GÊMEOS DIGITAIS NA AGRICULTURA 5.0: UMA REVISÃO DA LITERATURA (2021–2026) SOBRE MODELAGEM, ORQUESTRAÇÃO CIBERFÍSICA E SUSTENTABILIDADE

Edna Camargo (Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada – Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, PR, Brasil) E-mail: 250401401004@uepg.br

Claudia Roslaine Mazur (Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada – Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, PR, Brasil) E-mail: 250401401006@uepg.br

Maria Salete Marcon Gomes Vaz (Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada – Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, PR, Brasil) E-mail: salete@uepg.br

Arion de Campos Junior (Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada – Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, PR, Brasil) E-mail: arion@uepg.br

Alaine Margarete Guimarães (Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada – Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, PR, Brasil) E-mail: alainemg@uepg.br

Resumo: No paradigma da Agricultura 5.0, os Gêmeos Digitais (*Digital Twins* – DT) emergem como arquiteturas promissoras para a viabilização da "agricultura individualizada" (manejo sítio-específico em escala de planta), permitindo o monitoramento dinâmico e o controle preditivo autônomo de ativos biológicos e físicos. Este artigo apresenta uma revisão narrativa estruturada da literatura (2021–2026) com o objetivo de investigar a estruturação técnica, as aplicações voltadas à sustentabilidade e os desafios abertos para a implementação dessa tecnologia no ecossistema agrícola e pós-colheita. A busca foi conduzida no Portal de Periódicos CAPES e no Google Acadêmico, recuperando 234 registros iniciais, dos quais 38 estudos compuseram o corpus final analisado em quatro eixos temáticos. A síntese qualitativa indica que, em aplicações avançadas de fenotipagem e reconstrução espacial, a modelagem virtual de alta fidelidade tem sido explorada mediante a integração de nuvens de pontos 3D, Campos de Radiância Neural (NeRF) e Modelagem Funcional-Estrutural de Plantas (FSPM). A inteligência dessas réplicas virtuais apoia-se em infraestruturas distribuídas de computação em nuvem e borda (*Edge/Cloud Computing*) e em algoritmos de aprendizado de máquina e controle (como visão computacional e inferência *Fuzzy*), enquanto o Aprendizado por Reforço (RL) é investigado em revisões e simulações para otimizar políticas de decisão autônoma e conferir autonomia operacional com baixa latência no campo. Em estudos de caso e simulações específicas, o potencial dessas soluções alinha-se predominantemente à dimensão ambiental dos princípios ambientais, sociais e de governança (ESG), contribuindo para a redução do consumo energético operacional, a otimização de recursos hídricos e nutricionais via taxa variável e a mitigação de perdas biológicas na rastreabilidade pós-colheita. Contudo, a adoção escalável enfrenta barreiras críticas, como a exclusão tecnológica decorrente dos altos custos, o gargalo da interoperabilidade semântica entre sistemas proprietários e a escassez de dados biológicos abertos para o treinamento de inteligência artificial. Conclui-se que o desenvolvimento de algoritmos custo-eficientes e a adoção de padrões abertos e mecanismos de interoperabilidade adequados aos diferentes contextos agrícolas são passos cruciais para democratizar o acesso à tecnologia e fomentar ecossistemas alimentares resilientes, transparentes e sustentáveis.

Palavras-chave: Agricultura 5.0, Gêmeos Digitais, Sustentabilidade Agrícola, Aprendizado por Reforço, Rastreabilidade Pós-Colheita, Interoperabilidade de Dados.

DIGITAL TWINS IN AGRICULTURE 5.0: A LITERATURE REVIEW (2021–2026) ON MODELING, CYBER-PHYSICAL ORCHESTRATION, AND SUSTAINABILITY

Abstract: In the Agriculture 5.0 paradigm, Digital Twins (DT) emerge as promising architectures for enabling "individualized agriculture" (site-specific management at the single-plant scale), allowing dynamic monitoring

and autonomous predictive control of biological and physical assets. This article presents a structured narrative literature review (2021–2026) aimed at investigating the technical structuring, sustainability-focused applications, and open challenges for implementing this technology in the agricultural and post-harvest ecosystem. Searches conducted in the CAPES Periodicals Portal and Google Scholar retrieved 234 initial records, from which 38 studies were selected and synthesized across four analytical axes. The qualitative synthesis indicates that, in advanced phenotyping and spatial reconstruction scenarios, high-fidelity virtual modeling has been explored through the integration of 3D point clouds, Neural Radiance Fields (NeRF), and Functional-Structural Plant Modeling (FSPM). The intelligence of these virtual replicas relies on distributed edge/cloud computing infrastructures and machine learning and control algorithms (such as computer vision and Fuzzy inference), whereas Reinforcement Learning (RL) is investigated in reviews and simulations to optimize autonomous decision-making policies, providing operational autonomy and low latency in the field. In specific case studies and simulations, the potential of these solutions predominantly aligns with the environmental dimension of environmental, social, and governance (ESG) principles, contributing to reduced operational energy consumption, the optimization of water and nutrient resources through variable rates, and the mitigation of biological losses in post-harvest traceability. However, scalable adoption faces critical barriers, such as technological exclusion due to high costs, the bottleneck of semantic interoperability between proprietary systems, and the lack of open biological data for training artificial intelligence. It is concluded that the development of cost-efficient algorithms and the adoption of open standards and domain-appropriate interoperability mechanisms are crucial steps to democratize access to technology and foster resilient, transparent, and sustainable food ecosystems.

Keywords: Agriculture 5.0, Digital Twins, Agricultural Sustainability, Reinforcement Learning, Post-Harvest Traceability, Data Interoperability.

