ReGeo ISSN: 2177-3246

TECNOLOGIAS UTILIZADAS E IMPLICAÇÕES FUTURAS PARA RASTREABILIDADE DIGITAL NA CADEIA LEITEIRA

TECHNOLOGIES USED AND FUTURE IMPLICATIONS FOR DIGITAL TRACEABILITY IN THE DAIRY SUPPLY CHAIN

TECNOLOGÍAS UTILIZADAS E IMPLICACIONES FUTURAS PARA LA TRAZABILIDAD DIGITAL EN LA CADENA LÁCTEA

https://doi.org/10.56238/revgeov17n9-208

Data de submissão: 15/08/2026 **Data de publicação:** 29/09/2026

Fernanda Nunes Maciel
Doutoranda em Administração
Instituição: Universidade Federal de Lavras (UFLA)
E-mail: fernandanunesmaciell@gmail.com
Orcid: https://orcid.org/0000-0002-1871-105X
Lattes: http://lattes.cnpq.br/1219902145140074

Mateus da Mata Melo
Doutorando em Administração
Instituição: Universidade Federal de Lavras (UFLA)
E-mail: mateus17mello@gmail.com
Orcid: https://orcid.org/0000-0001-6805-5997
Lattes: http://lattes.cnpq.br/9623818570394195

Gustavo Nunes Maciel
Doutor em Administração
Instituição: Universidade Federal de Lavras (UFLA)
E-mail: gustavomaciel@ufla.br
Orcid: https://orcid.org/0000-0001-5867-3126
Lattes: http://lattes.cnpq.br/9029061982744083

Athila Leandro de Oliveira
Doutor em Ciências Ambientais e Florestais
Instituição: Universidade Federal de Lavras (UFLA)
E-mail: athila_mg@hotmail.com
Orcid: https://orcid.org/0000-0002-9455-8237
Lattes: http://lattes.cnpq.br/3300910258884001

Frederico Miranda de Sá
Mestrando em Entomologia
Instituição: Universidade Federal de Lavras (UFLA)
E-mail: frederico.mirandasa@hotmail.com
Orcid: https://orcid.org/0009-0001-6081-1433
Lattes: http://lattes.cnpq.br/8927205216671219

ReGeo

ISSN: 2177-3246

Gisleine do Carmo
Doutora em Administração
Instituição: Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI)
E-mail: gisleinecarmo95@gmail.com
Orcid: https://orcid.org/0000-0002-7260-5063
Lattes: http://lattes.cnpq.br/1246569703152616

Paulo Henrique Montagnana Vicente Leme
Doutor em Administração
Instituição: Universidade Federal de Lavras (UFLA)
E-mail: paulo.leme@ufla.br
Orcid: https://orcid.org/0000-0003-4174-5642
Lattes: http://lattes.cnpq.br/8203011955597072

Jaqueline Severino da Costa
Doutora em Economia Aplicada
Instituição: Universidade Federal de Lavras (UFLA)
E-mail: jaqueline.s.costa@ufla.br
Orcid: https://orcid.org/0000-0002-8822-4687
Lattes: http://lattes.cnpq.br/9364392921051567

RESUMO
O artigo apresenta uma revisão narrativa acerca da utilização da rastreabilidade digital na cadeia produtiva do leite, destacando tecnologias emergentes, impactos produtivos e institucionais, e os desafios enfrentados. Foram analisados 32 artigos que mostram o aumento do uso de tecnologias como blockchain, Internet das Coisas (IoT) e inteligência artificial, que promovem transparência, segurança alimentar e eficiência logística. A rastreabilidade digital auxilia a governança, facilita as certificações e amplia o acesso a mercados. Entretanto, a implementação enfrenta obstáculos técnicos (interoperabilidade, infraestrutura e segurança), sociais (resistência à mudança e inclusão digital) e institucionais (coordenação entre os elos da cadeia). A pesquisa também destaca lacunas na literatura, como a necessidade de estudos aplicados sobre interoperabilidade, inclusão de pequenos produtores e valorização pelo consumidor.

Palavras-chave: Blockchain. Internet das Coisas. Agricultura 4.0. Sustentabilidade Agroindustrial.

ABSTRACT
This article presents a narrative review of the use of digital traceability in the dairy supply chain, highlighting emerging technologies, productive and institutional impacts, and the challenges faced. Thirty-two articles were analyzed, showing the growing use of technologies such as blockchain, the Internet of Things (IoT), and artificial intelligence, which promote transparency, food safety, and logistical efficiency. Digital traceability supports governance, facilitates certifications, and expands market access. However, implementation faces technical obstacles (interoperability, infrastructure, and security), social obstacles (resistance to change and digital inclusion), and institutional obstacles (coordination among the links in the chain). The research also highlights gaps in the literature, such as the need for applied studies on interoperability, the inclusion of small producers, and consumer valuation.

Keywords: Blockchain. Internet of Things. Agriculture 4.0. Agro-industrial Sustainability.

RESUMEN
El artículo presenta una revisión narrativa sobre el uso de la trazabilidad digital en la cadena láctea, destacando las tecnologías emergentes, los impactos productivos e institucionales y los desafíos enfrentados. Se analizaron 32 artículos que muestran el aumento del uso de tecnologías como blockchain, Internet de las Cosas (IoT) e inteligencia artificial, que promueven la transparencia, la seguridad alimentaria y la eficiencia logística. La trazabilidad digital apoya la gobernanza, facilita las certificaciones y amplía el acceso a los mercados. Sin embargo, la implementación enfrenta obstáculos técnicos (interoperabilidad, infraestructura y seguridad), sociales (resistencia al cambio e inclusión digital) e institucionales (coordinación entre los eslabones de la cadena). La investigación también destaca lagunas en la literatura, como la necesidad de estudios aplicados sobre interoperabilidad, inclusión de pequeños productores y valoración por parte del consumidor.

Palabras clave: Blockchain. Internet de las Cosas. Agricultura 4.0. Sostenibilidad Agroindustrial.

1 INTRODUÇÃO

A cadeia produtiva do leite constitui um setor basilar do agronegócio, com alta importância em escala global no âmbito agroalimentar, abrangendo desde a produção primária do leite até o processamento, a embalagem e a entrega aos consumidores finais (Mehannaoui *et al.*, 2025). Essa rede é complexa e envolve múltiplos atores para que a qualidade sanitária dos produtos lácteos possa ser garantida, uma vez que se trata de um produto perecível (Melissari *et al.*, 2024). Assim, garantir a qualidade e a rastreabilidade ao longo da cadeia apresenta-se como um grande desafio do mercado lácteo.

Nesse contexto, para que haja um funcionamento eficiente da cadeia láctea, é necessário combater os problemas causados pelas limitações dos sistemas tradicionais, como registros em papel ou utilização de plataformas isoladas, que dificultam o compartilhamento das informações e favorecem a ineficiência e a possível ocultação de fraudes (Longo; Nicoletti; Padovano, 2020). Dessa forma, para superar as limitações de modelos tradicionais centralizados e promover uma maior transparência e eficiência logística, a utilização da rastreabilidade digital como ferramenta emerge como uma solução eficiente (Serrano-Torres *et al.*, 2025). A rastreabilidade digital auxilia na garantia de um produto de alta qualidade e de um controle logístico otimizado durante toda a cadeia, permitindo o compartilhamento de informações desde a origem do material, o que garante maior segurança alimentar e pode aumentar a intenção de compra do consumidor (Krishnan; Ganesan, 2025).

