

PANORAMA DAS TECNOLOGIAS EMERGENTES NA RASTREABILIDADE DA PRODUÇÃO LEITEIRA

Natalha Silva de Oliveira^{1*}, Kaylaine Martins de Souza¹, Rafaela Elias Rodrigues² e Gustavo Caioli Branco³.

¹Discente no Curso de Zootecnia – Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos – FZEA/USP – Pirassununga/SP – Brasil – *Contato: natalhaoliveira@usp.br

²Discente no Curso de Engenharia de Biossistemas – Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos – FZEA/USP – Pirassununga/SP – Brasil

³Discente no Curso de Ciências da Computação – Faculdades Metropolitanas Unidas – Centro Universitário FMU – Sorocaba/SP – Brasil

INTRODUÇÃO

A cadeia de produção leiteira compreende um conjunto de etapas interligadas, desde o manejo sanitário, nutricional e reprodutivo dos animais até a ordenha, industrialização, transporte e distribuição dos produtos ao consumidor final. Cada fase desse processo influencia diretamente na qualidade e segurança do leite, sendo essencial o controle rigoroso de dados e procedimentos^{1,2}. A rastreabilidade, nesse contexto, tem se consolidado como uma ferramenta estratégica para garantir a transparência das informações, possibilitando identificar rapidamente a origem de qualquer problema ao longo da cadeia produtiva³.

Estudos recentes apontam que a rastreabilidade agrega valor ao produto, melhora a eficiência operacional e fortalece a confiança do consumidor^{4,5}. Com a incorporação de tecnologias emergentes, como a Internet das Coisas (IoT), blockchain, inteligência artificial (IA) e sensores inteligentes, a rastreabilidade deixou de ser apenas documental para se tornar dinâmica e automatizada^{1,6}. A IoT permite monitoramento em tempo real da saúde animal e das condições ambientais; o blockchain assegura a integridade e imutabilidade dos dados; e a IA contribui na análise preditiva, otimizando tomadas de decisão^{1,6}.

Apesar dos avanços, a implementação dessas soluções ainda enfrenta barreiras, como altos custos, resistência por parte dos produtores e deficiências na infraestrutura digital rural^{1,6}. Alternativas como o uso de green blockchain² e sistemas consorciados têm sido estudadas para superar tais limitações, promovendo maior sustentabilidade e cooperação entre os atores da cadeia leiteira.

Dessa forma, este artigo tem como objetivo apresentar um panorama das tecnologias emergentes aplicadas à rastreabilidade na produção leiteira, discutindo suas aplicações, benefícios, desafios e perspectivas futuras. A partir da análise de estudos recentes, busca-se fornecer subsídios para compreender como essas inovações estão transformando a cadeia produtiva do leite, promovendo maior segurança, transparência e sustentabilidade.

MATERIAL

Para a elaboração do presente trabalho, foi realizada uma revisão de literatura com foco nas tecnologias emergentes aplicadas à rastreabilidade na cadeia produtiva do leite. A busca por materiais científicos foi conduzida em bases de dados amplamente reconhecidas pela comunidade acadêmica, como ScienceDirect, SpringerLink, PubMed, Web of Science, Scopus, Google Scholar, MDPI e arXiv. A seleção priorizou publicações dos últimos cinco anos, com critérios de inclusão voltados a estudos que abordassem diretamente a aplicação de tecnologias como blockchain, Internet das Coisas (IoT), inteligência artificial, computação em nuvem e sensores inteligentes na rastreabilidade de produtos agropecuários, em especial o leite e seus derivados.

Foram utilizados termos de busca combinados e em inglês, tais como: “dairy traceability”, “milk supply chain”, “blockchain in dairy”, “agri-food traceability”, “IoT dairy production” e “food blockchain traceability”. Os artigos foram selecionados com base em sua relevância teórica e aplicabilidade prática, contribuindo para a discussão dos avanços tecnológicos, dos desafios e das perspectivas futuras no contexto da rastreabilidade da produção leiteira.

RESUMO DE TEMA

A cadeia de produção leiteira envolve uma série de etapas fundamentais, desde o manejo sanitário, nutricional e reprodutivo dos animais até a coleta, transporte, processamento e distribuição do leite ao consumidor final. O monitoramento adequado da saúde animal é essencial para garantir a qualidade do produto, sendo que boas práticas de manejo, como controle sanitário e alimentação equilibrada, impactam diretamente na segurança do leite⁴. Na etapa da ordenha, o uso de equipamentos adequados e hábitos higiênicos reduz o risco de contaminação¹. A

recepção do leite na indústria envolve testes de qualidade, como o teor de gordura, proteína e contagem bacteriana. Por fim, os processos industriais visam garantir a rastreabilidade e a segurança alimentar, com o leite sendo embalado, armazenado e distribuído⁷.

