

Ferramentas Tecnológicas De Rastreabilidade Agropecuária

Dr. Cleberson Eller Loose

Uéverton Fraga De Paula

Resumo

A concretização dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente na erradicação da fome e promoção da saúde, depende da segurança alimentar. A OMS estima que 600 milhões de pessoas adoecem anualmente devido a alimentos contaminados, destacando a relevância de sistemas de rastreabilidade na cadeia alimentar. Esses sistemas permitem o monitoramento eficiente e transparente de produtos, especialmente em contextos de riscos sanitários, e funcionam como ferramentas de diferenciação no mercado, como observado durante crises sanitárias, como a pandemia de COVID-19. Para tal, utilizou-se como método a revisão integrativa, cuja pergunta de pesquisa foi delineada a partir da estratégia PIO (P: rastreabilidade I: agropecuária O: ferramentas tecnológicas). Sendo assim, 1865 artigos foram recuperados da busca nas bases de dados e após triagem, foram selecionados 20 artigos para análise na íntegra. Os artigos demonstraram que a adoção de tecnologias da Indústria 4.0 e 5.0, como blockchain e Internet das Coisas (IoT), oferece avanços na rastreabilidade de produtos agropecuários, aumentando a visibilidade e a confiança na cadeia de suprimentos. No entanto, a implementação desses sistemas enfrenta desafios técnicos e estruturais, exigindo um marco regulatório robusto e a cooperação de entidades governamentais para garantir a eficiência e a segurança dos dados. A adoção de sistemas de rastreabilidade depende também da percepção de viabilidade e lucratividade pelos agricultores, com o apoio de políticas públicas que incentivem a integração dessas tecnologias desde as fases iniciais da produção. A implementação eficaz desses sistemas pode mitigar riscos sanitários, aumentar a confiança do consumidor e promover um sistema alimentar mais transparente, seguro e sustentável, contribuindo para um futuro mais resiliente, alinhado aos princípios dos ODS e à segurança alimentar global.

Palavras Chaves: rastreabilidade. fiscalização. segurança alimentar. tecnologias.

Date of Submission: 03-12-2024

Date of Acceptance: 13-12-2024

I. Introdução

A concretização dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especificamente aqueles relacionados à erradicação da fome e à promoção da saúde e bem-estar, depende diretamente da garantia da segurança alimentar (ONU, 2015). De acordo com a FAO (2023), sem um sistema alimentar seguro e resiliente, alcançar essas metas globais torna-se um desafio monumental. A OMS (2015) estima que 600 milhões de pessoas adoecem e 420.000 morrem anualmente devido a alimentos contaminados. Esses alimentos inseguros geram perdas de produtividade, custos médicos elevados e impactam negativamente a economia e o comércio global, afetando significativamente a saúde pública e gerando um impacto econômico devastador.

Conforme revelado por um estudo recente pela ONU e PNUMA (2023) o Brasil figura entre os 10 países que mais desperdiçam alimentos no mundo. Segundo o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA, 2023), o desperdício de alimentos contribui com 8% a 10% das emissões globais de gases de efeito estufa. Esse dado evidencia a complexa interdependência entre o desperdício alimentar e a crise climática, reforçando a urgência de ações integradas para mitigar ambos os desafios.

Além dos efeitos diretos na saúde e na economia, incidentes relacionados à segurança alimentar afetam gravemente a confiança dos consumidores (Huang; Fu, 2023). Para Reitano *et al.*, (2024) a desconfiança crescente em alimentos específicos resulta em desperdícios desnecessários, o que não apenas exacerba os problemas de segurança alimentar, mas também aumenta as emissões de gases de efeito estufa, contribuindo para o agravamento das mudanças climáticas. Além disso, essa desconfiança compromete a credibilidade das autoridades reguladoras responsáveis pela fiscalização e controle, criando um ciclo prejudicial que dificulta a promoção de um sistema alimentar seguro e sustentável (Huang; Fu, 2023; Sarkar; Sharma; Shardeo, 2024).

Nesse contexto, os sistemas de rastreabilidade emergem como uma ferramenta tecnológica essencial para enfrentar os desafios da segurança alimentar, proporcionando maior transparência e controle sobre a cadeia de produção de alimentos (Zhang *et al.*, 2024). Esses sistemas permitem o monitoramento detalhado de cada etapa do processo produtivo, desde a origem até o consumidor final, criando uma rede interconectada de dispositivos de *hardware* e *software* que registram e compartilham informações críticas sobre a produção (Huang; Fu, 2023).

Com isso, torna-se possível rastrear com precisão a origem de problemas de segurança alimentar e adotar medidas corretivas imediatas, reduzindo os riscos e melhorando a confiança do consumidor (Reitano *et al.*, 2024).

A rastreabilidade não apenas mitiga as falhas de mercado resultantes de assimetrias de informação e responsabilidades difusas, mas também promove uma maior responsabilização entre os diversos agentes envolvidos na cadeia de suprimentos alimentares (Hrouga, 2024). No entanto, a eficácia desses sistemas depende da sua implementação abrangente em toda a cadeia de fornecimento, incluindo desde os estágios iniciais da produção agrícola até os pontos de distribuição (Huang; Fu, 2023). Neste contexto, os agricultores e agências públicas, como parte fundamental desse processo, desempenham um papel essencial na adoção de sistemas de rastreabilidade, especialmente ao integrar essas tecnologias nas fases de cultivo e produção primária (FAO, 2023).

A implementação de sistemas de rastreabilidade nas fazendas, unidades produtivas e órgãos estatais são vistos como uma estratégia central para mitigar esses riscos, monitorar o fluxo de produtos e, principalmente, identificar com rapidez e precisão quaisquer irregularidades (FAO e OMS, 2019). No entanto, o sucesso dessas iniciativas depende não só da tecnologia em si, mas também do grau de engajamento dos agricultores e órgãos estatais. Estudos indicam que a adoção de novas tecnologias, como os sistemas de rastreabilidade, pelos agricultores e entidades públicas está diretamente relacionada à sua percepção sobre a viabilidade e a lucratividade dessas inovações (Hasan *et al.*, 2024). Embora esses sistemas possam representar um desafio em termos de aceitação inicial, especialmente devido à complexidade tecnológica envolvida (Sarkar; Sharma; Shardeo, 2024), a integração de valores sociais e ambientais nas práticas agropecuárias pode motivar uma participação mais ativa por parte dos produtores rurais (Zhang *et al.*, 2024).

A difusão da inovação no campo depende, em grande parte, da compreensão dessas percepções, uma vez que a adoção generalizada de novas tecnologias está intimamente ligada à confiança na sua eficácia e aos resultados práticos observados no campo (Hrouga, 2024). A expansão dos sistemas de rastreabilidade para os estágios iniciais da produção agropecuária não só resolve desafios de segurança alimentar, como também fortalece a confiança do consumidor e assegura a transparência em toda a cadeia de fornecimento (Huang; Fu, 2023). Além de melhorar a qualidade dos produtos alimentares, essa abordagem pode contribuir significativamente para o desenvolvimento sustentável da agricultura, promovendo uma integração mais equilibrada entre tecnologia, produção e segurança alimentar. Assim, a adoção desses sistemas pelos agricultores e o suporte contínuo das autoridades reguladoras são essenciais para transformar a segurança alimentar em uma realidade globalmente sustentável.

Dessa forma, a rastreabilidade de produtos agropecuários torna-se vital para segurança alimentar e sustentabilidade. Este estudo objetiva identificar ferramentas tecnológicas disponíveis na literatura científica, analisando eficácia, custo e adaptabilidade. Contudo, faltam estudos que integrem e comparem tecnologias como RFID¹, IoT (internet das coisas) e *blockchain*, especialmente em contextos regionais e entre pequenos produtores. Essa lacuna limita a adoção generalizada e a eficiência das práticas. O trabalho visa preencher essa necessidade, oferecendo uma análise crítica e abrangente para alinhar rastreabilidade às demandas globais por qualidade e transparência.

II. Metodologia

A metodologia descreve um conjunto de abordagens, técnicas e procedimentos empregados a fim de investigar e responder às questões de pesquisa propostas.

Da abordagem metodológica da identificação da ferramenta mais eficiente na rastreabilidade agropecuária

A pesquisa trata-se de uma revisão integrativa. Souza, Silva e Carvalho (2010) destacam que a revisão integrativa proporciona a síntese de conhecimento e a incorporação da aplicabilidade de resultados de estudos significativos. Portanto, o estudo apresenta uma metodologia desenvolvida baseada em um estudo descritivo, de modo a compilar as informações por meio da seleção de textos acadêmicos referentes à temática do estudo de modo sistemático. A fim de recuperar os trabalhos que tratam da temática em questão, e oportunizem a escolha segura da ferramenta de rastreabilidade mais eficiente para o setor.

Em complemento Souza, Silva e Carvalho (2010) dizem que a revisão integrativa é uma metodologia que une estudos experimentais, não-experimentais, dados teóricos e empíricos, com o objetivo de oferecer uma compreensão ampla do fenômeno, abordando a definição de conceitos, teorias e questões metodológicas. De certo, a revisão integrativa representa uma abordagem robusta e abrangente dentro do contexto das revisões, visto que se distingue por sua capacidade de incorporar não somente os estudos experimentais, como também os não

¹ Para Sarkar, Sharma e Shardeo (2024) a RFID (Radio Frequency Identification) trata -se de uma tecnologia de identificação automática que utiliza ondas de rádio para capturar e transmitir dados armazenados em dispositivos chamados de *tags* ou etiquetas RFID. Esses dispositivos podem ser lidos sem a necessidade de contato físico direto, diferentemente de tecnologias como códigos de barras.

experimentais. Dessa forma, esta amplitude metodológica permitirá uma análise mais completa e holística do fenômeno em estudo, a fim de partir para a consideração de diversas perspectivas.