Como um meio de modernização e automação digital no setor agropecuário, incluindo a indústria de laticínios, a adoção de tecnologias como a Internet das Coisas (IoT), *blockchain* e outras *Distributed Ledger Technologies* (DLTs) tem sido implementada, visto que promovem monitoramento em tempo real, coleta automatizada de dados e oferecem registros transparentes, imutáveis e seguros para a indústria (Xiong *et al.*, 2020). Exemplos dessa modernização da cadeia produtora de leite podem ser vistos no conceito de "*smart farming*" e no uso de sensores IoT para a saúde e o manejo animal, demonstrando como a integração dessas tecnologias é vista como fundamental para criar cadeias mais eficientes e seguras (Demestichas *et al.*, 2020).

Contudo, mesmo com a implementação dessas tecnologias digitais na indústria e um aumento no reconhecimento da importância da rastreabilidade na cadeia produtora de leite, a literatura científica ainda carece de estudos sobre os impactos e desafios da rastreabilidade digital na cadeia produtiva de leite (Mangla *et al.*, 2021). As pesquisas existentes limitam-se, frequentemente, a teorias ou experimentações não estruturadas, colocando em foco aspectos isolados, como a integração da IoT ou o desempenho, e não oferecendo um amplo panorama das aplicações em toda a cadeia de laticínios

(Mehannaoui *et al.*, 2025). Assim, existe uma lacuna de conhecimento sistematizado sobre o funcionamento dessas tecnologias nas operações da cadeia produtiva do leite.

Diante desse panorama, percebe-se a necessidade de uma análise da literatura atual, capaz de mapear como a rastreabilidade digital tem sido abordada no setor, bem como identificar as tecnologias emergentes envolvidas e os impactos associados à sua adoção. Assim, esta revisão narrativa tem como objetivo interpretar como a literatura tem tratado a rastreabilidade digital na cadeia do leite, destacando as tecnologias emergentes associadas, os efeitos produtivos e institucionais relatados, os desafios técnicos e sociais enfrentados, e os caminhos apontados para sua consolidação como base para inovação, governança e sustentabilidade no setor lácteo.

O artigo é composto por cinco seções principais. A introdução apresenta o contexto da cadeia do leite, a relevância da rastreabilidade digital e o objetivo da pesquisa. Em seguida, o referencial teórico discute os conceitos centrais, as tecnologias aplicadas e os desafios da transformação digital no setor lácteo. A metodologia descreve os procedimentos da revisão narrativa realizada. Na sequência, os resultados e a discussão são organizados em categorias temáticas que contemplam abordagens conceituais, tecnologias utilizadas, impactos produtivos e institucionais, além de desafios técnicos e sociais. A última subseção dessa seção sintetiza os caminhos para a consolidação da rastreabilidade e propõe uma agenda de pesquisas futuras. Por fim, a conclusão retoma os principais achados, destaca contribuições teóricas e práticas e aponta limitações e oportunidades para novos estudos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 RASTREABILIDADE DIGITAL

A rastreabilidade digital envolve a capacidade de registrar e acompanhar, de maneira contínua e automatizada, cada etapa de um produto ao longo da cadeia produtiva por meio de tecnologias digitais como *blockchain,* Internet das Coisas (IoT), inteligência artificial (IA) e computação em nuvem (Surasak *et al*., 2019). Ainda de acordo com os autores, diferentemente dos sistemas analógicos e manuais, a digitalização possibilita a captura de dados em tempo real e a geração simultânea de históricos.

Na agroindústria, a rastreabilidade aparece como um ponto central devido à complexidade e à perecibilidade de produtos como leite, queijo e outros derivados (Rocchetti; O'Callaghan, 2021). Para Mangla *et al.* (2021), a rastreabilidade digital permite aumentar a eficiência operacional e reduzir as perdas logísticas, além de oferecer maior transparência aos consumidores. Ademais, a rastreabilidade digital contribui diretamente para a sustentabilidade, por meio da otimização de recursos, da redução

de desperdícios e da facilitação do monitoramento de indicadores ambientais, como emissões de gases e uso de água (Hawashin *et al.*, 2025).

A rastreabilidade tradicional é caracterizada por registros físicos, documentos manuais e etiquetas impressas. Esse modelo traz limitações no que se refere à confiabilidade dos dados e à rapidez de resposta a imprevistos alimentares (Khanna *et al.*, 2022). Em contrapartida, a rastreabilidade digital utiliza tecnologias que promovem a descentralização dos registros e acesso em tempo real aos dados da cadeia (Rocchetti; O'Callaghan, 2021). A rastreabilidade digital auxilia no atendimento às normas de certificações ambientais, sanitárias e de origem, como as normas HACCP, ISO 22000 e selos de indicação geográfica (Malik; Gahlawat; Mor, 2023). Essa garantia de registros confiáveis facilita inspeções, reduzindo custos e acelerando os processos de verificação (Xiong *et al.*, 2020).

A aplicação da rastreabilidade digital é particularmente relevante em países com produção fragmentada, como no caso brasileiro, em que diversos produtores são pequenos ou médios e têm dificuldade para atender às exigências. Nesse âmbito, plataformas acessíveis e de baixo custo, com uso de *blockchain* e IoT, podem garantir a inclusão desses produtores nos mercados certificados (Mangla *et al.*, 2021).

2.2 TECNOLOGIAS APLICADAS À RASTREABILIDADE

A origem da *blockchain* está diretamente ligada à criação do *Bitcoin*, e seu desenvolvimento como tecnologia para viabilização da criptomoeda, um tipo de "dinheiro eletrônico" descentralizado baseado em uma rede *peer-to-peer*, onde a *blockchain* funcionaria como um registro público e imutável de todas as transações realizadas (Nakamoto, 2008). As criptomoedas são apenas uma das aplicações dessa tecnologia (Tapscott; Tapscott, 2016). Porém, para os mesmos autores, a tecnologia *blockchain* não se resume a criptomoedas. Isso porque o uso da *blockchain* vai muito além do setor financeiro, sendo aplicada em diferentes áreas para garantir transparência, segurança e descentralização.

No contexto da *blockchain*, deve-se destacar que há um subconjunto de plataformas com diferentes modelos, os quais, a partir de suas características, podem ser apropriados para diferentes usos (Zheng *et al.*, 2017). *Blockchains* públicas, voltadas para redes abertas e *permissionless*; *blockchains* privadas, indicadas para organizações com controle de acesso restrito; e *blockchain*s consorciadas, que operam de forma híbrida entre instituições com interesses comuns (Casino *et al.*, 2021). As características do modelo precisam ser consideradas ao selecionar a estrutura mais adequada para cada aplicação, como rastreabilidade agroalimentar (pública para transparência global) ou controle interno de uma cooperativa (privada ou consorciada para maior eficiência operacional).

O uso de *blockchain* e IoT está inserido em um novo contexto para a gestão agrícola, atualmente denominado Agricultura 4.0 (Khan *et al.*, 2022). O uso de sensores IoT fornece dados em tempo real e permite acesso a informações sobre solo, clima, prevenção de geadas, entre outros. O uso de *blockchain* garante registros confiáveis dessas informações. A aplicação dessas tecnologias permite uma Agricultura Inteligente, também conhecida como modelo de gestão *Smart Farming*, que utiliza inteligência artificial para a redução de desperdícios e aumento da produtividade nas fazendas (Wolfert *et al.*, 2017).