1. Introdução

A agricultura enfrenta o desafio de garantir a segurança alimentar diante do crescimento populacional, das mudanças climáticas e da escassez de recursos (PELADARINOS *et al.*, 2023; TAGARAKIS *et al.*, 2024; CESCO *et al.*, 2023). O setor transita para a Agricultura 5.0, paradigma que alia a integração de inteligência artificial, robótica e análise de dados aos princípios de centralidade humana, resiliência operacional e sustentabilidade socioambiental (CATALA-ROMAN *et al.*, 2024; ZHANG *et al.*, 2025). Os Gêmeos Digitais (*Digital Twins* – DT) se inserem nesse contexto como instrumentos de gestão baseados no monitoramento e na simulação de processos por meio de réplicas virtuais (PYLIANIDIS; OSINGA; ATHANASIADIS, 2021; PURCELL; NEUBAUER, 2023; VERDOUW *et al.*, 2021).

Originário das indústrias de produção e aeroespacial, o conceito transcende, na agricultura, tanto o monitoramento baseado na Internet das Coisas (*Internet of Things* – IoT), quando restrito à coleta de dados, quanto a representação tridimensional estática. O Gêmeo Digital propriamente dito caracteriza-se como uma réplica virtual dinâmica de um ativo biológico ou físico (uma cultura, um solo, uma estufa ou um sistema de irrigação), atualizada com dados do mundo físico com sincronização frequente ou em tempo real e dotada de modelos comportamentais e capacidade de interação bidirecional, o que estreita a lacuna operacional entre a detecção do estado e a análise preditiva do sistema, embora a compreensão causal dos fenômenos biológicos permaneça condicionada à qualidade e à calibração dos modelos subjacentes (ALVES; MAIA; LIMA, 2023; PYLIANIDIS; OSINGA; ATHANASIADIS, 2021; VERDOUW *et al.*, 2021). Para que essa sincronização alcance representatividade estrutural e biológica, a abordagem híbrida de Modelagem Guiada por Conhecimento e Dados (*Knowledge-and-Data-Driven Modeling* – KDDM, também referida na literatura como modelagem híbrida ou guiada por física) atua como núcleo analítico de modelagem preditiva do Gêmeo Digital, articulando a infraestrutura de dados aos serviços de simulação e mecanismos de atuação ao combinar a capacidade adaptativa dos modelos orientados a dados às equações mecanísticas de processos físicos e fisiológicos (MITSANIS; HURST; TEKINERDOGAN, 2024).

Essa integração dota os gestores agrícolas de capacidades preditivas (simulação de cenários de crescimento e estresse) e prescritivas (recomendação e execução autônoma de intervenções), viabilizando o suporte à tomada de decisão em tempo real e impactando o manejo de recursos como água e insumos (ESCRIBÀ-GELONCH *et al.*, 2024; WANG, 2024; PYLIANIDIS; OSINGA; ATHANASIADIS, 2021).

Do ponto de vista técnico, a construção dessas réplicas se apoia em um conjunto de pilares desenvolvidos em detalhes na Seção 3: a reconstrução espacial por fotogrametria (*Structure from Motion* – SfM), sensores *Light Detection and Ranging* (LiDAR) e nuvens de pontos 3D, acoplada à Modelagem Funcional-Estrutural de Plantas (*Functional-Structural Plant Modeling* – FSPM) (ZHANG *et al.*, 2024; CATALA-ROMAN *et al.*, 2024; MITSANIS; HURST; TEKINERDOGAN, 2024); as plataformas abertas voltadas à interoperabilidade em contextos específicos, como o *middleware* de dados de contexto FIWARE e servidores *Open Platform Communications Unified Architecture* (OPC UA) oriundos da automação industrial (ALVES; MAIA; LIMA, 2023); as infraestruturas integradas de nuvem, névoa e borda, que conciliam armazenamento analítico e baixa latência (PLAGERAS; PSANNIS, 2022; ZHANG *et al.*, 2025); e o acoplamento de simuladores especializados distintos, abrangendo desde balanços térmicos de edificações, como o *EnergyPlus*, até modelos biofísicos de crescimento de culturas em escala de dossel, como o *Decision Support System for Agrotechnology Transfer* (DSSAT), aplicados em Ambientes de Agricultura Controlada (*Controlled Environment Agriculture* – CEA) (CHAUX; SANCHEZ-LONDONO; BARBIERI, 2021; SLOB *et al.*, 2023).

A inteligência desses sistemas é impulsionada pelo aprendizado de máquina, com destaque para o Aprendizado por Reforço (*Reinforcement Learning* – RL), subcampo que permite a adaptação sequencial de decisões pela interação contínua com o ambiente virtual (GOLDENITS *et al.*, 2024). A aplicação desses algoritmos esbarra na falta de transparência de suas escolhas (natureza de "caixa-preta"), desafio de confiança e explicabilidade tratado na Seção 4. Na fronteira da evolução conceitual e alinhados à centralidade humana da Agricultura 5.0, emergem ainda os Gêmeos Digitais Humanos (*Human Digital Twins* – HDTs), sistemas centrados no ser humano nos quais as operações, as interfaces e o maquinário se ajustam dinamicamente às condições ergonômicas, cognitivas e fisiológicas do trabalhador no campo (GARRÉ *et al.*, 2026).

Neste contexto, este artigo tem como objetivo fornecer uma revisão narrativa estruturada da literatura sobre Gêmeos Digitais na agricultura (com escopo delimitado a sistemas de produção vegetal, ambientes controlados e cadeias pós-colheita), com abordagem em aplicações na reconstrução morfológica, interação ciberfísica e sustentabilidade alinhada aos princípios Ambientais, Sociais e de Governança (*Environmental, Social, and Governance* – ESG). Ao mapear a fronteira do conhecimento estabelecido em publicações entre 2021 e 2026, esta pesquisa visa identificar lacunas técnicas, operacionais e socioeconômicas que orientam inovações tecnológicas no setor.