Em sequência, como meio estratégico, para definir claramente os elementos-chave de uma pergunta de pesquisa para orientar a busca e análise de evidências, foi utilizada a estratégia PIO (uma adaptação da estratégia PICO para pesquisas não-clínicas), que conforme os autores Cristina, Cibele e Moacyr (2007) representa um acrônimo para P: População (rastreabilidade), I: Fenômeno de interesse (agropecuária), e O: ‘Outcomes’ ou resultado de interesse (ferramenta tecnológica). Logo esse acrônimo resulta na seguinte pergunta de pesquisa: Qual a ferramenta mais eficiente para a rastreabilidade de produtos agropecuários?. Dessa forma, para Santos; Pimenta; Nobre (2007) a construção adequada de uma pergunta de pesquisa é essencial para definir as evidências necessárias à sua resolução, maximizando a recuperação de dados e evitando buscas desnecessárias. Ela pode abranger questões de diversas naturezas, como clínica, gestão de recursos e avaliação de sintomas.

Destarte, a estratégia PIO foi especialmente útil para desenvolver a revisão integrativa, de modo a proporcionar uma estrutura sólida na recuperação das evidências existentes.

À vista disso as palavras-chave utilizadas para a busca foram - *traceability, agricultural, technological tool* - cujas traduções respectivamente são; rastreabilidade, agropecuária, ferramenta tecnológica. A busca foi realizada na plataforma do periódico CAPES, cujas bases de dados foram *Scielo, Web of Science e Scopus*.

A análise das estratégias de busca e dos artigos selecionados foi conduzida com rigor metodológico, visando identificar a ferramenta mais eficiente para a rastreabilidade de produtos agropecuários. Este processo busca não apenas promover a inovação no setor produtivo, mas também avaliar, sob uma perspectiva prática e empírica, a eficácia dessas ferramentas no fortalecimento da cadeia produtiva, assegurando a qualidade e a segurança alimentar. Além disso, a análise pretende considerar o impacto dessas ferramentas no cumprimento de normativas regulatórias e na otimização da gestão sustentável dos recursos agropecuários.

Destarte, o estudo, concomitantemente explorou diferentes critérios de inclusão e exclusão. Os critérios de inclusão estabeleceram o período de 2019 a 2024, a fim de recuperar as ferramentas mais recentes, no idioma inglês. Já os critérios de exclusão consistiram em buscas anteriores à 2019, que não falem do tema e tratem de ferramentas que não tenham a eficiência requerida. No Quadro 1 estão apresentados os critérios mais claros e concisos, a fim de destacar a importância de cada aspecto na seleção da ferramenta mais eficiente para a rastreabilidade dos produtos agropecuários.

Quadro 1: Critérios de Inclusão e exclusão da ferramenta mais eficiente para a rastreabilidade

Critério	Inclusão	Exclusão
Relevância do Problema	Abordará diretamente questões de rastreabilidade;	Não está relacionado à rastreabilidade;
Do uso da ferramenta	Direcionará especificamente para rastreabilidade;	Ferramentas com finalidades distintas da fiscalização agropecuária;
Compatibilidade	Compatibilidade com as tecnologias do projeto;	Incompatibilidade tecnológica evidente;
Uso	Interface intuitiva;	Interface complexa e de difícil utilização;
Custo	Custo acessível em relação aos benefícios;	Custo proibitivo em comparação com as alternativas;
Documentação	Documentação abrangente e de fácil compreensão;	Documento insuficiente ou confuso;
Desempenho	Demonstrará eficácia e eficiência na rastreabilidade;	Desempenho inadequado para as necessidades do projeto;
Suporte Técnico	Suporte técnico efetivo e acessível;	Falta de suporte ou suporte ineficaz;
Experiência do Usuário	Boas avaliações de usuários anteriores;	Avaliação negativa consistente dos usuários;
Integração com outras ferramentas	Integração facilitada com outras ferramentas.	Falta de integração ou integração problemática;

Fonte: O autor (2024)

Tais critérios contribuíram para o direcionamento da pesquisa integrativa, de modo levaram a identificação dos estudos via base de dados na triagem dos registros excluídos.

Das Etapas Da Pesquisa

Neste estudo, o *software Rayyan* foi empregado de forma estratégica para otimizar a triagem inicial e a revisão integrativa da literatura, com foco específico na rastreabilidade agropecuária e no uso de ferramentas tecnológicas inovadoras. Desde a fase preliminar, foi realizada uma análise exploratória de títulos, resumos e palavras-chave, com o *Rayyan* desempenhando um papel essencial na organização e filtragem dos artigos de acordo com sua relevância para a temática central: o desenvolvimento de tecnologias aplicadas à rastreabilidade no setor agropecuário. A ferramenta possibilitou a visualização eficiente dos metadados, estruturados segundo a

estratégia PIO (P: rastreabilidade; I: agropecuária; O: ferramenta tecnológica), assegurando uma seleção inicial robusta e precisa dos documentos pertinentes ao estudo.

Na fase subsequente, procedeu-se à leitura minuciosa dos resumos, para em sequência apreciar os artigos em seu inteiro teor. O *Rayyan* foi novamente utilizado para gerir a avaliação detalhada dos artigos, permitindo o registro sistemático das decisões de inclusão ou exclusão, além de facilitar a inserção de comentários críticos, garantindo assim um processo de seleção rigoroso e alinhado com os critérios científicos. Essa abordagem metodológica não só aumentou a confiabilidade na escolha das fontes, mas também aprimorou a transparência e a replicabilidade do estudo.

As informações relevantes, extraídas ao longo dessa etapa, foram registradas em um formulário padronizado, criado especificamente para suportar a análise qualitativa dos dados. Este formulário foi concebido com campos detalhados para a coleta de informações metodológicas, resultados-chave e outras variáveis pertinentes à análise da eficiência das tecnologias de rastreabilidade na produção agropecuária. A integração do *Rayyan* com esse instrumento padronizado assegurou uma extração de dados metódica, promovendo consistência, rigor metodológico e robustez na avaliação qualitativa dos estudos incluídos.

Esse processo estruturado e sistemático não apenas facilitou a gestão do grande volume de dados derivados da literatura, como também contribuiu significativamente para a transparência e reprodutibilidade da revisão integrativa. O uso dessas ferramentas tecnológicas fortaleceu a robustez e a credibilidade dos achados, aprimorando a validade das conclusões e fornecendo uma base científica sólida para o desenvolvimento de novas tecnologias voltadas à rastreabilidade no setor agropecuário, com potencial impacto na otimização da produção e na sustentabilidade das cadeias produtivas.

III. Resultados

Os resultados obtidos a partir da pesquisa integrativa serão apresentados a seguir, com o intuito de oferecer uma análise aprofundada e crítica das evidências coletadas. Esses resultados não apenas sintetizam o conhecimento disponível sobre o tema investigado, mas também permitem uma avaliação comparativa das diferentes abordagens e tecnologias aplicadas à questão central do estudo. A discussão será conduzida de forma a identificar lacunas na literatura, tendências emergentes e o potencial impacto das ferramentas tecnológicas analisadas, fornecendo subsídios para futuras pesquisas e avanços práticos no campo investigado.

Seleção e caracterização dos estudos

A rastreabilidade de produtos na agropecuária tornou-se um componente essencial para o monitoramento de cadeias produtivas, especialmente em um contexto de crescente demanda por segurança alimentar, transparência e sustentabilidade (Sarkar; Sharma; Shardeo, 2024). Dessa forma, para Hallak; Tacsir, (2022); Hasan *et al.*, (2024) as ferramentas tecnológicas avançadas têm sido implementadas para permitir a rastreabilidade precisa, oferecendo meios para monitorar a origem, o processamento e o transporte de produtos agropecuários. As principais inovações nesse campo incluem tecnologias de identificação por radiofrequência (RFID), *blockchain* e sensores de Internet das Coisas (*IoT*), cada uma desempenhando papéis complementares na garantia da integridade e eficiência dos processos de rastreamento (Sarkar; Sharma; Shardeo, 2024).