Nesse contexto de transformação dos processos produtivos, começam a surgir no mercado plataformas que integram e processam dados coletados e oferecem interfaces de visualização em tempo real, como painéis de monitoramento agrícola. Essas ferramentas centralizam informações como histórico de safras, certificações e logística, facilitando a tomada de decisão estratégica.

2.3 CADEIA PRODUTIVA DO LEITE E DESAFIOS DA TRANSFORMAÇÃO DIGITAL

A cadeia produtiva do leite no Brasil apresenta ampla distribuição geográfica e variedade de sistemas de produção. De acordo com Zanin *et al.* (2020), é composta majoritariamente por produtores familiares que operam sob diferentes condições técnicas e econômicas. Essa diversidade influencia as estratégias de inserção no mercado e os níveis de produtividade registrados entre as unidades produtivas (Costa *et al*., 2025).

Complementarmente, a organização da cadeia é marcada por uma predominância de propriedades de pequeno e médio porte, com distintas formas de articulação entre produção e processamento. Em muitos casos, a coordenação dessas atividades é realizada por cooperativas, que atuam como intermediárias nos processos de industrialização e comercialização. Beber *et al.* (2019) destacam que essas estruturas passam por ciclos de reorganização em função de mudanças no ambiente institucional e de mercado. Conforme Chaddad e Jank (2006), a evolução dessas organizações pode ser analisada a partir das transformações nos modelos de governança adotados.

No que se refere aos desafios operacionais, a coleta e o transporte do leite cru requerem controle de temperatura e regularidade, dada sua natureza perecível. A dispersão das unidades produtivas em áreas rurais, aliada à dependência do modal rodoviário, tende a aumentar os custos logísticos (Oliveira; Berto, 2025).

No plano regulatório e sanitário, destacam-se as Instruções Normativas nº 76 e nº 77 do Ministério da Agricultura, que estabeleceram novos parâmetros para a produção e transporte do leite cru refrigerado (Brasil, 2018a; 2018b). Todavia, o atendimento a essas exigências pode demandar investimentos em infraestrutura e qualificação técnica, o que nem sempre está ao alcance de todos os

produtores. Essa situação é corroborada por Chaddad e Jank (2006), ao analisarem a relação entre políticas públicas e estrutura produtiva no setor.

Além das exigências sanitárias, observam-se crescentes pressões por qualidade, rastreabilidade e conformidade com critérios de sustentabilidade. Segundo Berchin *et al*. (2019), esses atributos têm sido incorporados às estratégias de diferenciação e atendimento a exigências de mercados consumidores. Para os autores, as práticas ambientais, sociais e econômicas vêm sendo estimuladas por políticas públicas, certificações e demandas de consumidores.

Zanin *et al.* (2020) observam que os aspectos econômicos da sustentabilidade permanecem como foco entre os produtores analisados, embora haja registros de ações voltadas à melhoria do desempenho ambiental e social. Essa constatação indica que, embora a sustentabilidade venha ganhando espaço no discurso institucional, sua incorporação plena às práticas produtivas ainda apresenta desafios.

Nesse cenário, a transformação digital tem se consolidado como um dos vetores contemporâneos de reconfiguração da cadeia do leite. Tecnologias como sensores, softwares de gestão e plataformas de monitoramento vêm sendo adotadas em propriedades com maior capacidade de investimento (Cordeiro; Viana; Silveira, 2022). Os autores também apontam que essas soluções podem apoiar decisões técnicas e ampliar a rastreabilidade. Contudo, sua disseminação ainda é restrita por limitações relacionadas à conectividade rural, ao custo de implantação e à escassez de mão de obra qualificada (Morais; Binotto; Borges, 2017).

Por fim, a adoção dessas tecnologias exige articulação institucional. A integração de dados entre os diferentes elos da cadeia requer sistemas de informação compatíveis e arranjos organizacionais cooperativos. De acordo com Beber *et al.* (2019), a construção de confiança e a padronização dos fluxos informacionais são condições relevantes para viabilizar o uso pleno dessas ferramentas. Nesse sentido, para Cordeiro, Viana e Silveira (2022) as meso-instituições têm atuado como mediadoras entre políticas públicas, produtores e mercados, promovendo condições para a digitalização e a qualificação da cadeia produtiva do leite no Brasil.

3 METODOLOGIA

Este trabalho consiste em uma revisão narrativa da literatura com abordagem categorial e interpretativa, cujo objetivo foi interpretar como a literatura tem tratado a rastreabilidade digital na cadeia do leite. Por meio da revisão narrativa, é possível agregar e analisar a literatura já publicada, delineando o estado atual do saber na área e apoiando tanto o desenvolvimento de pesquisas futuras quanto a criação de orientações práticas.

Para a coleta dos estudos, foram utilizadas as bases de dados Scopus e Web of Science, selecionadas por cobrirem uma ampla gama de periódicos internacionais relevantes para a área de gestão da cadeia de suprimentos e inovação tecnológica. A estratégia de busca empregou a seguinte *string*: *(("traceability" OR "supply chain transparency") AND ("milk" OR "dairy") AND ("blockchain" OR "digital technology" OR "IoT" OR "smart farming" OR "precision agriculture" OR "sensor technologies" OR "digital platforms" OR "agriculture 4.0" OR "information systems"))*.

Inicialmente, foram identificados 78 artigos na Scopus e 48 artigos na Web of Science. Não foram aplicadas restrições quanto ao período de publicação. Os critérios de inclusão restringiram-se a artigos e artigos de revisão publicados em periódicos científicos, sem aplicação de outros filtros. Após essa filtragem inicial, restaram 46 artigos na Scopus e 42 na Web of Science.

Em uma segunda etapa, procedeu-se à leitura flutuante dos títulos, resumos e, quando necessário, partes do texto completo, para verificar se os estudos atendiam aos objetivos definidos nesta revisão. Essa etapa também permitiu a identificação e exclusão de duplicatas entre as bases, resultando em uma amostra final de 32 artigos selecionados para análise.

O procedimento analítico foi conduzido em três fases principais: leitura detalhada dos títulos, resumos e textos completos para aprofundamento nos conteúdos; organização dos estudos em categorias temáticas, definidas de forma indutiva a partir da identificação de padrões e recorrências emergentes na literatura; e, por fim, realização de uma análise interpretativa dos conteúdos, guiada pelo referencial teórico adotado, com o objetivo de identificar padrões, tendências, lacunas e gerar percepções relevantes sobre o tema investigado.

Para a organização e sistematização dos dados, foi utilizado o software Microsoft Excel, empregado na elaboração de planilhas de fichamento e categorização dos artigos. Além disso, foram utilizadas ferramentas de inteligência artificial para análise textual como apoio nas etapas de leitura flutuante e análise de compatibilidade dos artigos com os objetivos do trabalho, de modo a aumentar a eficiência e reduzir erros manuais na triagem inicial. Foram utilizadas as plataformas ChatPDF e NotebookLM.