No contexto da rastreabilidade, tecnologias emergentes vêm sendo aplicadas com o objetivo de garantir maior transparência, segurança e eficiência na cadeia leiteira. A Internet das Coisas (IoT) permite o monitoramento em tempo real da saúde animal, localização dos animais e condições ambientais⁶. A inteligência artificial (IA) também desempenha um papel importante ao processar grandes volumes de dados, identificando padrões e otimizando a tomada de decisão^{1,6}.

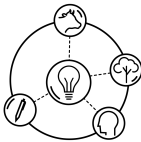
Além disso, sistemas baseados em blockchain têm sido amplamente explorados como soluções eficazes para a rastreabilidade na cadeia agroalimentar, incluindo a produção leiteira. Modelos destacam-se como alternativas robustas, capazes de garantir não apenas a transparência, mas também a segurança em todo o processo produtivo, desde a fazenda até a indústria de laticínios^{8,9}. A blockchain assegura a imutabilidade e confiabilidade dos dados coletados, o que torna possível rastrear com precisão cada etapa da cadeia produtiva do leite, desde o manejo sanitário dos animais até a distribuição do produto final^{3,4}. Nesse contexto, Wang et al. (2023) propõem uma arquitetura de referência para sistemas baseados em blockchain, utilizando o design orientado a domínio e micros serviços, o que facilita a integração de diferentes etapas da produção leiteira¹⁰. Além disso, destaca-se a importância da avaliação crítica das tecnologias de rastreabilidade, considerando sua aplicabilidade e eficácia nas cadeias produtivas de alimentos, incluindo o setor leiteiro¹¹. Por fim, é possível ressaltar que a blockchain desempenha um papel essencial como salvaguarda na cadeia agroalimentar, garantindo a segurança dos dados e a integridade das informações ao longo de toda a produção, o que é fundamental para a confiança do consumidor na qualidade do leite e seus derivados¹².

A implementação dessas tecnologias, no entanto, enfrenta desafios como os altos custos de investimento, resistência por parte dos produtores e falta de infraestrutura digital em regiões rurais¹. Apesar disso, os benefícios incluem maior eficiência produtiva, valorização do produto final e confiança do consumidor¹. Soluções como green blockchain e sistemas consorciados surgem como alternativas sustentáveis e seguras para a rastreabilidade^{2,13}.

A seguir, apresenta-se um quadro com a comparação das principais tecnologias analisadas e diferentes abordagens:

Quadro: Tecnologias emergentes, suas aplicações na cadeia leiteira e avaliação de tecnologias de rastreabilidade (Fonte Autoral).

Tecnologia	Aplicabilidade	Benefícios	Autor(es)
IoT	Monitoramento de saúde animal e condições ambientais	Dados em tempo real, prevenção de doenças, aumento da produtividade	Hassoun et al. (2023); Gehlot et al. (2022)
Blockchain	Rastreabilidade de toda a cadeia de produção, desde a fazenda até o consumidor final	Imutabilidade dos dados, transparência, confiança nas informações	Mirabelli & Solina (2020); Marchese & Tomarchio (2022); Elahi et al. (2023)
Green Blockchain	Rastreabilidade na cadeia de queijos e produtos lácteos sustentáveis	Sustentabilidade, rastreabilidade ecológica, segurança alimentar	Varavallo et al. (2022)



Inteligência Artificial (IA)	Previsão de produção, otimização do uso de recursos, análise de dados para tomada de decisões	Tomada de decisão mais rápida e eficiente, aumento da produção	Malik et al. (2024); Gehlot et al. (2022)
Sistemas de Microserviços (Blockchain)¹⁰	Estruturação de sistemas de rastreabilidade eficientes, modularidade para integração com diferentes tecnologias	Escalabilidade, fácil integração com outras plataformas	Wang et al. (2023)
Blockchain como Salvaguarda	Proteção dos dados ao longo da cadeia de produção leiteira e durante o transporte	Garantia de integridade e confiança nas informações	Xu et al. (2020); Zhao & Li (2023)
Avaliação de Tecnologias de Rastreabilidade	Análise de sistemas de rastreabilidade para medir desempenho e eficiência no setor leiteiro	Identificação de melhores práticas, otimização de processos	Pang et al. (2024)