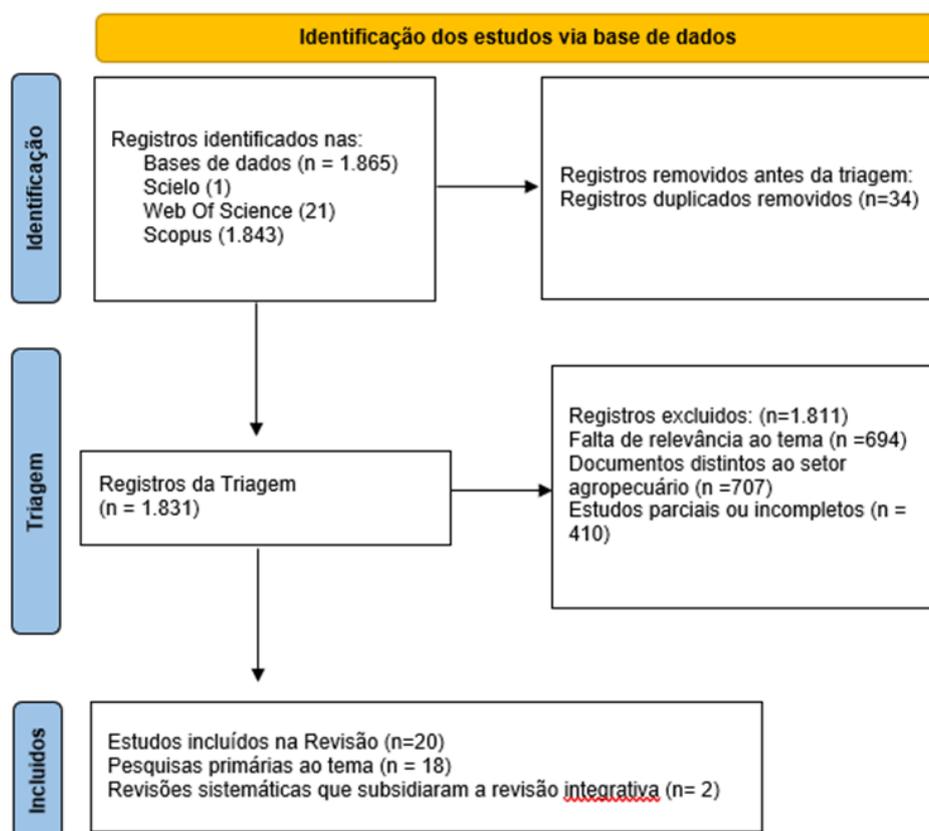
A implementação dessas tecnologias na rastreabilidade agropecuária não apenas garante uma cadeia de suprimentos mais segura e eficiente, como também responde a exigências de sustentabilidade ambiental e responsabilidade social (Hassoun *et al.*, 2024). O uso de RFID, *blockchain* e *IoT* permite uma visão integrada e detalhada de cada etapa da cadeia produtiva, assegurando que os produtos agropecuários sejam rastreados e monitorados de maneira eficiente (Araújo *et al.*, 2021; Majumdar; Mitra, 2024). Além de atender aos requisitos regulatórios e de mercado, essas ferramentas tecnológicas oferecem ao consumidor final a transparência necessária para tomar decisões informadas, contribuindo para a confiança e valorização de produtos rastreáveis (Hallak; Tacsir, 2022; Hrouga, 2024).

Dessa forma, as ferramentas de rastreabilidade inovadoras na agropecuária não apenas facilitam o gerenciamento de dados, mas também promovem a segurança alimentar e o cumprimento das regulamentações (Visconti *et al.*, 2020). Tais tecnologias, ao proporcionarem dados precisos e em tempo real, possibilitam um ambiente agropecuário mais sustentável e ético, onde a integridade das informações agrega valor tanto aos produtores quanto aos consumidores (Visconti *et al.*, 2020; Majumdar; Mitra, 2024). Visto isso, a rastreabilidade na agropecuária está alinhada com as tendências globais de sustentabilidade e inovação tecnológica, promovendo uma cadeia de valor integrada e comprometida com a qualidade e a responsabilidade ambiental (Dayoub *et al.*, 2024).

Neste contexto, uma revisão integrativa foi conduzida utilizando, paralelamente, o método PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*) para sintetizar as realizações tecnológicas relacionados às ferramentas agropecuária, cujo foco tratou das principais ferramentas apoiadoras para o sistema de rastreio agropecuário.

A busca resultou em um total de 1865 artigos (Figura 1): 1 artigo da base *SciELO*, 21 artigos da base *Web of Science* e 1843 artigos da base *Scopus*, dos quais 34 foram removidos por estarem duplicados entre as bases e 1831 foram excluídos após leitura de títulos e resumos conforme descritos a seguir:

Figura 1: Fluxograma do processo de seleção dos artigos relacionados às ferramentas de rastreabilidade de produtos agropecuários.



Dentre os 1.831 artigos inicialmente analisados, 694 foram excluídos por falta de relevância ao tema principal. Esse critério de exclusão foi adotado devido à necessidade de alinhar a revisão integrativa com o foco específico em ferramentas de rastreabilidade aplicadas a produtos agropecuários. Assim, trabalhos que tratam de tecnologias genéricas para o agronegócio ou abordagens amplas de monitoramento, sem conexão direta com a rastreabilidade, foram descartados.

A rastreabilidade, por definição, envolve o acompanhamento detalhado da trajetória de um produto ao longo de sua cadeia de valor, permitindo identificar a origem, as etapas de processamento, o transporte e o destino. Visto isso, para avaliar adequadamente as tecnologias de rastreabilidade, a seleção de literatura precisa ser restrita a artigos que forneçam *insights* sobre métodos e ferramentas específicos que possibilitem esse monitoramento. De todo modo, os estudos que tangenciam a temática sem oferecer contribuições específicas para o contexto agropecuário podem desviar o foco da revisão e comprometer a profundidade da análise, uma vez que as conclusões obtidas podem não ser diretamente aplicáveis aos sistemas de rastreabilidade desejados para o setor agropecuário.

Portanto, a exclusão desses 694 artigos se justifica pela busca de uma base teórica e prática robusta e coesa que ampare a revisão, garantindo que a literatura selecionada ofereça evidências e discussões diretamente relacionadas ao objetivo da pesquisa.

Dos 1.831 artigos inicialmente revisados, 707 foram excluídos por tratarem de rastreabilidade em setores distintos do agropecuário, como o farmacêutico e o automotivo. A exclusão desses artigos se baseou no princípio de alinhamento direto ao escopo de pesquisa. Dessa forma, a rastreabilidade agropecuária possui particularidades que diferem significativamente dos outros setores, considerando fatores como as características biológicas e perecíveis dos produtos agropecuários, a necessidade de conformidade com normas sanitárias e fitossanitárias, além da relação direta com a saúde pública e o meio ambiente.

Destarte, nos setores farmacêutico e automotivo, os objetivos de rastreabilidade focam majoritariamente no controle de qualidade, segurança do produto e proteção contra falsificações. No entanto, no setor agropecuário, o conceito de rastreabilidade vai além, abrangendo aspectos como segurança alimentar, sustentabilidade ambiental, e a redução de desperdícios. A rastreabilidade agropecuária frequentemente precisa lidar com a variabilidade de processos naturais, ciclos de vida específicos de animais e plantas, além da adaptação a condições climáticas, elementos que não estão presentes ou têm menor relevância em setores como o farmacêutico e o automotivo.

Por conseguinte, a inclusão de estudos centrados em outros setores poderia comprometer a profundidade e a aplicabilidade da análise ao desviar o foco para contextos e requisitos operacionais que não correspondem à realidade da rastreabilidade agropecuária. Assim, a exclusão desses artigos contribui para a construção de uma revisão mais específica e relevante, concentrada nos desafios e demandas exclusivos da rastreabilidade de produtos agropecuários.

Dos 1.831 artigos inicialmente considerados, 410 foram excluídos por serem estudos parciais ou incompletos, caracterizados pela ausência de informações essenciais sobre as fases de desenvolvimento do estudo ou pela presença de lacunas significativas. Esse critério de exclusão fundamenta-se na importância de selecionar trabalhos que ofereçam uma visão abrangente e metódica de cada etapa da pesquisa, incluindo desde o delineamento e coleta de dados até a análise e interpretação dos resultados.

Assim, os estudos parciais ou incompletos frequentemente deixam de incluir detalhes relevantes, como a metodologia empregada, o tamanho da amostra, a descrição dos instrumentos de coleta de dados ou os procedimentos de análise, o que compromete a capacidade de avaliação e replicação dos resultados. Dessa forma, em uma revisão científica, a integridade metodológica torna-se fundamental para assegurar a confiabilidade e validade dos achados. Nessa sequência, a ausência de qualquer fase do estudo pode introduzir vieses, limitar a compreensão dos resultados e dificultar a comparação com outros trabalhos sobre rastreabilidade agropecuária.

Seguindo tal lógica, as lacunas significativas nos estudos podem sugerir uma falta de rigor ou de embasamento científico, o que reduz a aplicabilidade dos resultados no contexto da rastreabilidade. Porquanto, a exclusão desses 410 artigos parciais ou incompletos foi necessária para garantir a inclusão apenas de estudos que ofereçam uma visão completa e cientificamente robusta. Dessa forma, a revisão pode gerar *insights* mais profundos e confiáveis sobre as tecnologias de rastreabilidade aplicáveis ao setor agropecuário, assegurando que as conclusões sejam fundamentadas em uma base sólida e compreensiva de dados e análises.

Dessa forma, 20 artigos foram selecionados para a revisão após a leitura completa e a verificação dos critérios de elegibilidade, dos quais 2 são revisões sistemáticas que subsidiam a revisão integrativa, e 18 são pesquisas primárias, cujos resultados serão analisados. A exclusão criteriosa de 1.831 artigos assegurou a relevância e a aplicabilidade dos estudos incluídos na revisão integrativa.

Os artigos selecionados para análise qualitativa foram examinados com o objetivo de identificar as principais ferramentas de rastreabilidade voltadas à produção agropecuária, além de mapear as tecnologias e inovações que atualmente impulsionam esse setor. Logo, a análise qualitativa permitiu uma compreensão aprofundada não apenas das ferramentas de rastreabilidade empregadas, mas também das tendências tecnológicas emergentes que estão sendo aplicadas para aprimorar a transparência, a segurança e a eficiência na cadeia produtiva agropecuária.