Por tratar-se de uma revisão narrativa, não foram aplicados protocolos sistemáticos formalizados, o que constitui uma limitação do estudo em termos de abrangência e controle rigoroso de vieses. Ainda assim, buscou-se garantir transparência metodológica e rigor interpretativo ao longo de todas as etapas do processo analítico. A Tabela 1 apresenta um resumo dos procedimentos metodológicos deste estudo.

Tabela 1. Procedimentos metodológicos.

Etapa	Descrição
Tipo de revisão	Revisão narrativa da literatura com abordagem categorial e interpretativa.
Bases de dados	Scopus e Web of Science (selecionadas por ampla cobertura internacional na área).
String de busca	*(("traceability" OR "supply chain transparency") AND ("milk" OR "dairy") AND ("blockchain" OR "digital technology" OR "IoT" OR "smart farming" OR "precision agriculture" OR "sensor technologies" OR "digital platforms" OR "agriculture 4.0" OR "information systems"))*
Resultados iniciais	78 artigos na Scopus; 48 artigos na Web of Science.
Critérios de inclusão	Artigos e artigos de revisão publicados em periódicos científicos; sem restrição de período.
Triagem e filtragem	Leitura flutuante de títulos, resumos e partes do texto completo; exclusão de duplicatas.
Amostra final	32 artigos selecionados para análise.
Análise	Leitura detalhada dos artigos; Organização por categorias temáticas emergentes; Análise interpretativa guiada pelo referencial teórico.
Ferramentas utilizadas	Microsoft Excel (planilhas de fichamento e categorização); Inteligência artificial (apoio na leitura flutuante e análise de compatibilidade).

Fonte: Elaborado pelos autores, 2026

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados a seguir foram organizados a partir da análise de 32 estudos sobre rastreabilidade digital na cadeia do leite. A partir dessa análise, foram identificadas sete categorias principais, que abordam diferentes aspectos e desafios da implementação e evolução da rastreabilidade digital no setor lácteo. As categorias incluem: abordagens conceituais da rastreabilidade na literatura; tecnologias digitais aplicadas à rastreabilidade; impactos produtivos da rastreabilidade; repercussões institucionais da rastreabilidade; desafios técnicos enfrentados; desafios sociais enfrentados; e caminhos para a consolidação da rastreabilidade e agenda de estudos futuros. Cada uma dessas categorias reflete diferentes dimensões do impacto da rastreabilidade digital, abrangendo aspectos tecnológicos, institucionais, sociais e organizacionais, e fornecendo uma visão abrangente das contribuições teóricas e práticas dos estudos analisados.

4.1 ABORDAGENS CONCEITUAIS DA RASTREABILIDADE NA LITERATURA

Na literatura, a rastreabilidade pode assumir variados significados e abordagens a partir dos objetivos da pesquisa, do setor analisado e do aparato tecnológico considerado. No trabalho de Mehannaoui *et al.* (2025), a rastreabilidade é entendida como uma construção que tem como base sistemas integrados e descentralizados, com destaque para a utilização da *holochain* como infraestrutura que possibilita transparência, confiabilidade e controle de dados. A rastreabilidade aparece como integrante de um ecossistema digital inteligente que, além de registrar as fases da cadeia, atua como suporte à governança de dados.

Numa análise mais operacional, Pang *et al.* (2011) conceituam rastreabilidade como a capacidade de acompanhar a trajetória de um produto por meio de sistemas automatizados, tendo como

base a identificação eletrônica, como o RFID. O objetivo é garantir a precisão tanto na logística quanto no armazenamento, possibilitando que cada unidade seja rastreada em tempo real e reduzindo as perdas e os riscos.

De acordo com Giacalone *et al.* (2021), a rastreabilidade é apresentada como uma ferramenta que auxilia na relação entre big data e responsabilidade corporativa, vinculando-a a uma lógica mais ampla de sustentabilidade organizacional. Os autores não entendem a rastreabilidade somente como um controle de fluxo, mas como um mecanismo que valoriza práticas éticas e sustentáveis.

Ao adotar uma abordagem dinâmica da rastreabilidade, Longo, Nicoletti e Padovano (2020) mostram a integração entre tecnologias emergentes e modelos ciber-físicos. Para os autores, a rastreabilidade possibilita uma resposta imediata a desvios logísticos, tornando a cadeia mais adaptativa. Essa perspectiva destaca a agilidade e a capacidade preditiva de sistemas inteligentes.

Outras pesquisas, como as de Alonso *et al.* (2020) e Khanna *et al.* (2022), analisam o papel sistêmico da rastreabilidade. A primeira estuda sua aplicação em sistemas orientados por sensores IoT, como forma de apoiar as decisões automatizadas no campo. Já a segunda enxerga a rastreabilidade como um sistema que integra dados técnicos, legais e gerenciais, contribuindo para garantir a conformidade regulatória, assim como a otimização da cadeia de suprimentos.

Portanto, observa-se que a definição de rastreabilidade evoluiu de uma norma técnica e logística para uma perspectiva estratégica e sociotécnica, levando em consideração aspectos de sustentabilidade, transparência, relacionamento com o cliente e governança digital. Essa diversidade conceitual evidencia a complexidade e a centralidade da rastreabilidade nas cadeias agroindustriais, em especial na cadeia produtiva do leite.

4.2 TECNOLOGIAS DIGITAIS APLICADAS À RASTREABILIDADE NA CADEIA DO LEITE

Os estudos analisados demonstram um avanço significativo na adoção de tecnologias digitais voltadas à rastreabilidade e à melhoria da eficiência produtiva na cadeia do leite, inserindo-se em um contexto mais amplo de inovação no setor agroalimentar. Dentre as principais inovações tecnológicas mapeadas, destaca-se a tecnologia *blockchain*, utilizada para garantir transparência, imutabilidade e segurança nas informações que percorrem todas as etapas da cadeia produtiva. Ao registrar dados de produção, transporte, armazenamento e comercialização em blocos interligados, a *blockchain* permite rastrear o histórico completo do leite desde a fazenda até o consumidor final, promovendo a confiança no produto (Tan; Ngan, 2020). Longo, Nicoletti e Padovano (2020) também colocam em evidência a adoção da *blockchain* como uma das principais tecnologias emergentes no agro, sublinhando sua

capacidade de oferecer registros transparentes das transações, aumentando a confiança entre os diferentes elos da cadeia produtiva.

Outra tecnologia amplamente identificada é a Internet das Coisas, que viabiliza o uso de sensores e dispositivos conectados para o monitoramento contínuo de variáveis ambientais e operacionais, como temperatura, umidade, condições de ordenha e transporte. Esses dispositivos alimentam sistemas inteligentes com dados em tempo real, melhorando o controle de qualidade e facilitando a tomada de decisões (Kumar; Kumar, 2025).

Além disso, a combinação da IoT com inteligência artificial e *big data* foi mencionada como uma estratégia eficaz para prever padrões de consumo, antecipar falhas operacionais e personalizar processos de acordo com a demanda. Por meio da análise de grandes volumes de dados, algoritmos de aprendizado de máquina são capazes de identificar gargalos e sugerir ajustes no manejo ou na logística (Giacalone *et al.*, 2021). Ainda de acordo com os autores, no campo *do big data*, destaca-se a relevância da análise massiva de dados para o fortalecimento das práticas de responsabilidade social corporativa, ajudando as empresas a monitorar impactos sociais e ambientais.