Para alcançar este propósito, a revisão foi estruturada em torno de três questões norteadoras: (Q1) Quais são as principais aplicações práticas e o atual nível de maturidade tecnológica dos Gêmeos Digitais na transição para a Agricultura 5.0? (Q2) Como a integração de modelagem morfológica (FSPM) e a orquestração de dados ciberfísicos potencializam a simulação e a tomada de decisão autônoma no campo? (Q3) Quais são as principais barreiras de infraestrutura, governança de dados e os desafios socioeconômicos que limitam a adoção escalável dessa tecnologia para a garantia da sustentabilidade agroalimentar sob as dimensões ambiental, social e de governança (ESG)?

O trabalho está estruturado, além desta seção introdutória, como segue. A Seção 2 apresenta a metodologia adotada. A Seção 3 detalha a revisão da literatura e suas principais aplicações. A Seção 4 discute os desafios identificados, as lacunas existentes na área e as limitações metodológicas da revisão. Por fim, a Seção 5 apresenta as conclusões do estudo.

2. Metodologia

Para a condução deste trabalho, foi delineada uma revisão narrativa estruturada da literatura, destinada a mapear as contribuições metodológicas e tecnológicas sobre a aplicação de Gêmeos Digitais na agricultura e a responder às três questões norteadoras propostas na Seção 1.

O levantamento e a atualização das buscas foram realizados no período compreendido entre 10 de setembro de 2025 e 15 de março de 2026 (tendo a execução final das buscas no Portal de Periódicos CAPES e no Google Acadêmico ocorrido em 15 de março de 2026, seguida de conferência complementar de metadados bibliográficos e links DOI até 05 de abril de 2026) no Portal de Periódicos CAPES (via acesso CAFe, utilizando a interface de busca integrada por assunto que indexa bases referenciais e de texto completo como *ScienceDirect*, *IEEE Xplore*, *Scopus*, *Web of Science*, *SpringerLink* e *DOAJ*) e na plataforma Google Acadêmico (*Google Scholar*), utilizando a expressão booleana nuclear em língua inglesa `"digital twin" AND "agriculture"`. Optou-se intencionalmente por esse par de descritores centrais para capturar um recorte transversal e representativo das arquiteturas explicitamente vinculadas ao conceito de Gêmeo Digital na agricultura (incluindo estudos sobre ambientes controlados, pomares e pós-colheita que indexam o termo *agriculture* no resumo, palavras-chave ou periódico), assumindo-se o caráter focal e não exaustivo do levantamento. A coleta foi restrita às publicações dotadas de registro *Digital Object Identifier* (DOI) — critério operacional adotado para assegurar a rastreabilidade permanente dos metadados e priorizar artigos definitivos de periódicos científicos revisados por pares — no período de 2021 a 2026, ressaltando-se que o ano de 2026, corrente à data da revisão, encontra-se parcialmente contemplado até a data da execução final das buscas (15 de março de 2026). A janela temporal abrange desde os marcos teóricos de sistematização que propuseram as primeiras tipologias de Gêmeos Digitais específicas para o setor agroalimentar (PYLIANIDIS; OSINGA; ATHANASIADIS, 2021; VERDOUW *et al.*, 2021) até as tendências tecnológicas mais recentes. Para mitigar a variabilidade algorítmica do Google Acadêmico e assegurar a reprodutibilidade operacional da coleta complementar, os resultados nessa plataforma foram ordenados por relevância (desmarcando-se a inclusão de patentes e citações meramente formais) e delimitados à inspeção sistemática das 10 primeiras páginas de resultados (10 registros por página, totalizando 100 registros), verificando-se a presença de registro DOI válido nos metadados exportados (via BibTeX/CrossRef) ou diretamente na página da editora de destino de cada hiperlink, enquanto a busca integrada no Portal de Periódicos CAPES retornou 134 registros revisados por pares. A busca inicial recuperou, assim, um total bruto de 234 registros (134 provenientes do Portal CAPES e 100 do Google Acadêmico), cujos metadados foram exportados em formato BibTeX e consolidados em planilha eletrônica para tratamento.

Na etapa subsequente de pré-processamento, procedeu-se à desduplicação cruzada entre as duas fontes mediante comparação semiautomática e verificação manual do identificador DOI e do título normalizado, resultando na remoção de 48 registros duplicados e na retenção de 186 registros únicos. Esses 186 estudos distintos foram submetidos à triagem inicial por leitura de título, resumo e palavras-chave, na qual 108 registros foram descartados por tratarem exclusivamente de pecuária, processos industriais alheios ao setor agroalimentar ou menções genéricas a sensores sem relação com Gêmeos Digitais, restando 78 publicações tematicamente aderentes.