Destarte, a rastreabilidade agropecuária utiliza tecnologias avançadas, como cita Sarkar; Sharma; Shardeo, (2024) o *blockchain*, a *IoT* e a inteligência artificial monitora e documenta de forma precisa a origem, transporte, processamento e distribuição de produtos agropecuários, promovendo transparência, segurança e eficiência em toda a cadeia de produção alimentar. Assim, esses sistemas permitem o registro contínuo e imutável de informações ao longo da cadeia de suprimentos, assegurando a integridade dos dados e a possibilidade de auditorias precisas e em tempo real (Hrouga, 2024). Logo, a análise qualitativa facilita a compreensão das especificidades dessas tecnologias, incluindo suas capacidades, limitações e os contextos em que são mais eficazes.

Além disso, ao empregar uma análise qualitativa, tornou-se possível identificar as inovações que oferecem o maior potencial de adoção no setor agropecuário, como sensores e dispositivos de monitoramento ambiental, etiquetas RFID para identificação de animais, e *softwares* de integração de dados. De toda maneira, a análise qualitativa também permite explorar como essas ferramentas contribuem para atender a normas regulatórias e expectativas dos consumidores por produtos mais sustentáveis e rastreáveis. Visto isso, a rastreabilidade contribui para práticas agrícolas mais sustentáveis e transparentes, assegurando conformidade com legislações e certificações ambientais e sanitárias (Hassoun *et al.*, 2024).

Por conseguinte, a análise qualitativa dos artigos oferece uma visão ampla e contextualizada sobre o desenvolvimento e a implementação de ferramentas de rastreabilidade na produção agropecuária. A partir disso, torna-se possível identificar desafios, como barreiras tecnológicas e econômicas, e oportunidades de inovação, além de compreender como essas ferramentas podem evoluir para atender às demandas do mercado e das

regulamentações. A abordagem qualitativa, portanto, fornece uma base sólida para a avaliação crítica e o avanço das tecnologias de rastreabilidade agropecuária.

A análise dos 20 artigos selecionados destacam a importância das ferramentas de rastreabilidade de produtos agropecuários Visconti *et al.*, (2020); Araújo *et al.*, (2021); Wang; W; Y, (2022); Makinde *et al.*, (2022); Hallak; Tacsir, (2022); Stazi; Jovine, (2022); Neethirajan, (2023); Alshehri (2023); Cammarano *et al.*, (2023); Huang; Fu, (2023); Beveridge; Angelis; Mihajlov, (2024); Majumdar; Mitra (2024); Dayoub *et al.*, (2024); Hasan *et al.*, (2024); Hassoun *et al.*, (2024); Hrouga, (2024); Hung, (2024); Reitano *et al.*, (2024); Sarkar; Sharma; Shardeo, (2024); Yang *et al.*, (2024).

Análise dos estudos incluídos

Em fundamentação dos estudos incluídos há o Modelo de Aceitação de Tecnologia (TAM), que explica a adoção tecnológica com base na utilidade percebida (PU) e facilidade de uso percebida (PE), derivando de teorias comportamentais e estendendo-as ao contexto da aceitação de tecnologias (Huang; Fu, 2023). Na agropecuária, o TAM tem sido utilizado para avaliar a adoção de tecnologias por produtores, destacando que a percepção de facilidade de uso facilita o reconhecimento de valor prático, promovendo a intenção de adoção. Porquanto, estudos recentes ampliaram o modelo ao incluir variáveis como normas morais e apoio político, as quais influenciam as intenções e comportamentos dos agricultores, especialmente em relação à adoção de sistemas de rastreabilidade (Huang; Fu, 2023).

Diante da temática das ferramentas de rastreabilidade, o uso do *blockchain* (BCT) em cadeias globais de suprimento de alimentos (CGSAs), identificando benefícios e desafios que impactam diferentes atores dessas cadeias (Beveridge; Angelis; Mihajlov, 2024). Destaca-se a rastreabilidade e a segurança alimentar, desde agricultores até distribuidores, destacando benefícios socioeconômicos para pequenos agricultores e desafios regulatórios (Alshehri, 2023; Beveridge; Angelis; Mihajlov, 2024).

Nessa sequência, o sistema agroalimentar enfrenta desafios em rastreabilidade e segurança alimentar, essenciais para recuperar a confiança dos consumidores, abalada pela complexidade das cadeias de suprimentos (Hrouga, 2024; Reitano *et al.*, 2024). A tecnologia *blockchain* (BCT) oferece transparência e imutabilidade dos dados, promovendo maior segurança alimentar nesta cadeia de suprimento (Cammarano *et al.*, 2023; Majumdar; Mitra, 2024).

A proposta de uma solução sustentável para o setor alimentar, utilizando *blockchain* para monitorar integralmente o processo de cultivo, da criação da pecuária desde o campo à mesa (Hasan *et al.*, 2024). Assim, em paralelo, sensores *IoT* (Internet das Coisas) transmitem dados ambientais e da saúde dos produtos diretamente aos envolvidos por meio de contratos inteligentes, eliminando intermediários e promovendo transparência (Visconti *et al.*, 2020; Araújo *et al.*, 2021). Em sequência, a integração com IPFS² ajuda a combater práticas enganosas, reforçando a rastreabilidade e a autenticidade dos produtos. Prontamente, a solução permite que certificadoras avaliem metodologias agrícolas e acompanhem anomalias, apoiando-se em entidades sustentáveis como orgânicas, não transgênicas e na produção pecuária (Hasan *et al.*, 2024b). Além de assegurar a confiabilidade ao consumidor, a estrutura incentiva uma tomada de decisão transparente e responsável ao longo de toda a cadeia de suprimentos, com potencial para futuras melhorias no processo de certificação sustentável (Hallak; Tacsir, 2022; Wang; W; Y, 2022).

Isto posto, a visibilidade completa nas cadeias de suprimentos modernas ainda torna-se limitada, já que a maioria das soluções adotadas se restringe ao gerenciamento de dados apenas entre atores próximos na cadeia (Majumdar; Mitra, 2024). Nessa lógica, soluções convencionais frequentemente dependem de terceiros confiáveis ou de líderes na cadeia para gerir a informação, porém tais abordagens nem sempre são viáveis, seja por falta de um intermediário adequado ou pela relutância dos líderes em assumir esse papel (Hassoun *et al.*, 2024).

À vista disso, a tecnologia *blockchain* oferece uma alternativa ao possibilitar um livro-razão distribuído que converte a “fonte única da verdade” em uma “fonte comum da verdade” (Alshehri, 2023). Suas propriedades — descentralização, validação, imutabilidade e transparência dos dados — favorecem um ambiente colaborativo, resiliente e seguro, melhorando a confiança nas transações e reduzindo riscos cibernéticos (Yang *et al.*, 2024).

Outro estudo foi analisado, em conformidade com a aplicação de *blockchain* na cadeia de suprimentos, de maneira que explorou a integração com a estratégia de inventário gerenciada pelo fornecedor (VMI³). Nesse

² Para Hasan *et al.*, (2024b) são arquivos que incluem fotos das anomalias relatadas, bem como detalhes de análise sobre a porcentagem de nutrientes no solo, contaminantes e umidade são todos armazenados no *InterPlanetary File System* (IPFS).

³ Conforme Cammarano *et al.*, (2023) a combinação de VMI com tecnologias digitais, onde o produtor controla o estoque de atacadistas e varejistas utilizando *blockchain* e *IoT*. O inventário é atualizado automaticamente e registrado em um livro-razão distribuído, permitindo o monitoramento contínuo. Contratos inteligentes geram pedidos de reabastecimento com base em condições predefinidas, otimizando o processo e automatizando as atividades de gestão de pedidos, o que resulta em maior eficiência e agilidade na cadeia de suprimentos.

gerenciamento foi proposto o cenário que combina *blockchain* com tecnologias *IoT*, *RFID* e contratos inteligentes, resultando em melhorias de tempo de resposta e atendimento de pedidos.

No decorrer dos artigos selecionados aborda a necessidade de um modelo digital de Cadeia de Suprimentos (CSC) mais seguro, eficiente e inteligente, destacando o papel facilitador da Indústria 4.0 para a rastreabilidade de produtos agropecuários. Diante disso, propõe um modelo conceitual que utiliza tecnologias como *blockchain*, *IoT* e computação em nuvem para aumentar a visibilidade, transparência e eficiência no CSC, criando um sistema colaborativo, moderno e confiável (Hassoun *et al.*, 2024).

Assim, a estrutura apresentada serve como guia referencial para todos os participantes da CSC e demonstra os benefícios de combinar tecnologias para promover a digitalização a fim de aprimorar o sistema de rastreabilidade de produtos agropecuários (Stazi; Jovine, 2022; Neethirajan, 2023; Sarkar; Sharma; Shardeo, 2024). Porquanto, as contribuições teóricas e práticas incluem o desenvolvimento de um modelo que melhora a confiança e o compartilhamento de informações em tempo real entre os atores (Makinde *et al.*, 2022; Hung, 2024; Dayoub *et al.*, 2024).