Outras tecnologias relevantes incluem o uso de RFID (Identificação por Radiofrequência) para rastreamento de animais e produtos; códigos QR, que facilitam o acesso às informações de origem pelo consumidor; e *holochain,* alternativa descentralizada à *blockchain*. Pang *et al.* (2011) ressaltam especificamente a aplicação de tecnologias RFID e sensores inteligentes para a captura automatizada de dados no campo e durante o transporte, tornando o fluxo de informações mais confiável e reduzindo a intervenção manual.

Inovações como AIoT (*Artificial Intelligence of Things*), sistemas ciber-físicos e *edge computing* têm sido aplicadas em sistemas mais robustos, permitindo automação e resposta rápida a eventos críticos, como falhas sanitárias ou desvios na cadeia do frio (Longo; Nicoletti; Padovano, 2020). Lin e Wu (2021) destacam ainda a integração de sistemas baseados em inteligência artificial, que auxiliam na previsão de demandas, detecção de anomalias e otimização dos processos logísticos, reforçando a eficiência geral dos sistemas de rastreabilidade.

A adoção dessas tecnologias sinaliza uma transformação digital em curso na cadeia leiteira e no setor agroalimentar em geral, promovendo não apenas eficiência e sustentabilidade, mas também maior transparência ao consumidor final. A análise narrativa evidencia que o futuro da produção está fortemente ligado à integração entre sistemas inteligentes, conectividade e plataformas de rastreabilidade confiáveis.

4.3 IMPACTOS PRODUTIVOS DA RASTREABILIDADE NA CADEIA DO LEITE

A utilização da rastreabilidade digital vem promovendo transformações nos processos produtivos na cadeia do leite, provocando diversos efeitos. Os estudos desta revisão indicam impactos em automação, qualidade sanitária, valorização do mercado e eficiência operacional, mostrando a potencialidade dessa tecnologia para a cadeia leiteira.

Tan e Ngan (2020) indicam que a rastreabilidade digital auxilia na automação de processos, reduzindo a necessidade de registros manuais e erros humanos. Para os autores, a automatização leva a ganhos de escala, agilidade e padronização, possibilitando um ambiente produtivo com maior inteligência. A rastreabilidade também pode ser vista como uma ferramenta de coordenação produtiva, ao padronizar processos entre fornecedores, produtores e distribuidores, diminuindo falhas de comunicação e favorecendo o alinhamento da qualidade (De las Morenas; García; Blanco, 2014).

Alonso *et al.* (2020) apresentam os benefícios da adoção da rastreabilidade com sensores e inteligência artificial, que ajudam na detecção precoce de doenças e de estresse dos animais. Essas capacidades aparecem como uma alternativa para a aplicação de ações preventivas, garantindo melhor qualidade do leite e promovendo o bem-estar animal – fator que vem sendo valorizado pelos mercados.

Varavallo *et al.* (2022) argumentam que a rastreabilidade está cada vez mais relacionada à certificação de qualidade e segurança dos alimentos, sendo vista como uma forma de atender às regulamentações das cadeias internacionais. Ademais, aparece como um facilitador de auditorias e do registro documental, fortalecendo a reputação organizacional. Complementarmente, Biradar *et al.* (2025) destacam que a digitalização auxilia no controle sanitário e contribui para a resolução de problemas a curto prazo ao assegurar precisão de informações na manutenção de padrões de segurança alimentar.

Por fim, os trabalhos de Lin e Wu (2021) e Pang *et al.* (2011) envolvem a confiabilidade. O primeiro aponta os efeitos indiretos da rastreabilidade sobre a valorização do produto, já que promove um aumento da confiança do cliente tanto na origem quanto no controle sanitário do leite. O segundo, com foco logístico, aponta que a rastreabilidade reduz perdas e contaminações durante o transporte e o armazenamento, ampliando a confiabilidade da cadeia.

4.4 REPERCUSSÕES INSTITUCIONAIS DA RASTREABILIDADE

A utilização de sistemas de rastreabilidade na cadeia do leite vem gerando efeitos institucionais que reconfiguram a integração entre agentes, práticas de governança e estruturas de controle. Tais efeitos mostram que a rastreabilidade aparece como uma ferramenta de transformação institucional nas cadeias leiteiras. Nesse sentido, Longo, Nicoletti e Padovano (2020) abordam que a utilização de

tais tecnologias demanda uma reorganização dos fluxos de informação e das ações institucionais. Ao possibilitar acesso imediato a uma variedade de dados, cria-se um arranjo de responsabilidade e de escolhas, levando a uma lógica mais transparente. Observa-se também na literatura que a rastreabilidade reforça a relação interorganizacional. Pang *et al.* (2011) analisam que a padronização de registros de dados pode favorecer a comunicação no decorrer da cadeia.

Outro papel da rastreabilidade envolve a responsabilidade institucional. Em contextos de crescente pressão por transparência, ela possibilita que as organizações demonstrem conformidade com as normas exigidas. Nessa linha, Giacalone *et al.* (2021) defendem que a aplicação da rastreabilidade aumenta a prestação de contas e também a legitimação social perante as partes envolvidas.

Outro elemento para o funcionamento institucional é a confiança entre os agentes da cadeia. De las Morenas, García e Blanco (2014) reforçam esse efeito ao mostrarem como a rastreabilidade auxilia na mitigação de assimetrias de informação.

No âmbito de pequenas organizações, a rastreabilidade aparece como uma estratégia de legitimação. Lin e Wu (2021) abordam que, quando os processos se tornam visíveis e auditáveis, os agentes alcançam legitimidade institucional, podendo ter acesso a mercados regulados e conquistar a confiança do consumidor.

Observa-se que os efeitos institucionais ocasionados pela rastreabilidade englobam o fortalecimento da confiança, o aumento da legitimidade e mudanças nas práticas de governança. Conforme abordado por diversos autores, trata-se de uma inovação que exige transformações nas estruturas e normas que sustentam essas cadeias produtivas.

4.5 DESAFIOS TÉCNICOS ENFRENTADOS

Embora a rastreabilidade agroalimentar venha ganhando espaço com o avanço das tecnologias digitais, os estudos analisados mostram que sua implementação enfrenta desafios técnicos complexos. Eles se concentram em quatro frentes: a infraestrutura, a coleta de dados e a operação no campo; o desempenho e o custo das plataformas descentralizadas; a qualidade dos dados e a escalabilidade da inteligência artificial; e a interoperabilidade e a proteção das informações.

No campo, o primeiro obstáculo é a infraestrutura. Alonso *et al.* (2020) lembram que a infraestrutura limitada das áreas rurais dificulta a integração da IoT. Pang *et al.* (2011) mostram que tecnologias clássicas, como o RFID, sofrem com interferências eletromagnéticas e falhas de leitura, o que torna a coleta de dados no campo e no transporte vulnerável. A qualidade do dado coletado também depende dos equipamentos: Hassoun, Tarchi e Aït-Kaddour (2024) apontam limitações de precisão em

sensores de qualidade alimentar, e Hadi *et al.* (2024) destacam os desafios de durabilidade e manutenção dos dispositivos em campo. Na operação diária, Zaninelli e Pace (2018) relatam dificuldades em manter a cadeia do frio de produtos perecíveis, Kumar e Kumar (2025) alertam para falhas nos sistemas de monitoramento remoto, e Malik, Gahlawat e Mor (2023) apontam problemas logísticos.