Com base na discussão dos artigos analisados, observa-se que a integração entre diferentes tecnologias é essencial para garantir a eficácia da rastreabilidade. Estudos destacam que a sinergia entre IA, IoT e blockchain maximiza os resultados em termos de segurança, eficiência e sustentabilidade⁶. Além disso, alternativas como o green blockchain contribuem para mitigar impactos ambientais, tornando a cadeia produtiva mais responsável². Logo, o uso de tecnologias emergentes na rastreabilidade da produção leiteira representa um passo importante rumo à modernização e sustentabilidade do setor. Apesar dos desafios, os avanços tecnológicos permitem maior segurança alimentar, controle de qualidade e confiança do consumidor, aspectos essenciais para uma cadeia produtiva mais transparente e eficiente.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A adoção de tecnologias emergentes na rastreabilidade da produção leiteira representa um avanço essencial para garantir segurança alimentar, transparência e eficiência em toda a cadeia produtiva. Ferramentas como IoT, blockchain, inteligência artificial e sensores inteligentes, têm demonstrado resultados positivos no monitoramento e controle da produção^{1,6}. Entretanto, desafios como altos custos, falta de infraestrutura e resistência à mudança ainda dificultam a adoção dessas soluções em larga escala¹. Como alternativa, tecnologias sustentáveis e modelos cooperativos, como a green blockchain e sistemas consorciados, podem viabilizar a implementação em diferentes contextos produtivos^{2,8}. Sugere-se que futuras pesquisas avaliem o custo-benefício dessas tecnologias em propriedades de diferentes portes e analisem a aceitação do consumidor em relação à rastreabilidade digital. A superação dos obstáculos dependerá da integração entre inovação, capacitação e políticas públicas voltadas à modernização da cadeia leiteira.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. HASSOUN, A.; GARCIA-GARCIA, G.; TROLLMAN, H.; JAGTAP, S.; PARRA-LÓPEZ, C.; CROPOTOVA, J.; BHAT, Z.; CENTOBELLI, P.; AÏT-KADDOUR, A. Birth of dairy 4.0: Opportunities and challenges in adoption of fourth industrial revolution technologies in the production of milk and its derivatives.

Current Research in Food Science, v. 7, p. 100535, 2023. DOI: 10.1016/j.crfs.2023.100535.

2. VARAVALLO, G.; CARAGNO, G.; BERTONE, F.; VERNETTI-PROT, L.; TERZO, O.. Traceability Platform Based on Green Blockchain: An Application Case Study in Dairy Supply Chain. *Sustainability*, v. 14, n. 6, p. 3321, 2022. DOI: 10.3390/su14063321.

3. MIRABELLI, G.; SOLINA, V.. Blockchain and agricultural supply chains traceability: research trends and future challenges. *Procedia Manufacturing*, v. 42, p. 414-421, 2020. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.02.054.

4. ELLAHI, R. M.; WOOD, L. C.; BEKHIT, A. E. A. Blockchain-Based Frameworks for Food Traceability: A Systematic Review. *Foods*, v. 12, n. 16, p. 3026, 2023. DOI: 10.3390/foods12163026.

5. DUONG, C. D.; TRAN, T. V. H.; NGUYEN, T. H.; NGO, T. V. N.; VU, T. N.. Blockchain-based food traceability system and pro-environmental consumption: A moderated mediation model of technology anxiety and trust in organic food product. *Digital Business*, v. 4, n. 2, p. 100095, dez. 2024.

6. GEHLOT, A.; MALIK, P. K.; SINGH, R.; AKRAM, S. V.; ALSUWIAN, T. Dairy 4.0: Intelligent Communication Ecosystem for the Cattle Animal Welfare with Blockchain and IoT Enabled Technologies. *Applied Sciences*, v. 12, n. 14, p. 7316, 2022.

7. MALIK, M.; GAHLAWAT, V. K.; MOR, R. S.; SINGH, M. K. Unlocking dairy traceability: Current trends, applications, and future opportunities. *Future Foods*, v. 10, p. 100426, 2024. DOI: 10.1016/j.fufo.2024.100426.

8. MARCHESE, A.; TOMARCHIO, O. A Blockchain-Based System for Agri-Food Supply Chain Traceability Management. *SN Computer Science*, v. 3, p. 279, 2022. DOI: 10.1007/s42979-022-01148-3.

9. PATELLI, N.; MANDRIOLI, M. Blockchain technology and traceability in the agrifood industry. *Journal of Food Science*, v. 85, n. 11, p. 3670-3678, nov. 2020. DOI: 10.1111/1750-3841.15477. Epub 2020 set. 30. PMID: 33000471.

10. WANG, Y.; LI, S.; LIU, H.; ZHANG, H.; PAN, B. A reference architecture for blockchain-based traceability systems using domain-driven design and microservices. *arXiv*, 2023.

11. PANG, S.; TENG, S. W.; MURSHED, M.; BUI, C. V.; KARMAKAR, P.; LI, Y.; LIN, H.. A survey on evaluation of blockchain-based agricultural traceability. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 227, Part 2, p. 109548, dez. 2024.

12. XU, J.; GUO, S.; XIE, D.; YAN, Y.. Blockchain: A new safeguard for agri-foods. *Artificial Intelligence in Agriculture*, v. 4, p. 153-161, 2020.

13. ZHAO, S.; LI, W. Blockchain-based traceability system adoption decision in the dual-channel perishable goods market under different pricing policies. *International Journal of Production Research*, v. 61, n. 13, p. 4548-4574, 2023. DOI: 10.1080/00207543.2023.2168309.