Quadro 2: Resumo da Revisão Integrativa;

ID do artigo, autores	Título do artigo	Objetivo	Natureza da pesquisa
Huang; Fu, (2023)	Compreendendo as intenções dos agricultores de participar de sistemas de rastreabilidade: evidências do SEM-ANN-NCA	Como uma ferramenta tecnológica crucial para garantir a qualidade e a segurança dos produtos agrícolas, o sistema de rastreabilidade é de grande importância no setor agrícola.	Este estudo investiga os fatores que influenciam as intenções dos agricultores de participar de sistemas de rastreabilidade integrando normas morais e apoio político ao modelo de aceitação de tecnologia (TAM).
(Beveridge; Angelis; Mihajlov, 2024)	Benefícios e desafios da tecnologia <i>blockchain</i> nas cadeias globais de fornecimento de alimentos: visões da prática	O objetivo deste estudo é expandir o entendimento sobre o uso da tecnologia <i>blockchain</i> (BCT) nas cadeias globais de suprimento de alimentos (GFSCs), explorando seus benefícios e desafios.	O estudo é inovador ao ampliar a discussão sobre a BCT, indo além da rastreabilidade e segurança alimentar no midstream da GFSC e abordando também os atores <i>upstream</i> .
Reitano <i>et al.</i> , (2024)	Fatores que influenciam as percepções do consumidor sobre alimentos rastreados com tecnologia <i>blockchain</i> . Uma revisão sistemática da literatura.	O objetivo deste estudo é analisar as percepções dos consumidores sobre o uso da tecnologia <i>blockchain</i> (BCT) no setor agroalimentar, com foco na rastreabilidade e segurança alimentar	Os resultados identificam que confiança, facilidade de pagamento, percepção de rastreabilidade, risco percebido e segurança percebida são fatores essenciais que influenciam as percepções dos consumidores sobre alimentos rastreados pela <i>blockchain</i> .
Hasan <i>et al.</i> , (2024)	Garantia de agricultura inteligente: <i>IoT</i> e <i>blockchain</i> para produtos sustentáveis confiáveis.	O estudo propõe uma solução baseada em <i>blockchain</i> para promover a sustentabilidade alimentar, aproveitando a tecnologia para monitorar todo o processo de cultivo, desde o plantio até a colheita.	A pesquisa sugere que a ampliação dessa solução incluirá análises mais profundas sobre as complexidades da certificação de alimentos sustentáveis, visando aprimorar ainda mais o sistema proposto.
Hung, (2024)	O curioso caso da <i>blockchain</i> na China rural: desvendando poder, lucro e vigilância.	O objetivo deste estudo é analisar o uso do <i>blockchain</i> na China rural, onde a tecnologia, originalmente associada à descentralização, assume uma função de controle estatal e lucro corporativo.	A pesquisa examina como o <i>blockchain</i> , promovido como uma solução para melhorar as finanças e o rastreamento agrícolas, acaba por exacerbar os desequilíbrios de poder e incorporar os pequenos agricultores em sistemas financeiros globais e nacionais, sujeitando-os à exploração e vigilância.
Makinde <i>et al.</i> , (2022)	Investigando a adoção da tecnologia <i>Blockchain</i> em cadeias de suprimentos agroalimentares: análise de um modelo UTAUT	O estudo tem como objetivo investigar os fatores determinantes que influenciam a intenção e o uso real de plataformas de cadeia de suprimentos agroalimentares	A pesquisa baseia-se na Teoria Unificada de Aceitação e Uso de Tecnologia (UTAUT) e propõe um modelo conceitual expandido, validado

	estendido	orientadas por blockchain, em um contexto de globalização, mudanças nas demandas dos consumidores e impactos das mudanças climáticas.	empiricamente por meio da Modelagem de Equações Estruturais de Mínimos Quadrados Parciais, com dados de 175 empresas agroalimentares de oito países europeus.
Yang <i>et al.</i> , (2024)	Explorando <i>blockchain</i> e inteligência artificial em embalagens inteligentes para combater fraudes alimentares: uma revisão abrangente.	O objetivo desta pesquisa é explorar o potencial de integração das tecnologias de blockchain e inteligência artificial (IA) com embalagens inteligentes para combater a fraude alimentar.	A pesquisa destaca que, embora embalagens inteligentes sejam eficazes na prevenção de adulterações e na promoção de rastreabilidade, elas não garantem rastreabilidade completa na cadeia alimentar.
Dayoub <i>et al.</i> , (2024)	Melhorando a produção animal por meio da agricultura inteligente: possibilidades, obstáculos, resoluções e vantagens	O objetivo deste estudo é investigar as oportunidades e desafios da pecuária inteligente, utilizando tecnologias modernas para melhorar a eficiência, sustentabilidade e bem-estar animal.	O estudo recomenda o engajamento das partes interessadas para garantir a sustentabilidade a longo prazo.
Hrouga, (2024)	Rumo a um novo modelo conceitual de cadeia de suprimentos colaborativa digital baseado em tecnologias da Indústria 4.0: uma estrutura conceitual	O objetivo deste estudo é propor um modelo digital de cadeia de suprimentos colaborativa (CSC) baseado em tecnologias emergentes da Indústria 4.0, como <i>blockchain</i> , Internet das Coisas (IoT) e computação em nuvem (CC).	A pesquisa analisa como essas tecnologias podem habilitar mecanismos colaborativos e identificar os principais fatores que influenciam o cadeia de suprimentos
Sarkar; Sharma; Shardeo, (2024)	Um exame multi-método das barreiras à rastreabilidade nas cadeias de abastecimento digital de alimentos com capacidade para a indústria 5.0	O objetivo deste estudo é identificar e avaliar as barreiras que dificultam a rastreabilidade em cadeias de alimentos digitalizadas, habilitadas pelas tecnologias da Indústria 5.0.	A pesquisa utiliza uma abordagem mista, com análise fatorial exploratória (EFA) e cálculo probatório fuzzy (FERA), identificando 14 obstáculos principais. As três barreiras mais críticas incluem a infraestrutura digital limitada, o investimento de capital inadequado e a complexidade da cadeia de materiais.
Majumdar; Mitra, (2024)	Tecnologia Blockchain para a sociedade 4.0: uma revisão abrangente das principais aplicações, análise de requisitos, tendências de pesquisa, desafios e caminhos futuros	O objetivo desta pesquisa é revisar sistematicamente a literatura existente sobre a implementação de uma sociedade inteligente (Society 4.0) e identificar lacunas de pesquisa, com foco na integração de tecnologias como Blockchain, Inteligência Artificial (IA) e Internet das Coisas (IoT).	A revisão explora como o Blockchain, ao garantir segurança, privacidade e autenticidade de dados, pode ser aplicado a cenários voláteis e complexos, aprimorando a eficiência e a segurança das atividades humanas.
Hassoun <i>et al.</i> , (2024)	Rastreabilidade de alimentos 4.0 como parte da quarta revolução industrial: principais tecnologias facilitadoras	O objetivo desta pesquisa é revisar as técnicas convencionais e emergentes para rastreabilidade de alimentos na era da Indústria 4.0, com foco no conceito de Rastreabilidade de Alimentos 4.0 (FT 4.0).	A pesquisa busca explorar como tecnologias digitais como blockchain, Internet das Coisas, inteligência artificial e big data podem aprimorar a rastreabilidade, prevenir fraudes alimentares e fornecer informações confiáveis.
Neethirajan, (2023)	Tecnologias de Inteligência Artificial e Sensores na Exportação de Pecuária Láctea: Traçando uma Transformação Digital	O objetivo desta pesquisa é avaliar o impacto transformador da Inteligência Artificial (IA) e tecnologias de sensores na indústria de exportação de gado leiteiro, com foco na aplicação da Internet das Coisas (IoT) no	A pesquisa explora como a IA e a IoT podem melhorar a rastreabilidade, monitorar padrões comportamentais e o peso dos animais em tempo real, promovendo maior bem-estar animal e eficiência

		transporte de gado de longa distância.	operacional.
Alshehri,(2023)	Estrutura de internet das coisas assistida por <i>blockchain</i> na pecuária inteligente.	A pesquisa aborda a Pecuária Inteligente (SLF) como uma abordagem tecnológica para otimizar a viabilidade econômica, a eficiência operacional e a sustentabilidade ecológica na pecuária, com foco na pecuária extensiva..	O estudo também explora a aplicação da tecnologia <i>Blockchain</i> (BC) para aprimorar a rastreabilidade e segurança na cadeia de suprimentos de produtos pecuários. A integração dessas tecnologias visa superar desafios como a redução das emissões de gases de efeito estufa e a complexidade das tarefas operacionais, criando um sistema inteligente e sustentável para a pecuária.
Cammarano <i>et al.</i> , (2023)	<i>Blockchain</i> como fator habilitador para a implementação de tecnologias RFID e IoT no VMI: uma simulação na cadeia de suprimentos Parmigiano Reggiano	O estudo analisa a aplicação do blockchain no gerenciamento de cadeias de suprimentos (SCM), especificamente no setor Parmigiano Reggiano, visando resolver problemas operacionais e otimizar processos.	A pesquisa utiliza simulações para comparar os cenários e demonstra que a integração de blockchain com RFID e IoT automatiza a gestão de pedidos, reduz o tempo de entrega e melhora a satisfação do cliente.
Stazi; Jovine, (2022)	Rastreabilidade de alimentos na Europa, EUA e China: Direito comparado e Tecnologia regulatória	Analisa a rastreabilidade no setor alimentício sob uma perspectiva multidisciplinar, abordando seus desafios científicos, econômicos, legais e tecnológicos, além de explorar o impacto de tecnologias emergentes, como blockchain, na gestão de sistemas de rastreabilidade.	Avaliam sistemas de rastreabilidade integrados que oferecem mais benefícios que os individuais, permitindo maior diferenciação de produtos e atendendo melhor às exigências de governos e consumidores internacionais.
Wang; W; Y, (2022)	Sistemas de rastreabilidade como ferramenta de diferenciação nas cadeias de valor agroalimentares: um marco para políticas públicas na América Latina	Desenvolver uma classificação de sistemas de rastreabilidade para auxiliar acadêmicos e formuladores de políticas a utilizá-los como ferramenta de diferenciação nas cadeias de valor agroalimentares.	Descreve principalmente a tecnologia da Internet das Coisas baseada em RFID, combinada com a situação atual da construção de informações da pecuária da China, para explorar a aplicação e a estratégia da Internet das Coisas na indústria da pecuária, de modo a fornecer uma referência para o desenvolvimento da inovação industrial.
Araújo <i>et al.</i> , (2021)	Caracterizando o cenário da agricultura 4.0 — tendências emergentes, desafios e oportunidades.	Caracterizar o cenário atual da Agricultura 4.0 e fornecer diretrizes para facilitar a transição digital do setor agrícola, promovendo soluções sustentáveis e eficientes	A pesquisa destaca o impacto de tecnologias como Internet das Coisas (IoT), sensores, robótica, inteligência artificial e big data no avanço da Agricultura 4.0.
Visconti <i>et al.</i> , (2020)	Desenvolvimento de um Sistema de Rastreabilidade Agroalimentar Baseado em Sensores Gerenciado Remotamente por uma Plataforma de Software para Gestão Otimizada de Fazendas	Desenvolver um sistema inteligente de rastreabilidade e gerenciamento de fazenda baseado em IoT, otimizando as operações de irrigação e fertirrigação, além de monitorar a qualidade e condições dos produtos agroalimentares ao longo da cadeia de suprimentos.	O sistema WSN garantiu longa autonomia e baixo consumo de energia, reduzindo a necessidade de manutenção. Os testes operacionais do protótipo BLE e do sistema de rastreamento em cenários reais demonstraram resultados satisfatórios na monitorização de parâmetros essenciais para evitar falhas ou deterioração dos produtos ao longo da cadeia de suprimentos.