As plataformas descentralizadas trazem desafios de desempenho e de custo. Segundo Mehannaoui *et al.* (2025), a *holochain* enfrenta problemas de escalabilidade e elevado consumo energético, o que dificulta seu uso em cadeias produtivas amplas. A *blockchain*, embora reconhecida por sua transparência, apresenta custos computacionais elevados, tempo de processamento e vulnerabilidades de segurança em redes distribuídas (Hawashin *et al.*, 2025).

Por fim, há a questão da integração e da segurança das informações. Khanna *et al.* (2022) chamam a atenção para as dificuldades de padronização entre diferentes plataformas, o que torna a interoperabilidade uma questão central. Manisha e Jagadeeshwar (2023), por sua vez, enfatizam a necessidade de proteger os dados sensíveis gerados por essas tecnologias.

Em síntese, os desafios técnicos não se resumem à escolha da tecnologia: envolvem infraestrutura, desempenho, qualidade dos dados, integração entre sistemas e custo. Como esses fatores se combinam com aspectos humanos e organizacionais, a subseção seguinte trata dos desafios sociais.

4.6 DESAFIOS SOCIAIS ENFRENTADOS

Os desafios sociais associados à adoção de tecnologias de rastreabilidade agroalimentar envolvem tanto a aceitação por parte dos consumidores quanto as condições de adoção pelos atores da cadeia produtiva.

Do lado do consumidor, Lin e Wu (2021) investigaram, com 305 consumidores chineses de laticínios de médio e alto padrão, os fatores que influenciam a intenção de adotar a rastreabilidade por código bidimensional. Dez das onze relações testadas foram positivas, e a exceção foi o efeito do risco percebido sobre a satisfação do usuário, que foi negativo. Isso indica que a percepção de risco pode reduzir a satisfação do consumidor com a rastreabilidade digital.

Do lado social e comunitário, Mangla *et al.* (2021) avaliam, por meio de dinâmica de sistemas e com dados de uma cooperativa de desenvolvimento agrícola criada para apoiar produtores de leite na Turquia, os impactos sociais da blockchain sobre produtores, comunidade e animais, com o objetivo de construir sustentabilidade social. Entre os parâmetros considerados estão o desenvolvimento rural local, a redução de fraudes alimentares, a saúde e o bem-estar animal, a segurança alimentar e a aceitabilidade social da transparência.

Quanto às condições de adoção, Serrano-Torres *et al.* (2025), em revisão sistemática conduzida segundo o protocolo PRISMA, analisam os fatores que facilitam ou dificultam a adoção da inteligência artificial na cadeia de laticínios, além de seu impacto na otimização de processos e seu potencial para a sustentabilidade.

Esses aspectos ganham relevância no contexto brasileiro descrito na seção 2.3, marcado pela predominância de pequenas e médias propriedades e pelo papel das cooperativas, e orientam parte da agenda de pesquisas apresentada na seção 4.7.

4.7 CAMINHOS PARA CONSOLIDAÇÃO DA RASTREABILIDADE E AGENDA DE ESTUDOS FUTUROS

A partir da literatura, observa-se uma variedade de direções para a expansão da rastreabilidade digital na cadeia do leite, englobando fatores organizacionais, tecnológicos, sociais e regulatórios. As pesquisas convergem em diversos pontos, mas também indicam caminhos complementares, trazendo possibilidades de articulação.

Para o desenvolvimento da rastreabilidade, Mehannaoui *et al.* (2025) apontam a adoção de sistemas descentralizados que favoreçam a segurança e o controle de dados. Essa sugestão converge com Khanna *et al.* (2022) e Varavallo *et al.* (2022), que argumentam que as plataformas blockchain integradas conseguem garantir confiabilidade e conformidade regulatória em tempo real, especialmente em cadeias produtivas sujeitas a auditorias e certificações.

O trabalho de Alonso *et al.* (2020) sugere o avanço por meio da implementação de plataformas que têm como base a IoT e a inteligência artificial, com objetivos relacionados à automação e ao monitoramento contínuo. Essa perspectiva é complementar à de Manisha e Jagadeeshwar (2023), que destacam que o investimento em tecnologias integradas, como sensores inteligentes e IA, pode aumentar a precisão e a eficiência dos sistemas de rastreabilidade.

As pesquisas de Pang *et al.* (2011) e Biradar *et al.* (2025) abordam a perspectiva organizacional e operacional. Os autores destacam a demanda por padronização e compartilhamento de dados entre diversas plataformas, argumentando que, para que a rastreabilidade se consolide, é necessária uma comunicação fluida entre os processos.

Já Giacalone *et al.* (2021) e Lin e Wu (2021) discutem a incorporação de dimensões sociais e estratégicas. Para os autores, a rastreabilidade precisa ser vista como um instrumento de transparência e engajamento com os clientes, fortalecendo práticas sustentáveis, a reputação corporativa e a confiança.

Em conjunto, os estudos indicam que o futuro da rastreabilidade digital depende da integração de inovações tecnológicas, legitimação social e articulação institucional. Essa consolidação exige uma ação coordenada, confiável e acessível, que considere as realidades locais e os desafios de pequenas e médias organizações.

Quanto a estudos futuros, é possível delinear uma agenda de pesquisa emergente que engloba aspectos institucionais, tecnológicos, regulatórios e sociais. Por meio da sistematização dos temas abordados, é possível identificar lacunas de pesquisa.

Um dos temas mais consolidados é a interoperabilidade de sistemas, comentada por Alonso *et al.* (2020), que discute a necessidade de integração entre plataformas para garantir a eficácia da rastreabilidade em cadeias produtivas complexas. Mesmo que a literatura destaque a relevância da padronização de dados e da comunicação entre diferentes sistemas, carecem de trabalhos empíricos sobre como essa interoperabilidade pode ser implementada, principalmente em contextos de pequenos produtores.

Outro eixo analisado é o da relação entre rastreabilidade e sustentabilidade. De acordo com Giacalone *et al.* (2021) e Dac *et al.* (2023), há espaço para o aprofundamento de como os dados gerados influenciam a tomada de decisões sustentáveis por parte das empresas e se isso é valorizado pelos consumidores e reguladores.

No campo da segurança e da confiabilidade, são necessários estudos que abordem a escalabilidade, por exemplo, da utilização de blockchain (Mehannaoui *et al.*, 2025; Hadi *et al.*, 2024). Também se defende a análise de seus custos e a adaptação a diversos tipos de governança (Khanna *et al.*, 2022).

A dimensão das inovações tecnológicas aplicadas à automação é trazida por Alonso *et al.* (2020) e Hadi *et al.* (2024) ao apresentarem a utilização de inteligência artificial para antecipar falhas e tomar decisões automatizadas com base em dados rastreados. Surge então a necessidade de pesquisas em ambientes reais que conectem rastreabilidade e sistemas produtivos inteligentes.

Existem outras áreas que ainda apresentam diversas lacunas a serem exploradas, como a inclusão de pequenos produtores, abordada apenas por Lin e Wu (2021), que analisam a rastreabilidade como mecanismo de legitimação institucional. Há escassez na literatura no que tange a soluções práticas para superar barreiras econômicas, técnicas e infraestruturais enfrentadas por esse público.

A participação do consumidor vem sendo tratada pontualmente, como apresentam Lin e Wu (2021) e Giacalone *et al.* (2021), entretanto, há espaço para avançar em estudos sobre percepção de valor, confiança e disposição a pagar por produtos rastreados.