Como filtro de seleção editorial, os periódicos de origem dessas 78 publicações foram consultados na Plataforma Sucupira (Qualis Periódicos/CAPES – Quadriênio 2017–2020, sob a sistemática do Qualis Unificado), adotando-se como critério de inclusão a classificação nos estratos A1 ou A2 nas áreas de avaliação de Ciências Agrárias I, Engenharias e Ciência da Computação. Para periódicos científicos lançados após o quadriênio 2017–2020 e ainda sem estrato atribuído na Plataforma Sucupira, aplicou-se como critério complementar a verificação de revisão por pares e indexação nas bases consultadas (*ScienceDirect/Elsevier*, *Scopus*, *Web of Science*, *IEEE Xplore*, *SpringerLink* e *MDPI*), via pela qual foram

admitidos seis estudos do corpus final: cinco publicados em *Smart Agricultural Technology* (DYCK *et al.*, 2023; PURCELL; NEUBAUER, 2023; GOLDENITS *et al.*, 2024; DU; JIN; JIN, 2025; GARRÉ *et al.*, 2026) e um em *Resources, Conservation and Recycling Advances* (RODRIGUEZ ROMO *et al.*, 2025), além de um estudo preliminar retido para leitura integral. Nessa verificação editorial, 31 artigos publicados em veículos fora dos estratos superiores (e sem enquadramento no critério complementar ou aporte arquitetural que justificasse exceção) foram excluídos. Dois trabalhos classificados fora desses estratos (A3 e C na avaliação daquele quadriênio) foram considerados, em caráter de exceção justificada, por sua aderência temática direta ao escopo da revisão: especificamente, o estudo de Tsaousidis *et al.* (2026), publicado no periódico *AI* (estrato A3 no mapeamento dos autores, mantido por abordar diretamente Inteligência Artificial e XAI em Gêmeos Digitais agrícolas), e o trabalho de Kalyani *et al.* (2024), publicado no periódico *Future Internet* (estrato C na consulta original, mantido por detalhar cenários arquiteturais de integração *Cloud-Fog-Edge* para culturas agrícolas). Essa etapa resultou em 47 artigos pré-selecionados para leitura integral.

Na triagem de elegibilidade, a leitura integral dos 47 trabalhos levou à exclusão de 9 artigos que não apresentavam relação aplicável ao estudo de Gêmeos Digitais e suas arquiteturas de suporte na agricultura: especificamente, foram excluídos estudos que tratavam de Gêmeos Digitais para processos químicos industriais de adsorção por modulação de pressão sem aplicação agroalimentar, levantamentos regionais sobre adoção geral de agricultura de precisão desprovidos de modelagem de Gêmeos Digitais,uma publicação voltada à operação de VANTs na Agricultura 4.0 com menção apenas prospectiva a réplicas virtuais (a qual havia passado pela triagem de metadados por integrar uma série científica da Springer dotada de ISSN seriado e registro DOI, sendo identificada na leitura integral como capítulo de livro seriado sem arquitetura de Gêmeo Digital), e artigos preliminares que abordavam redes de sensores IoT passivas, diretrizes gerais de IA ou domínios externos sem estruturação de um Gêmeo Digital agrícola. Ao final, obteve-se um corpus de 38 artigos de periódicos revisados por pares, abrangendo estudos experimentais agrícolas (12 artigos), propostas de arquiteturas e *frameworks* conceituais (7 artigos), revisões da literatura e bibliométricas (14 artigos) e estudos de fundamentação tecnológica transversal (5 artigos), cujas características temáticas, tecnológicas e referências são analisadas nas Tabelas 2 a 5 da Seção 3. Para evitar dupla contagem de evidências empíricas entre revisões prévias e estudos primários, os artigos de revisão foram empregados para mapear taxonomias, evolução conceitual e lacunas gerais (Eixo I), enquanto os indicadores técnicos e operacionais de implementação foram extraídos e creditados individualmente aos estudos primários e simulações correspondentes.

O processo de seleção, leitura integral e extração iterativa dos dados (registrando ano, título, estrato Qualis, autoria, periódico, resumo analítico, foco do estudo, natureza metodológica, ambiente produtivo, tecnologias, entradas de dados, nível de maturidade e limitações) foi conduzido inicialmente pelas duas primeiras autoras em matriz estruturada de mapeamento e submetido à revisão cruzada e validação consensual junto aos três coautores orientadores. A codificação temática ocorreu de forma indutiva após a leitura integral do corpus, agrupando os estudos por similaridade de escopo técnico e funcional em quatro eixos analíticos: (i) evolução teórica e marcos conceituais; (ii) reconstrução morfológica e modelagem física; (iii) interação ciberfísica e inteligência orquestrada; e (iv) sustentabilidade e gestão do ciclo de vida. A matriz completa de extração individual dos 38 estudos incluídos — discriminando todas as variáveis metodológicas, tecnológicas, limitações e o alinhamento às questões de pesquisa (Q1–Q3) —, bem como o registro detalhado da triagem e dos estudos excluídos na etapa de elegibilidade, encontram-se disponibilizados integralmente como Material Suplementar (planilha eletrônica). O protocolo completo compreende cinco etapas, conforme sintetizado na Tabela 1 e representado visualmente no fluxograma de seleção da Figura 1.

O corpus selecionado abrange artigos publicados em periódicos de editoras científicas como Elsevier (via *ScienceDirect*), IEEE (*IEEE Xplore*), Springer Nature e MDPI. Além dos 33 estudos dedicados direta-

Tabela 1 – Protocolo e etapas de seleção da revisão narrativa estruturada da literatura