Das ferramentas tecnológicas de rastreabilidade da produção agropecuária

A segurança alimentar torna-se essencial para elevar a qualidade de vida e atender aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), pois alimentos inseguros comprometem a saúde pública e resultam em desperdícios (Huang; Fu, 2023). Nesse contexto, tecnologias de rastreabilidade, como a *Internet das Coisas* (IoT) e o *blockchain*, oferecem transparência e aumentam a confiança dos consumidores, rastreando cada etapa da cadeia produtiva, do campo ao consumidor final (Dayoub et al., 2024). Nesse passo, estudos indicam que consumidores estão dispostos a pagar um valor adicional por produtos rastreáveis, criando uma oportunidade econômica para produtores e intensificando a fiscalização pelos órgãos reguladores (Hassoun et al., 2024; Reitano et al., 2024). Contudo, a adoção dessas tecnologias requer uma percepção favorável dos produtores sobre seus benefícios, além de suporte político e social que facilitem essa transição (Hasan et al., 2024).

Destarte, as Cadeias Globais de Abastecimento Alimentar são redes complexas e dinâmicas que cresceram significativamente com a globalização, intensificando o movimento de alimentos entre áreas rurais e urbanas (Beveridge; Angelis; Mihajlov, 2024). Esse crescimento traz desafios que dificultam o cumprimento de metas como o ODS de fome zero e agravam as emissões de gases de efeito estufa (Hung, 2024). Além disso, a pandemia da COVID-19 expôs a vulnerabilidade das cadeias globais, destacando a necessidade de diversificação e descentralização nas redes de suprimento (Beveridge; Angelis; Mihajlov, 2024).

Para enfrentar esses desafios, cadeias de suprimentos estão investindo em tecnologias inovadoras, como o *blockchain*, que visa aumentar a transparência, rastreabilidade, descentralização e reduzir os impactos ambientais (Makinde et al., 2022; Hasan et al., 2024b). Apesar de promissora, a aplicação prática do *blockchain* ainda é limitada, e a literatura carece de estudos empíricos robustos sobre seus benefícios e desafios nos diversos segmentos das cadeias de suprimentos (Beveridge; Angelis; Mihajlov, 2024). Porquanto, a integração entre *blockchain*, certificação de alimentos e práticas sustentáveis, portanto, aponta para uma transformação significativa na indústria alimentícia (Hasan et al., 2024).

Diante disso, a combinação entre *blockchain* e IoT permite monitorar em tempo real a procedência e os métodos de produção, promovendo um ecossistema alimentar mais sustentável e transparente (Majumdar; Mitra, 2024). Visto isso, essa integração viabiliza certificações de alimentos orgânicos, não geneticamente modificados e com Boas Práticas Agrícolas (BPA), fornecendo dados imutáveis que asseguram a autenticidade e sustentabilidade dos produtos (Hasan et al., 2024b; Hung, 2024).

A Indústria 4.0 (I4.0) introduziu tecnologias digitais avançadas, como inteligência artificial, aprendizado de máquina, IoT e *big data*, transformando redes de fornecimento e aumentando a produtividade (Araújo et al., 2021; Cammarano et al., 2023; Neethirajan, 2023; Hassoun et al., 2024; Yang et al., 2024). Entretanto, o foco prioritário da I4.0 em eficiência econômica e tecnológica negligencia aspectos cruciais, como a sustentabilidade e o papel humano (Hrouga, 2024). Esta limitação impulsionou o desenvolvimento da Indústria 5.0 (I5.0), que incorpora os avanços da I4.0 mas prioriza a sustentabilidade e coloca a centralidade humana no centro dos processos (Sarkar; Sharma; Shardeo, 2024). No setor de cadeia de suprimentos de alimentos, a I5.0, de forma humanizada, busca estabelecer uma rastreabilidade transparente, a qualidade e a segurança alimentar, atendendo à demanda crescente por produtos sustentáveis (Wang; W; Y, 2022; Sarkar; Sharma; Shardeo, 2024b).

No entanto, a implementação da I5.0 enfrenta barreiras tecnológicas, organizacionais e ambientais que dificultam a adoção da rastreabilidade completa e transparente (Sarkar; Sharma; Shardeo, 2024). Diante disso, a estrutura Tecnologia, Organização e Meio Ambiente surge como uma ferramenta metodológica para avaliar essas barreiras, proporcionando uma análise integrada dos fatores que influenciam a adoção das práticas I5.0 nas cadeias de suprimentos (Hrouga, 2024; Sarkar; Sharma; Shardeo, 2024). Assim, para fortalecer a digitalização sustentável e humanizada das cadeias de fornecimento de alimentos, torna-se essencial abordar as principais barreiras na rastreabilidade, categorizando-as conforme seus impactos na implementação (Alshehri, 2023).

3.4 Cadeia de suprimentos para o estudo da rastreabilidade dos produtos agropecuários

As cadeias de abastecimento agroalimentares⁴, essenciais para conectar o setor agropecuário aos consumidores, integram processos complexos, desde a produção e armazenamento até a distribuição e consumo (Huang; Fu, 2023; Beveridge; Angelis; Mihajlov, 2024). Diante disso, compostas por múltiplas etapas e *stakeholders*, incluindo agricultores, distribuidores, processadores, entidades governamentais e consumidores, essas cadeias têm enfrentado desafios crescentes, como mudanças climáticas, crises globais e oscilações de demanda e valores éticos (Hasan et al., 2024; Reitano et al., 2024). Em um cenário marcado pela intensificação desses desafios, a cadeia de abastecimento agroalimentar precisa se adaptar continuamente para manter o fluxo ininterrupto de produtos e assegurar a segurança alimentar (Stazi; Jovine, 2022; Hasan et al., 2024).

⁴ Para Beveridge; Angelis; Mihajlov, (2024) os sistemas globais de cadeias de suprimentos de alimentos são usualmente analisados através de seus desafios estruturais nos diferentes segmentos interligados: no *upstream*, que abrange a produção primária (cultivo de lavouras, criação de gado e pesca); no *midstream*, que envolve etapas de processamento, logística e comercialização no atacado; e no *downstream*, que contempla a distribuição ao varejo e o consumo final.

Os riscos à integridade das cadeias agroalimentares são ampliados pela centralização de informações, que, embora facilite o controle, pode também levar à opacidade e a desequilíbrios informacionais (Makinde *et al.*, 2022). Por conseguinte, empresas e órgãos governamentais, muitas vezes, detêm o poder de selecionar quais dados compartilham, afetando a confiança dos consumidores, que exigem cada vez mais transparência antes de qualquer aquisição (Yang *et al.*, 2024). Nessa lógica, a digitalização e a descentralização emergem como alternativas importantes para melhorar a rastreabilidade e reduzir o impacto de falhas isoladas, as quais podem desestabilizar toda a cadeia (Makinde *et al.*, 2022; Dayoub *et al.*, 2024).

As vulnerabilidades das cadeias agroalimentares também se estendem à segurança e autenticidade dos produtos (Hrouga, 2024). Visto isso, a demanda por segurança alimentar, intensificada pela maior conscientização do consumidor, exige controle rigoroso da qualidade em toda a cadeia, envolvendo soluções como rastreabilidade e certificação para mitigar riscos de contaminação, rotulagem incorreta e fraudes (Sarkar; Sharma; Shardeo, 2024). Perante ao exposto, a autenticidade dos produtos é outro foco, com fraudes que incluem a substituição de ingredientes ou informações falsas sobre a origem e composição, o que compromete a confiabilidade do mercado e cria disparidades competitivas (Majumdar; Mitra, 2024).