Por fim, a temática da integração com certificações e normas regulatórias, estudada por Khanna *et al.* (2022) e Varavallo *et al.* (2022), mostra a rastreabilidade como suporte ao cumprimento de exigências legais e comerciais. Futuras pesquisas podem aprofundar como diferentes marcos regulatórios se relacionam com sistemas digitais de rastreabilidade, e como isso afeta a competitividade de produtores em mercados externos. A Tabela 2 apresenta uma síntese de linhas de pesquisa futuras.

Tabela 2. Agenda de pesquisa.

Tema	Descrição da Linha de Pesquisa	Autores que sugerem ou abordam
Interoperabilidade de Sistemas	Trabalhos sobre padrões abertos, integração entre plataformas e barreiras técnicas à interoperabilidade entre pequenos e grandes produtores.	Alonso *et al*. (2020)
Inclusão de Pequenos Produtores	Avaliação dos desafios econômicos, técnicos e sociais para a adoção de rastreabilidade por pequenos e médios produtores.	Lin e Wu (2021)
Rastreabilidade e Sustentabilidade	Estudos de como sistemas de rastreabilidade podem apoiar metas ESG.	Giacalone *et al*. (2021); Dac *et al*. (2022)
Confiabilidade e Segurança Digital	Análise de mecanismos de segurança e criptografia para garantir integridade dos dados em ambientes distribuídos.	Mehannaoui *et al*. (2025); Hadi *et al*. (2024); Khanna *et al*. (2022)
Participação do Consumidor	Pesquisa sobre o papel dos consumidores na valorização da rastreabilidade e seus efeitos na escolha e disposição a pagar.	Lin e Wu (2021); Giacalone *et al*. (2021)
Integração com Certificação e Regulação	Análise de que forma a rastreabilidade pode ser incorporada a políticas públicas, certificações sanitárias e normas internacionais.	Khanna *et al*. (2022); Varavallo *et al*. (2022)
Automação e Inteligência Artificial	Trabalhos acerca da utilização de IA para antecipar falhas, propor correções automáticas e personalizar decisões baseadas em dados rastreados.	Alonso *et al*. (2020); Hadi *et al*. (2024)

Fonte: Elaborado pelos autores, 2026

A partir dessa síntese, é visto que a rastreabilidade ainda é um campo fértil para pesquisas futuras. O avanço da rastreabilidade depende da capacidade dos pesquisadores em explorar as dimensões relacionais, estruturais e institucionais desse processo.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho abordou a utilização da rastreabilidade digital na cadeia do leite, identificando avanços tecnológicos, desafios e oportunidades que caracterizam esse processo transformador. A partir

da análise da literatura, foram destacados os principais achados relacionados às tecnologias emergentes, como blockchain, IoT e inteligência artificial, que têm potencial para aprimorar a segurança, a transparência e a eficiência na rastreabilidade do leite, impactando positivamente a confiança do consumidor e a competitividade no mercado.

Uma das principais contribuições teóricas deste estudo é a integração entre diferentes inovações tecnológicas e sua aplicação na cadeia do leite, ressaltando a importância da interoperabilidade entre sistemas e a padronização dos dados para garantir a eficácia da rastreabilidade. Além disso, foi possível observar que a rastreabilidade não deve ser vista apenas como uma ferramenta de conformidade regulatória, mas como um mecanismo de engajamento com os consumidores e de fortalecimento de práticas sustentáveis. Nesse sentido, contribuições práticas incluem a recomendação de que os sistemas de rastreabilidade sejam projetados para atender tanto às grandes empresas quanto aos pequenos produtores, garantindo que todos possam se beneficiar das novas tecnologias e da transparência gerada por elas.

As implicações para o setor lácteo são diversas, visto que a rastreabilidade digital representa uma oportunidade significativa para modernizar a cadeia produtiva, melhorar o acesso a mercados regulados e fortalecer a reputação das empresas. No entanto, para que essa transformação seja bem-sucedida, é necessário que o setor enfrente desafios como a resistência à mudança entre os pequenos produtores, a escassez de capacitação técnica e a adaptação a novas exigências regulatórias. Além disso, a adoção de tecnologias digitais também exige um apoio institucional e governamental mais robusto, para que as empresas, especialmente as de menor porte, consigam acompanhar a digitalização e aproveitar os benefícios das novas soluções tecnológicas.

Este estudo, porém, apresenta algumas limitações. Primeiramente, ele se baseia em uma análise da literatura existente, o que pode não capturar todas as nuances e inovações mais recentes no campo da rastreabilidade digital. Além disso, a maioria dos estudos revisados foca em contextos específicos, o que pode limitar a generalização dos achados para pequenas e médias propriedades rurais, que enfrentam desafios diferentes na adoção dessas tecnologias.

Em relação a pesquisas futuras, o campo de rastreabilidade digital no setor lácteo ainda apresenta diversas lacunas a serem exploradas. A integração de sistemas em ambientes com pequenos produtores, por exemplo, precisa de investigações mais profundas sobre a viabilidade de soluções mais acessíveis e adaptadas à realidade local. Além disso, o impacto da rastreabilidade digital na sustentabilidade e nas práticas empresariais ainda requer mais estudos empíricos, especialmente em relação às percepções dos consumidores e sua disposição a pagar por produtos rastreados. A

escalabilidade das tecnologias, como blockchain, também merece atenção, assim como a análise de custos e a adaptação dessas soluções para diferentes tipos de governança e modelos de negócios.

Por fim, a relação entre rastreabilidade, certificações e regulamentações também deve ser aprofundada, para que se compreenda melhor como as exigências legais impactam a adoção de tecnologias digitais, especialmente em mercados internacionais. Com isso, a agenda de transformação digital no setor lácteo poderá avançar de maneira mais sólida, equilibrando inovação tecnológica, sustentabilidade e competitividade, e beneficiando tanto os grandes produtores quanto os pequenos agentes do setor.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), Brasil. Processos nº 2022/09319-9; 2025/10368-2; 2025/10367-6; 2025/06048-2. Os autores também agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG) (projeto nº: CSA APQ 02264/22). Este estudo também foi apoiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Brasil, por meio da Bolsa de Produtividade em Desenvolvimento Tecnológico e Extensão Inovadora (DT), Processo nº 312556/2025-0, associada ao projeto “O Produtor do Futuro: Perfil Tecnológico e Indicadores de Adoção de Tecnologias Digitais”. Agradecimentos à Universidade Federal de Lavras (UFLA) e ao Agritech UFLA pelo apoio técnico e didático.

REFERÊNCIAS

ALONSO, R. S. *et al.* An intelligent Edge-IoT platform for monitoring livestock and crops in a dairy farming scenario. Ad Hoc Networks, v. 98, p. 102047, 2020.

BEBER, C. L. *et al.* Dairy supply chain in Southern Brazil: barriers to competitiveness. International Food and Agribusiness Management Review, v. 22, n. 5, p. 651-674, 2019.

BERCHIN, I. I. *et al.* The contributions of public policies for strengthening family farming and increasing food security: The case of Brazil. Land use policy, v. 82, p. 573-584, 2019.