Etapa da Pesquisa	**Parâmetros / Critérios Aplicados**	**Registros no Corpus**
1. Identificação e Desduplicação	Interfaces de busca: Portal de Periódicos CAPES (acesso CAFe) e Google Acadêmico (10 primeiras páginas por relevância). Expressão (em inglês): `"digital twin" AND "agriculture"` (jan./2021 a 15/03/2026; buscas entre 10/09/2025 e 15/03/2026, execução final em 15/03/2026 e conferência de metadados até 05/04/2026). Remoção de duplicados por DOI/título.	234 registros iniciais (CAPES: 134; Scholar: 100; 48 duplicados removidos → 186 únicos).
2. Triagem Inicial e Filtro Editorial	Triagem de título/resumo para aderência temática ao escopo agrícola/DT, seguida de filtro na Plataforma Sucupira (Qualis/CAPES 2017–2020, estratos A1/A2, indexação em bases revisadas por pares para títulos pós-2020 [6 artigos], e exceção justificada de Tsaousidis et al., 2026 [A3] e Kalyani et al., 2024 [C]).	108 excluídos por título/resumo (restam 78) e 31 pelo filtro Qualis → 47 artigos retidos.
3. Elegibilidade (Texto Completo)	Critério de exclusão: artigos que, após leitura integral, não apresentaram aderência temática ou arquitetural ao contexto de Gêmeos Digitais na agricultura (processos industriais PSA, capítulo de série em VANTs, IoT passivo ou escopo geral sem modelagem de DT).	9 artigos excluídos na leitura integral.
4. Seleção Final	Composição do corpus definitivo de análise após os filtros de elegibilidade e aderência.	38 artigos incluídos para síntese qualitativa (Tabelas 2 a 5).
5. Extração e Síntese	Extração iterativa de dados em matriz suplementar e categorização temática indutiva validada por consenso entre os autores.	4 eixos analíticos estruturados para discussão.

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

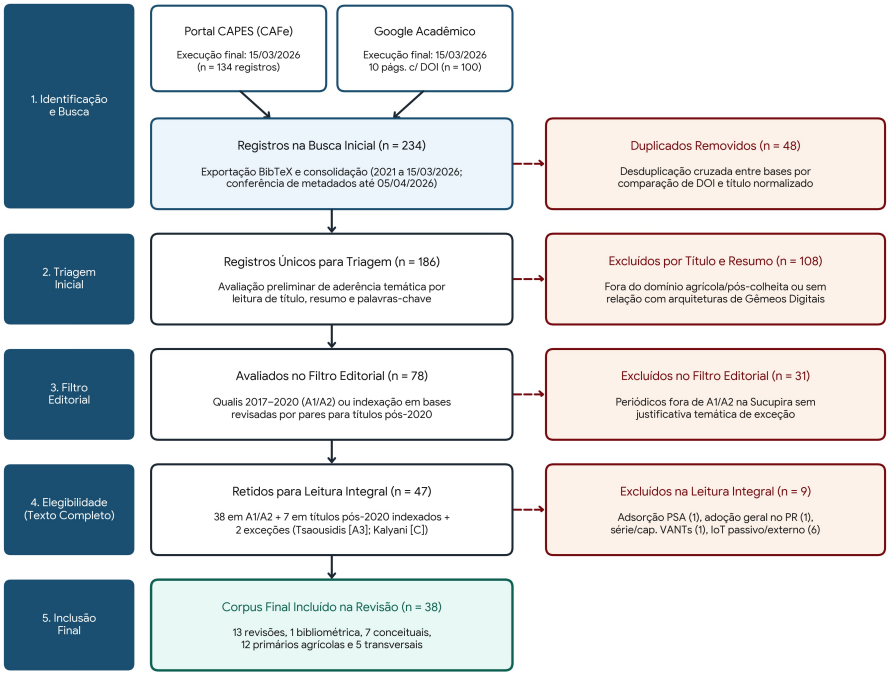


Figura 1 – Fluxograma das etapas de identificação, remoção de duplicidades, triagem por título/resumo, filtro editorial Qualis, avaliação de elegibilidade em texto completo e inclusão final dos estudos na revisão. Fonte: elaborado pelos autores (2026).

mente ao domínio agroalimentar, o corpus incorpora 5 artigos de fundamentação tecnológica transversal que fornecem os pilares computacionais e conceituais indispensáveis às arquiteturas agrícolas analisadas: a modelagem multidimensional e o ciclo de vida de Gêmeos Digitais em seis fases (TAO *et al.*, 2022); a integração entre Industrial IoT (IIoT) e Computação de Borda de Múltiplo Acesso (MEC) com bancos NoSQL em redes 6LoWPAN/5G (PLAGERAS; PSANNIS, 2022); a otimização matemática para alocação dinâmica de réplicas em *Serverless Edge Computing* mitigando atrasos de partida a frio (*cold*

start) (LI *et al.*, 2024); a detecção inteligente de anomalias em redes IoT combinando *Autoencoders* e XGBoost para capacidade de autocura (*self-healing*) (BOLAT-AKÇA; BOZKAYA-ARAS, 2024); e a agenda de "Sistemas Circulares Inteligentes" articulada aos princípios 10R da economia circular (RODRIGUEZ ROMO *et al.*, 2025).

3. Resultados e Discussão

A aplicação do protocolo metodológico resultou na consolidação de um corpus de 38 artigos, cuja análise evidencia a transição para a Agricultura 5.0, estágio evolutivo que transcende a agricultura de precisão (Agricultura 4.0) ao integrar Inteligência Artificial, aprendizado de máquina, robótica, veículos aéreos não tripulados (*drones*) e Internet das Coisas (IoT) em ecossistemas de decisão com coleta, armazenamento em nuvem e análise de dados em tempo real, orientados pela centralidade humana, resiliência e sustentabilidade (CATALA-ROMAN *et al.*, 2024; CESCO *et al.*, 2023). Nessa orquestração, os Gêmeos Digitais se aplicam em múltiplas escalas, do monitoramento de ativos individuais (plantas e máquinas) à gestão de instalações (estufas e silos) e cadeias de suprimentos (PELADARINOS *et al.*, 2023; GUND *et al.*, 2025; ZHANG *et al.*, 2025).