De maneira geral, a digitalização parcial da cadeia de suprimentos, embora necessária para simplificar processos, logo torna-se limitada pela dependência de métodos manuais e papelada, gerando ineficiências e problemas de acessibilidade e redundância nos dados (Makinde *et al.*, 2022). Assim, o uso de bancos de dados descentralizados e a redução de intermediários através de tecnologias como *blockchain*, sensores, robótica, inteligência artificial, Big Data e IoT (Internet das Coisas) se mostram promissores para mitigar essas dificuldades e aumentar a resiliência e eficiência das cadeias agroalimentares (Araújo *et al.*, 2021).

A superação desses desafios exige uma abordagem integrada que inclua avanços tecnológicos, políticas públicas de suporte, investimentos em infraestrutura e pesquisa colaborativa (Visconti *et al.*, 2020). Para tanto, (Makinde *et al.*, 2022) informa que se torna necessário que formuladores de políticas, líderes da indústria e demais partes interessadas atuem conjuntamente no fortalecimento das cadeias agroalimentares, promovendo práticas sustentáveis e equitativas. Diante disso, essas ações possibilitam um sistema agroalimentar global mais seguro e sustentável, atendendo às demandas de consumidores conscientes e contribuindo para a segurança alimentar e a saúde pública em nível mundial (Wang; W; Y, 2022).

Tecnologia utilizada para desenvolver a ferramenta de rastreabilidade

O sistema agroalimentar, vital para suprir a crescente demanda mundial por alimentos, enfrenta desafios complexos, como a segurança e rastreabilidade dos produtos, que afetam diretamente a confiança dos consumidores (Reitano *et al.*, 2024). Diante disso, a rastreabilidade tornou-se essencial não apenas para atender exigências regulatórias, mas também para responder à demanda de consumidores mais conscientes sobre a procedência e qualidade dos alimentos (Hasan *et al.*, 2024b). Entretanto, a complexidade da cadeia, envolvendo múltiplos intermediários e etapas, amplia os riscos de fraudes e irregularidades, minando a confiança pública e aumentando a necessidade de uma gestão integrada e adaptada ao sistema agroalimentar (Hung, 2024).

Nesse cenário, a tecnologia *blockchain* (BCT) surge como uma alternativa para criar um sistema de registro seguro e imutável, permitindo que todas as partes na cadeia de suprimento compartilhem dados de forma transparente e auditável (Makinde *et al.*, 2022; Hrouga, 2024). A BCT possibilita a criação de um "livro-razão" descentralizado, no qual informações detalhadas sobre cada etapa da produção até o consumo são registradas, garantindo maior confiabilidade (Stazi; Jovine, 2022). Logo, isso facilita a detecção de fraudes, autenticidade na rotulagem e na origem dos alimentos, e inibe a introdução de produtos de qualidade inferior no mercado, contribuindo, portanto, para a segurança alimentar.

Destarte, a adoção dessa tecnologia depende amplamente da aceitação e confiança dos consumidores, que muitas vezes desconhecem os benefícios do BCT e podem ter preocupações quanto à privacidade e confiabilidade dos dados digitais (Alshehri, 2023). Assim, a implementação bem-sucedida exige campanhas de educação e conscientização para alinhar as expectativas do consumidor, além de investimentos robustos para adaptação tecnológica, o que constitui um desafio significativo para as entidades públicas (Majumdar; Mitra, 2024). O sucesso da BCT no setor agroalimentar, portanto, está intimamente ligado ao apoio e aceitação do consumidor, bem como à capacidade das empresas e órgãos reguladores de incorporar e expandir essa tecnologia em prol de uma cadeia de suprimentos mais transparente e confiável (Cammarano *et al.*, 2023).

Já o conceito da Indústria 5.0 (I5.0), que promove sistemas centrados não humanos, resilientes e sustentáveis, tem encontrado espaço no contexto na cadeia de suprimentos, especialmente em relação à rastreabilidade e transparência na cadeia de suprimentos (Sarkar; Sharma; Shardeo, 2024). A implementação da rastreabilidade digital, habilitada por tecnologias da I5.0, visa aumentar a confiança do consumidor por meio de sistemas de rastreamento aprimorados (Sarkar; Sharma; Shardeo, 2024). Dessa forma, se tornaram ainda mais cruciais após a pandemia de COVID-19, quando as preocupações com a higiene alimentar passou a ocupar um lugar de destaque (Hassoun *et al.*, 2024; Majumdar; Mitra, 2024; Sarkar; Sharma; Shardeo, 2024). Contudo, a adoção desse sistema digital enfrentou inúmeras barreiras que dificultaram a plena realização de seus objetivos,

barreiras estas que, até então, não foram devidamente especificadas e comprovadas na literatura (Hassoun *et al.*, 2024; Majumdar; Mitra, 2024).

Complementarmente, a transformação digital na rastreabilidade dos produtos agropecuários exige o desenvolvimento de sistemas que sejam mais seguros, inteligentes, eficientes e sustentáveis. Nesse contexto, a Indústria 4.0 (I4.0) pode atuar como um facilitador, embora ainda haja uma carência de estudos empíricos e teóricos que evidenciam as práticas de digitalização na rastreabilidade desses produtos (Araújo *et al.*, 2021; Hassoun *et al.*, 2024). Em seqüências, as tecnologias da I4.0, como *blockchain*, *Internet das Coisas* (IoT) e Computação em Nuvem, têm potencial para transformar a rastreabilidade dos produtos agropecuários, mas a integração de múltiplas tecnologias para esse propósito ainda carece de investigação (Hassoun *et al.*, 2024; Majumdar; Mitra, 2024; Sarkar; Sharma; Shardeo, 2024).

Em seqüência ao estudo, a utilização de RFID e GPS aprimora o rastreamento de gado, garantindo maior rastreabilidade e segurança alimentar (Hallak; Tacsir, 2022; Wang; W; Y, 2022). Esses sistemas também promovem práticas sustentáveis, otimizando a alocação de recursos (Dayoub *et al.*, 2024). A utilização do rastreamento de gado por RFID e GPS representa avanços positivos para a indústria, com o potencial de aumentar a eficiência, promover práticas humanas e contribuir para a sustentabilidade geral (Hallak; Tacsir, 2022; Dayoub *et al.*, 2024).

Exigência do consumidor sustentável

A confiança desempenha um papel central na formação das percepções dos consumidores sobre inovações, especialmente em ambientes de alta incerteza, onde se destaca como um fator essencial para a adoção de novas tecnologias (Huang; Fu, 2023). Estudos complementares revelam que, devido a preocupações crescentes com segurança e qualidade, os consumidores tendem a confiar mais em alimentos cujos rastreios garantam maior transparência e aderência à informação do que nas características intrínsecas do produto (Hassoun *et al.*, 2024; Reitano *et al.*, 2024).

Para Visconti *et al.*, (2020); Sarkar; Sharma; Shardeo, (2024) salientam que os consumidores têm dado preferência aos chamados atributos de credibilidade, que, embora difíceis de verificar, refletem as alegações nos rastreios dos produtos. Nesse contexto, a tecnologia *blockchain* (BCT), como exemplo, atende bem a essa necessidade, pois oferece uma garantia de imutabilidade dos dados ao longo de toda a cadeia de suprimentos, promovendo produtos transparentes, seguros e de alta qualidade para o consumidor final (Majumdar; Mitra, 2024). De modo semelhante, Makinde *et al.*, (2022); Hassoun *et al.*, (2024) indicam que a rastreabilidade de alimentos por meio tecnológicos são valorizadas pelos consumidores, que buscam mais informações sobre materiais, ingredientes, processos de embalagem e segurança alimentar, vendo na tecnologia uma solução eficaz para reforçar sua confiança.

A esse respeito, Wang; W; Y, (2022); Cammarano *et al.*, (2023); Hasan *et al.*, (2024) afirmam que as ferramentas tecnológicas de rastreabilidade facilitam o acesso dos consumidores a informações agroalimentares, atendendo às suas expectativas de proteção de direitos e interesses. De forma complementar, Hallak; Tacsir, (2022); Reitano *et al.*, (2024) ressaltam que a implementação das ferramentas tecnológicas de rastreabilidade na cadeia de suprimentos ajuda a mitigar preocupações de segurança alimentar entre os consumidores, fortalecendo a confiança nos processos de produção.

Para Reitano *et al.*, (2024), por meio de uma pesquisa focada na disposição dos consumidores em pagar por alimentos rastreados, observam que, diante de dúvidas sobre a integridade do sistema tradicional de rastreabilidade, a confiança na qualidade do produto é comprometida. Esse estudo aponta que as ferramentas tecnológicas de rastreabilidade, ao oferecer um sistema descentralizado e transparente, podem resolver problemas de confiança e assegurar a qualidade e segurança dos produtos alimentícios. Essa conclusão é corroborada por Visconti *et al.*, (2020), que destacam que consumidores insatisfeitos com a rastreabilidade tradicional podem ter suas expectativas atendidas pelas ferramentas tecnológicas de rastreabilidade, que trazem melhorias globais na gestão agroalimentar.

Em síntese, os estudos indicam que os consumidores valorizam a segurança das transações realizadas via ferramentas de rastreabilidade e esperam que a tecnologia proteja as informações que recebem (Araújo *et al.*, 2021; Hasan *et al.*, 2024; Hrouga, 2024). Dessa forma, ao atender a essas expectativas, a confiança exerce um efeito positivo no comportamento do consumidor, incentivando a adoção das ferramentas tecnológicas (Chen *et al.*, 2023).