BIRADAR, M. *et al.* Dairy product quality evaluation using optimization-based deep maxout network with blockchain-driven internet of things. Peer-to-Peer Networking and Applications, v. 18, n. 3, p. 124, 2025.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa nº 76, de 26 de novembro de 2018. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 30 nov. 2018.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa nº 77, de 26 de novembro de 2018. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 30 nov. 2018.

CASINO, F. *et al.* Blockchin-based food supply chain traceability: a case study in the dairy sector. International journal of production research, v. 59, n. 19, p. 5758-5770, 2021.

CHADDAD, F. R.; JANK, M. S. The evolution of agricultural policies and agribusiness development in Brazil. Choices, v. 21, n. 2, p. 85-90, 2006.

CORDEIRO, M. P.; VIANA, J. G. A.; SILVEIRA, V. C. P. Influence of meso-institutions on milk supply chain performance: a case study in Rio Grande do Sul, Brazil. Agriculture, v. 12, n. 4, p. 482, 2022.

COSTA, H. B. A. *et al.* Avaliação da sustentabilidade da cadeia de produção do leite pelos programas de boas práticas do Brasil. Ciência Animal Brasileira, v. 26, p. 79031E, 2025.

DAC, H. f *et al.* Livestock identification using deep learning for traceability. Sensors, v. 22, n. 21, p. 8256, 2022.

DE LAS MORENAS, J.; GARCÍA, A.; BLANCO, J. Prototype traceability system for the dairy industry. Computers and electronics in agriculture, v. 101, p. 34-41, 2014.

DEMESTICHAS, K. *et al.* Blockchain in agriculture traceability systems: A review. Applied Sciences, v. 10, n. 12, p. 4113, 2020.

GIACALONE, M. *et al.* Big data for corporate social responsibility: blockchain use in Gioia del Colle DOP. Quality & quantity, v. 55, n. 6, p. 1945-1971, 2021.

HADI, M. S. *et al.* Enhancing low-temperature long-time milk pasteurization process with a C4. 5 algorithm-driven AIoT system for real-time decision-making. Journal of Food Process Engineering, v. 47, n. 4, p. e14606, 2024.

HASSOUN, A.; TARCHI, I.; AÏT-KADDOUR, A. Leveraging the potential of fourth industrial revolution technologies to reduce and valorize waste and by-products in the dairy sector. Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry, v. 47, p. 100927, 2024.

HAWASHIN, D. *et al.* Enhancing sustainability in dairy industry: Blockchain-based waste reduction. Sustainable Futures, v. 9, p. 100529, 2025.

KHAN, H. H. *et al.* Blockchain technology for agricultural supply chains during the COVID-19 pandemic: Benefits and cleaner solutions. Journal of cleaner production, v. 347, p. 131268, 2022.

KHANNA, A. *et al.* Blockchain-enabled supply chain platform for Indian dairy industry: Safety and traceability. Foods, v. 11, n. 17, p. 2716, 2022.

KRISHNAN, S.; GANESAN, L. P. Integrated dairy production and cattle healthcare management using blockchain NFTs and smart contracts. Systems, v. 13, n. 1, p. 65, 2025.

KUMAR, R.; KUMAR, D. Blockchain-based smart dairy supply chain: catching the momentum for digital transformation. Journal of agribusiness in developing and emerging economies, v. 15, n. 2, p. 225-248, 2025.

LIN, X.; WU, R. Z. An empirical study on the dairy product consumers' intention to adopt the food traceability's technology: push-pull-mooring model integrated by D&M ISS model and TPB with ITM. Frontiers in Psychology, v. 11, p. 612889, 2021.

LONGO, F.; NICOLETTI, L.; PADOVANO, A. Estimating the impact of blockchain adoption in the food processing industry and supply chain. International Journal of Food Engineering, v. 16, n. 5-6, p. 20190109, 2020.

MALIK, M.; GAHLAWAT, V. K.; MOR, R. S. Digital interoperability and transformation using Industry 4.0 technologies in the dairy industry: An SLR and bibliometric analysis. Logforum, v. 19, n. 3, 2023.

MANGLA, S. K. *et al.* Using system dynamics to analyze the societal impacts of blockchain technology in milk supply chainsrefer. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, v. 149, p. 102289, 2021.

MANISHA, N.; JAGADEESHWAR, M. BC driven IoT-based food quality traceability system for dairy product using deep learning model. High-Confidence Computing, v. 3, n. 3, p. 100121, 2023.

MEHANNAOUI, R. *et al.* A holochain-based IoT-enabled agri-food traceability system: Application in the recombined milk supply chain. International Journal of Information Technology, p. 1-17, 2025.

MELISSARI, F. *et al.* Experiences using Ethereum and Quorum blockchain smart contracts in dairy production. Journal of Sensor and Actuator Networks, v. 13, n. 1, p. 6, 2024.7

MORAIS, M.; BORGES, J. A. R.; BINOTTO, E. Using the reasoned action approach to understand Brazilian successors' intention to take over the farm. Land use policy, v. 71, p. 445-452, 2018.

NAKAMOTO, S. *et al.* Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system [em linha]. 31 out. 2008.

OLIVEIRA, F. D.; BERTO, V. Avaliação da implementação de boas práticas na produção, transporte, estocagem do leite e o impacto financeiro no rendimento de fábrica na indústria de laticínios de rondônia. Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação, v. 11, n. 11, p. 5785-5796, 2025.

PANG, C. *et al.* Method of traceability information acquisition and transmission for dairy cattle based on integrating of RFID and WSN. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, v. 27, n. 9, p. 147-152, 2011.

ROCCHETTI, G.; O'CALLAGHAN, T. F. Application of metabolomics to assess milk quality and traceability. Current Opinion in Food Science, v. 40, p. 168-178, 2021.

SERRANO-TORRES, G. J. *et al.* Transformation of the dairy supply chain through artificial intelligence: A systematic review. Sustainability, v. 17, n. 3, p. 982, 2025.

SURASAK, T. *et al.* Thai agriculture products traceability system using blockchain and internet of things. System, v. 14, p. 15, 2019.

TAN, A.; NGAN, P. T. A proposed framework model for dairy supply chain traceability. Sustainable Futures, v. 2, p. 100034, 2020.

TAPSCOTT, D.; TAPSCOTT, A. Blockchain revolution: How the technology behind Bitcoin is changing money, business and the world. New York: Portfolio/Penguin, 2016.

VARAVALLO, G. *et al.* Traceability platform based on green blockchain: an application case study in dairy supply chain. Sustainability, v. 14, n. 6, p. 3321, 2022.

WOLFERT, S. *et al.* Big data in smart farming–a review. Agricultural systems, v. 153, p. 69-80, 2017.

XIONG, H. *et al.* Blockchain technology for agriculture: applications and rationale. frontiers in Blockchain, v. 3, p. 7, 2020.

ZANIN, A. *et al.* Driving sustainability in dairy farming from a TBL perspective: Insights from a case study in the West Region of Santa Catarina, Brazil. Sustainability, v. 12, n. 15, p. 6038, 2020.

ZANINELLI, M.; PACE, M. R. The O3-farm project: First evaluation of a business process management (BPM) approach through the development of an experimental farm management system for milk traceability. Agriculture, v. 8, n. 9, p. 139, 2018.

ZHENG, Z. *et al.* An overview of blockchain technology: Architecture, consensus, and future trends. In: 2017 IEEE international congress on big data (BigData congress). Ieee, 2017. p. 557-564.