A caracterização quantitativa do corpus ($n = 38$) revela uma trajetória crescente de publicações entre 2021 e 15 de março de 2026: 3 artigos em 2021 (7,9%), 4 em 2022 (10,5%), 10 em 2023 (26,3%), 13 em 2024 (34,2%), 6 em 2025 (15,8%) e 2 nos primeiros meses de 2026 (5,3%). Geograficamente, considerando a afiliação institucional do primeiro autor, os estudos distribuem-se por 18 países, liderados por China (6 estudos), Países Baixos (4), Grécia (4), Itália (3), Espanha (3) e Áustria (3), seguidos por Brasil (2), Canadá (2), Coreia do Sul (2) e contribuições individuais (1 estudo cada) de Alemanha, Colômbia, Estados Unidos, Índia, Irlanda, Portugal, Rússia, Suíça e Turquia. Quanto à natureza metodológica, o portfólio compõe-se de 13 revisões da literatura/sistemáticas (34,2%) (AWAIS *et al.*, 2025; ESCRIBÀ-GELONCH *et al.*, 2024; GARRÉ *et al.*, 2026; GOLDENITS *et al.*, 2024; NASIRAHMADI; HENSEL, 2022; PELADARINOS *et al.*, 2023; PURCELL; NEUBAUER, 2023; PURCELL; NEUBAUER; MALLINGER, 2023; SILVA *et al.*, 2023; TAGARAKIS *et al.*, 2024; TSAOUSIDIS *et al.*, 2026; WANG, 2024; ZHANG *et al.*, 2025), 1 revisão bibliométrica (2,6%) (GUND *et al.*, 2025), 7 propostas de arquiteturas ou *frameworks* conceituais agrícolas (18,4%) (CESCO *et al.*, 2023; CHAUX; SANCHEZ-LONDONO; BARBIERI, 2021; DYCK *et al.*, 2023; KALYANI *et al.*, 2024; PYLIANIDIS; OSINGA; ATHANASIADIS, 2021; SEMIN *et al.*, 2023; VERDOUW *et al.*, 2021), 12 estudos primários/experimentais agrícolas (31,6%) (ALVES; MAIA; LIMA, 2023; CATALA-ROMAN *et al.*, 2024; CHO *et al.*, 2023; DE BORTOLI *et al.*, 2024; DU; JIN; JIN, 2025; GUIDANI; RONZONI; ACCORSI, 2024; KIM; HEO, 2024; MITSANIS; HURST; TEKINERDOGAN, 2024; RAJAREDDY *et al.*, 2025; SHOJI *et al.*, 2022; SLOB *et al.*, 2023; ZHANG *et al.*, 2024) e 5 artigos de fundamentação tecnológica transversal (13,2%) (BOLAT-AKÇA; BOZKAYA-ARAS, 2024; LI *et al.*, 2024; PLAGERAS; PSANNIS, 2022; RODRIGUEZ ROMO *et al.*, 2025; TAO *et al.*, 2022).

Em relação ao ambiente produtivo e sistema-alvo, os 38 estudos distribuem-se em cinco categorias ($21 + 9 + 4 + 1 + 3 = 38$): além dos 21 estudos de escopo geral/multiculturas ou de infraestrutura transversal (PYLIANIDIS; OSINGA; ATHANASIADIS, 2021; VERDOUW *et al.*, 2021; NASIRAHMADI; HENSEL, 2022; PLAGERAS; PSANNIS, 2022; TAO *et al.*, 2022; PELADARINOS *et al.*, 2023; PURCELL; NEUBAUER, 2023; PURCELL; NEUBAUER; MALLINGER, 2023; SEMIN *et al.*, 2023; BOLAT-AKÇA; BOZKAYA-ARAS, 2024; ESCRIBÀ-GELONCH *et al.*, 2024; GOLDENITS *et al.*, 2024; LI *et al.*, 2024; TAGARAKIS *et al.*, 2024; WANG, 2024; AWAIS *et al.*, 2025; GUND *et al.*, 2025; RODRIGUEZ ROMO *et al.*, 2025; ZHANG *et al.*, 2025; GARRÉ *et al.*, 2026; TSAOUSIDIS *et al.*, 2026), destacam-se 9 trabalhos voltados ao campo aberto e infraestrutura hídrica externa — abrangendo pomares de citros/tangerinas e macieiras (CATALA-ROMAN *et al.*, 2024; KIM; HEO, 2024; ZHANG