IV. Considerações Finais

Os sistemas integrados de rastreabilidade têm se tornado cada vez mais relevantes no contexto da segurança alimentar, especialmente em mercados internacionais, mesmo quando não são diretamente exigidos pelas autoridades sanitárias dos países de destino. Esses sistemas, ao garantir a rastreabilidade eficaz de produtos em situações de ameaças sanitárias ou fitossanitárias, proporcionam uma ferramenta de diferenciação no mercado, permitindo o acompanhamento transparente e eficiente dos produtos (Hallak; Tacsir, 2022). Esse aspecto tem se

mostrado particularmente relevante durante crises sanitárias, como a pandemia de COVID-19, que evidenciou a importância da rastreabilidade em tempos de emergência.

A implementação de sistemas integrados de rastreabilidade pode ser uma resposta eficaz às crescentes demandas do mercado e das políticas públicas. Logo, ao integrar tecnologias e processos de diversas entidades, esses sistemas proporcionam economias de escala, padronização e um uso mais eficiente das informações, além de fortalecer a reputação dos produtos no mercado global. A integração também facilita a adaptação a novos requisitos, como aqueles impostos por surtos de doenças ou mudanças nas regulamentações sanitárias, tornando os produtos mais atraentes para consumidores cada vez mais exigentes quanto à segurança e à origem dos alimentos.

O recente avanço tecnológico, com a incorporação da Indústria 5.0 (I5.0), traz implicações diretas para a Cadeia de Suprimentos de Alimentos (CSA), especialmente no que se refere à rastreabilidade de produtos agropecuários. A I5.0, que promove sistemas resilientes, centrados no ser humano e sustentável, surge como uma resposta às crescentes demandas por transparência e segurança alimentar, intensificadas após a pandemia de COVID-19. Neste contexto, o conceito de uma Cadeia de Suprimentos Colaborativa, apoiada por tecnologias da Indústria 4.0 (I4.0), como *blockchain*, *Internet das Coisas* (IoT), RFID e computação em nuvem, oferece uma base para melhorar a visibilidade e rastreabilidade dos produtos agropecuários. Essa integração tecnológica é fundamental para atender aos requisitos de segurança e confiança, embora traga desafios estruturais e de implementação, que ainda são pouco explorados na literatura (Hassoun *et al.*, 2024).

As entidades governamentais desempenham importância nesse cenário, regulamentando, monitorando e incentivando a adoção dessas tecnologias, criando um ambiente de confiança para consumidores e produtores. Além disso, a governança da rastreabilidade digital exige um comprometimento em nível federal e regional para fortalecer a infraestrutura tecnológica e garantir a eficiência e segurança dos sistemas envolvidos. Essa transformação digital da CSA exige não apenas a implementação das tecnologias da I4.0 e I5.0, mas também a criação de um marco regulatório robusto que assegure a interoperabilidade e a integridade dos dados ao longo de toda a cadeia de suprimentos.

Este estudo propõe um modelo digital conceitual com a junções das tecnologias para mapear barreiras e facilitadores da digitalização da cadeia de suprimentos agropecuária (CSA), visando à promoção de sistemas de rastreabilidade mais eficientes e confiáveis. Como limitação, o estudo destaca seu escopo restrito, tanto em termos geográficos quanto de especialização, o que limita a aplicabilidade generalizada dos resultados. Recomenda-se que futuras pesquisas investiguem a interdependência entre barreiras, o papel dos incentivos e a cooperação entre os diferentes atores verticais e horizontais da cadeia. O fortalecimento das estratégias de sustentabilidade e governança digital, com apoio governamental, é essencial para consolidar um sistema de produção agropecuário mais resiliente, transparente e sustentável.

Referências

- [1] Alshehri, Mohammed. Blockchain-Assisted Internet Of Things Framework In Smart Livestock Farming. *Internet Of Things*, V. 22, P. 100739, 2023.
- [2] Araújo, Sara Oleiro Et Al. Characterising The Agriculture 4.0 Landscape—Emerging Trends, Challenges And Opportunities. *Agronomy*, V. 11, N. 4, P. 667, 2021.
- [3] Beveridge, Ivana; Angelis, Jannis; Mihajlov, Martin. Benefits And Challenges With Blockchain Technology In Global Food Supply Chains: Views From The Practice. *British Food Journal*, V. 126, N. 7, P. 2769-2786, 2024.
- [4] Cammarano, Antonello Et Al. Blockchain As Enabling Factor For Implementing Rfid And Iot Technologies In Vmi: A Simulation On The Parmigiano Reggiano Supply Chain. *Operations Management Research*, V. 16, N. 2, P. 726-754, 2023.
- [5] Dayoub, Moammar Et Al. Enhancing Animal Production Through Smart Agriculture: Possibilities, Hurdles, Resolutions, And Advantages. *Ruminants*, V. 4, N. 1, P. 22-46, 2024.
- [6] Fao (Food And Agriculture Organization Of The United Nations). The State Of Food Security And Nutrition In The World 2023: Building Resilience For Food Security And Nutrition. Roma: Fao, 2023. Disponível Em: <https://www.fao.org/publications/sofi/2023/en>. Acesso Em: 20 Set. 2024.
- [7] Hallak, Juan Carlos; Tacsir, Andrés. Traceability Systems As A Differentiation Tool In Agri-Food Value Chains: A Framework For Public Policies In Latin America. *Journal Of Agribusiness In Developing And Emerging Economies*, V. 12, N. 4, P. 673-688, 2022.
- [8] Hrouga, Mustapha. Towards A New Conceptual Digital Collaborative Supply Chain Model Based On Industry 4.0 Technologies: A Conceptual Framework. *International Journal Of Quality & Reliability Management*, V. 41, N. 2, P. 628-655, 2023.
- [9] Hasan, Haya R. Et Al., Smart Agriculture Assurance: Iot And Blockchain For Trusted Sustainable Produce. *Computers And Electronics In Agriculture*, V. 224, P. 109184, 2024.
- [10] Hassoun, Abdo Et Al. Food Traceability 4.0 As Part Of The Fourth Industrial Revolution: Key Enabling Technologies. *Critical Reviews In Food Science And Nutrition*, V. 64, N. 3, P. 873-889, 2024.
- [11] Huang, Yatao; Fu, Shaoling. Understanding Farmers' Intentions To Participate In Traceability Systems: Evidence From Sem-Ann-Nca. *Frontiers In Sustainable Food Systems*, V. 7, P. 1246122, 2023.
- [12] Hung, Alvin Hoi-Chun. The Curious Case Of Blockchain In Rural China: Unravelling Power, Profit, And Surveillance. *Big Data & Society*, V. 11, N. 2, P. 20539517241259674, 2024.
- [13] Majumdar, Parijata; Mitra, Sanjoy. Blockchain Technology For Society 4.0: A Comprehensive Review Of Key Applications, Requirement Analysis, Research Trends, Challenges And Future Avenues. *Cluster Computing*, P. 1-23, 2024.
- [14] Neethirajan, Suresh. Artificial Intelligence And Sensor Technologies In Dairy Livestock Export: Charting A Digital Transformation. *Sensors*, V. 23, N. 16, P. 7045, 2023.

- [15] Onu (Organização Das Nações Unidas). 2015. Relatório De Desenvolvimento Humano 2015: O Trabalho Como Motor Do Desenvolvimento Humano. Nova York: Pnud, 2015. Disponível Em: https://hdr.undp.org/sites/default/files/2015_human_development_report.pdf. Acesso Em: 20 Set. 2024.
- [16] Pnuma (Programa Das Nações Unidas Para O Meio Ambiente). Alimentos: Desperdício Alimentar E Impacto Ambiental. Nairobi: Pnuma, 2023. Disponível Em: <https://www.unep.org/resources/report-food-waste-and-climate-change>. Acesso Em: 20 Set. 2024.
- [17] Reitano, Matilde Et Al. Factors Influencing Consumer Perceptions Of Food Tracked With Blockchain Technology. A Systematic Literature Review. *Applied Food Research*, P. 100455, 2024.
- [18] Sarkar, Bishal Dey; Sharma, Isha; Shardeo, Vipulesh. A Multi-Method Examination Of Barriers To Traceability In Industry 5.0-Enabled Digital Food Supply Chains. *The International Journal Of Logistics Management*, 2024.
- [19] Stazi, Andrea; Jovine, Riccardo. Food Traceability In Europe, The Us And China: Comparative Law And Regulatory Technology. *Biolaw Journal*, N. 2, 2022.
- [20] Toader, Diana-Cezara; Rădulescu, Corina Michaela; Toader, Cezar. Investigating The Adoption Of Blockchain Technology In Agri-Food Supply Chains: Analysis Of An Extended Utaut Model. *Agriculture*, V. 14, N. 4, P. 614, 2024.
- [21] Visconti, Paolo Et Al. Development Of Sensors-Based Agri-Food Traceability System Remotely Managed By A Software Platform For Optimized Farm Management. *Sensors*, V. 20, N. 13, P. 3632, 2020.
- [22] Yang, Yadong Et Al. Exploring Blockchain And Artificial Intelligence In Intelligent Packaging To Combat Food Fraud: A Comprehensive Review. *Food Packaging And Shelf Life*, V. 43, P. 101287, 2024.
- [23] Wang, Gui. Research And Analysis Of Rfid-Based Internet Of Things Technology For Animal Husbandry. In: *International Conference On Biometrics, Microelectronic Sensors, And Artificial Intelligence (Bmsai)*. Spie, 2022. P. 161-166.