006570>. Acesso em: 14 fev. 2023.

OPENAI. **ChatGPT**. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://chat.openai.com>. Acesso em: 4 set. 2023.

RAYHANA, R.; XIAO, G.; LIU, Z. Internet of Things Empowered Smart Greenhouse Farming. **IEEE Journal of Radio Frequency Identification**, [s. l.], v. 4, n. 3, p. 195–211, 2020.

- ROCHA, G. da S. R. *et al.* Blockchain, Quo Vadis? Recent Changes in Perspectives on the Application of Technology in Agribusiness. **Future Internet**, [s. l.], v. 15, n. 1, p. 38, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1999-5903/15/1/38>. Acesso em: 14 fev. 2023.
- RONAGHI, M. H. A blockchain maturity model in agricultural supply chain. **Information Processing in Agriculture**, [s. l.], v. 8, n. 3, p. 398–408, 2021.
- ROSE, D. C.; CHILVERS, J. Agriculture 4.0: Broadening Responsible Innovation in an Era of Smart Farming. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, [s. l.], v. 2, 2018.
- SA, I. *et al.* WeedMap: A large-scale semantic weed mapping framework using aerial multispectral imaging and deep neural network for precision farming. **Remote Sensing**, [s. l.], v. 10, n. 9, 2018.
- SHARMA, R. *et al.* A systematic literature review on machine learning applications for sustainable agriculture supply chain performance. **Computers & Operations Research**, [s. l.], v. 119, p. 104926, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305054820300435>. Acesso em: 24 ago. 2023.
- SINGH, N.; KAPOOR, S. Configuring the agricultural platforms: farmers' preferences for design attributes. **Journal of Agribusiness in Developing and Emerging Economies**, [s. l.], v. ahead-of-print, n. ahead-of-print, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1108/JADEE-09-2022-0204>. Acesso em: 31 ago. 2023.
- TAGARAKIS, A. C. *et al.* A Smart Farming System for Circular Agriculture †. **Engineering Proceedings**, [s. l.], v. 9, n. 1, 2021.
- VENKATA MOHAN, S. *et al.* Waste biorefinery models towards sustainable circular bioeconomy: Critical review and future perspectives. **Bioresource Technology**, [s. l.], v. 215, Waste Biorefinery - Advocating Circular Economy, p. 2–12, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852416304333>. Acesso em: 15 mar. 2023.
- WEGENER, J. K. *et al.* Spot farming - an alternative for future plant production. **Journal fur Kulturpflanzen**, [s. l.], v. 71, n. 4, p. 70–89, 2019.
- WORLD ECONOMIC FORUM. **Global Risks Report 2023**. Cologny/Geneva Switzerland: [s. n.], 2023. Disponível em: <https://www.weforum.org/reports/global-risks-report-2023/>. Acesso em: 8 maio 2023.
- ZHANG, A. *et al.* Who will benefit from big data? Farmers' perspective on willingness to share farm data. **Journal of Rural Studies**, [s. l.], v. 88, p. 346–353, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0743016721002308>. Acesso em: 31 ago. 2023.
- ZYLBERSZTAJN, D. Agribusiness systems analysis: origin, evolution and research perspectives. **Revista de Administração**, [s. l.], v. 52, n. 1, p. 114–117, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0080210716307531>. Acesso em: 12 maio 2023.