et al., 2024), culturas em fileiras de milho e soja (ALVES; MAIA; LIMA, 2023; DE BORTOLI *et al.*, 2024), lavouras de arroz (*Oryza sativa*) (RAJAREDDY *et al.*, 2025), culturas aráveis em geral (CESCO *et al.*, 2023; KALYANI *et al.*, 2024) e infraestrutura externa de canais de irrigação (CHO *et al.*, 2023) —, 4 dedicados a ambientes controlados e estufas (CEA), como cultivo de tomate, fenotipagem 3D e inspeção em Realidade Virtual (CHAUX; SANCHEZ-LONDONO; BARBIERI, 2021; DU; JIN; JIN, 2025; MITSANIS; HURST; TEKINERDOGAN, 2024; SLOB *et al.*, 2023), 1 específico para avaliação edáfica do solo (SILVA *et al.*, 2023) e 3 direcionados ao pós-colheita e cadeias de suprimentos de grãos e hortifrutícolas (DYCK *et al.*, 2023; GUIDANI; RONZONI; ACCORSI, 2024; SHOJI *et al.*, 2022). Avaliando-se o nível de maturidade tecnológica e validação empírica como uma dimensão analítica independente da tipologia metodológica, verifica-se que 15 estudos (39,5%) consistem em revisões ou agendas teóricas sem modelagem aplicada (compreendendo as 13 revisões da literatura, a revisão bibliométrica e a agenda teórica de sistemas circulares de RODRIGUEZ ROMO *et al.* (2025)) (AWAIS *et al.*, 2025; ESCRIBÀ-GELONCH *et al.*, 2024; GARRÉ *et al.*, 2026; GOLDENITS *et al.*, 2024; GUND *et al.*, 2025; NASIRAHMADI; HENSEL, 2022; PELADARINOS *et al.*, 2023; PURCELL; NEUBAUER, 2023; PURCELL; NEUBAUER; MALLINGER, 2023; RODRIGUEZ ROMO *et al.*, 2025; SILVA *et al.*, 2023; TAGARAKIS *et al.*, 2024; TSAOUSIDIS *et al.*, 2026; WANG, 2024; ZHANG *et al.*, 2025), 7 (18,4%) configuram propostas de arquiteturas ou modelos conceituais sem implementação experimental (CHAUX; SANCHEZ-LONDONO; BARBIERI, 2021; DYCK *et al.*, 2023; KALYANI *et al.*, 2024; PYLIANIDIS; OSINGA; ATHANASIADIS, 2021; SEMIN *et al.*, 2023; TAO *et al.*, 2022; VERDOUW *et al.*, 2021), 5 (13,2%) são validados via simulação computacional (*in silico* — incluindo o estudo de Cesco *et al.* (2023), que propõe um *framework* conceitual infológico acompanhado de síntese da literatura prévia e o valida mediante simulação *in silico* de prescrição de nitrogênio) (BOLAT-AKÇA; BOZKAYA-ARAS, 2024; CESCO *et al.*, 2023; GUIDANI; RONZONI; ACCORSI, 2024; LI *et al.*, 2024; PLAGERAS; PSANNIS, 2022), 6 (15,8%) apresentam protótipos validados em laboratório, plataforma web, estufa controlada ou bancada de simulação *Hardware-in-the-Loop* (HIL — caso do protótipo SWAMP de Alves, Maia e Lima (2023), validado em bancada experimental alimentada por séries meteorológicas reais) (ALVES; MAIA; LIMA, 2023; CHO *et al.*, 2023; DU; JIN; JIN, 2025; MITSANIS; HURST; TEKINERDOGAN, 2024; RAJAREDDY *et al.*, 2025; SLOB *et al.*, 2023) e apenas 5 estudos (13,2%) demonstram sistemas implantados e validados em condições reais de campo aberto ou cadeia logística comercial (CATALA-ROMAN *et al.*, 2024; DE BORTOLI *et al.*, 2024; KIM; HEO, 2024; SHOJI *et al.*, 2022; ZHANG *et al.*, 2024).

A literatura foi organizada em quatro eixos temáticos (PURCELL; NEUBAUER, 2023; WANG, 2024; TAGARAKIS *et al.*, 2024): o eixo de evolução teórica estabelece marcos de atualização e propõe roteiros de implementação (PYLIANIDIS; OSINGA; ATHANASIADIS, 2021; SEMIN *et al.*, 2023; TAO *et al.*, 2022); a reconstrução morfológica utiliza a Modelagem Funcional-Estrutural de Plantas (FSPM) e nuvens de pontos para a representação de ativos agrícolas (MITSANIS; HURST; TEKINERDOGAN, 2024; CATALA-ROMAN *et al.*, 2024); o de interação de sistemas concentra-se na orquestração ciberfísica e nos algoritmos de aprendizagem por reforço (ESCRIBÀ-GELONCH *et al.*, 2024; GOLDENITS *et al.*, 2024); e o de sustentabilidade direciona a tecnologia à rastreabilidade pós-colheita e às cadeias de suprimentos (CESCO *et al.*, 2023; GUIDANI; RONZONI; ACCORSI, 2024). A Tabela 2 apresenta essa estrutura, com a descrição de cada eixo, os principais conceitos tecnológicos e as referências analisadas, distinguindo sua natureza metodológica.

A estratificação apresentada na Tabela 2 demonstra a natureza interdisciplinar dos Gêmeos Digitais no agronegócio. A tecnologia não atua de forma isolada, mas integra sensores IoT, modelagem 3D, incluindo técnicas avançadas de nuvens de pontos e Campos de Radiância Neural (NeRF), algoritmos de inteligência artificial, como o aprendizado por reforço, e plataformas de controle em arquiteturas de borda, névoa e nuvem (*Edge*, *Fog* e *Cloud Computing*) para espelhar e otimizar as operações físicas. As subseções a seguir detalham criticamente o estado da arte de cada um desses quatro eixos, explorando

ISSN 2176-7270

Tabela 2 – Estruturação dos eixos analíticos e categorização metodológica dos 38 estudos do corpus

Eixo Analítico	Descrição e Foco Principal	Principais Tecnologias e Conceitos	Referências por Tipologia
I. Evolução teórica e marcos conceituais	Consolidação de bases teóricas e metodológicas sobre a transição para a Agricultura 5.0; definição de arquiteturas de referência para sistemas de gestão sincronizados em tempo real.	Níveis de integração de dados, gestão do ciclo de vida do produto (*Product Lifecycle Management* – PLM), tipologias de Gêmeos Digitais, *frameworks* baseados em IoT e sistemas ciberfísicos, modelagem adaptada para autonomia de decisão.	**Revisões:** (NASIRAHMADI; HENSEL, 2022; PELADARINOS *et al.*, 2023; PURCELL; NEUBAUER, 2023; TAGARAKIS *et al.*, 2024; WANG, 2024; AWAIS *et al.*, 2025; ZHANG *et al.*, 2025; GARRÉ *et al.*, 2026; TSAOUSIDIS *et al.*, 2026); **Bibliometria:** (GUND *et al.*, 2025); **Conceituais:** (PYLIANIDIS; OSINGA; ATHANASIADIS, 2021; VERDOUW *et al.*, 2021; SEMIN *et al.*, 2023); **Transversal (Manufatura):** (TAO *et al.*, 2022).
II. Reconstrução morfológica e modelagem física	Criação de representações visuais e funcionais (réplicas virtuais) do ambiente físico, desde plantas individuais até a topografia do terreno, utilizadas para fenotipagem e interação humano-computador.	Modelagem Funcional-Estrutural (FSPM), Campos de Radiância Neural (NeRF), ferramentas de nuvem de pontos 3D para Agricultura 5.0, fotogrametria, Realidade Virtual (RV) e Modelagem da Informação da Construção (*Building Information Modeling* – BIM) para monitoramento de infraestruturas agrícolas e ambientes internos.	**Primários (Campo):** (CATALA-ROMAN *et al.*, 2024; KIM; HEO, 2024; ZHANG *et al.*, 2024); **Primários (Prot./Estufa/Web):** (CHO *et al.*, 2023; SLOB *et al.*, 2023; MITSANIS; HURST; TEKINERDOGAN, 2024).
III. Interação ciberfísica e inteligência orquestrada	Foco na automação, processamento de dados em tempo real e controle cibernético das operações de campo, ligando os sensores físicos aos algoritmos de decisão, com detecção inteligente de anomalias para proteção de ativos conectados.	Internet das Coisas (IoT), Computação *Cloud/Edge/Fog*, Computação de Borda de Múltiplo Acesso (*Multi-access Edge Computing* – MEC), Aprendizado por Reforço (RL), *Internet of Agro-Things* (IoAT), Visão Computacional, Comunicação Máquina a Máquina (M2M), Orquestração de Dados e Sistemas de Detecção de Anomalias.	**Primários (Campo/Prot.):** (ALVES; MAIA; LIMA, 2023; DE BORTOLI *et al.*, 2024; DU; JIN; JIN, 2025; RAJAREDDY *et al.*, 2025); **Conceituais:** (CHAUX; SANCHEZ-LONDONO; BARBIERI, 2021; KALYANI *et al.*, 2024); **Revisões:** (ESCRIBÀ-GELONCH *et al.*, 2024; GOLDENITS *et al.*, 2024); **Transversais (IIoT/Edge/Seg.):** (PLAGERAS; PSANNIS, 2022; BOLAT-AKÇA; BOZKAYA-ARAS, 2024; LI *et al.*, 2024).
IV. Sustentabilidade e gestão do ciclo de vida	A aplicação da tecnologia promove a otimização de recursos naturais, eficiência econômica, redução do uso de insumos químicos e rastreabilidade segura dos produtos pós-colheita.	Gestão inteligente de irrigação, rastreabilidade na cadeia de suprimentos, avaliação de qualidade do solo, controle de emissões, Sistemas Circulares Inteligentes.	**Primários (Pós-colheita):** (SHOJI *et al.*, 2022; GUIDANI; RONZONI; ACCORSI, 2024); **Conceituais/Simul.:** (CESCO *et al.*, 2023; DYCK *et al.*, 2023); **Revisões:** (PURCELL; NEUBAUER; MALLINGER, 2023; SILVA *et al.*, 2023); **Transversal (Circular):** (RODRIGUEZ ROMO *et al.*, 2025).

Fonte: Elaborado pelos autores com base na Revisão da Literatura (2026).

os avanços, as tecnologias empregadas e as lacunas que ainda exigem investigação, como a segurança cibernética por meio de sistemas de detecção de anomalias e a superação de barreiras enfrentadas pelos agricultores no campo.

3.1 Evolução Teórica e Marcos Conceituais

A transição dos Gêmeos Digitais dos ambientes controlados da manufatura (TAO *et al.*, 2022) para a implementação agrícola exige adaptação conceitual, fundamentada no ajuste de modelos preexistentes para englobar a variabilidade biológica e climática do campo (PYLIANIDIS; OSINGA; ATHANASIADIS, 2021; VERDOUW *et al.*, 2021). O período de 2021 a 2024 concentrou a afirmação dos fundamentos teóricos dessa transição em direção à Agricultura 5.0 (TAGARAKIS *et al.*, 2024).

Historicamente, o setor agroalimentar percorreu transições sucessivas: da Agricultura 1.0, baseada em ferramentas simples e trabalho manual, passou-se à mecanização motorizada da Agricultura 2.0 e à "Revolução Verde", com insumos sintéticos; a eletrônica e as tecnologias de informação catalisaram a Agricultura 3.0, com sistemas de orientação por GPS, telemetria e gestão computadorizada; e a Agricultura 4.0 expandiu a conectividade com sensores de baixo custo, computação em nuvem, *drones* e *Big Data* (CESCO *et al.*, 2023; AWAIS *et al.*, 2025). Construída sobre esses avanços, a Agricultura 5.0 (*Smart Agriculture*) é impulsionada por Inteligência Artificial, aprendizado de máquina, redes IoT de baixa latência e alta taxa de transmissão e, de forma central, pelas arquiteturas de Gêmeos Digitais; seu diferencial é a transição do monitoramento passivo para a tomada de decisão autônoma e o controle preditivo em tempo real, integrados à centralidade humana, à ergonomia do trabalhador rural (via Gêmeos Digitais Humanos) e à resiliência socioambiental (CESCO *et al.*, 2023; CATALA-ROMAN *et al.*, 2024; PYLIANIDIS; OSINGA; ATHANASIADIS, 2021; GARRÉ *et al.*, 2026).

Do ponto de vista da integração de dados, a literatura recente adota uma taxonomia consolidada em três níveis baseada na direção e no grau de automação do fluxo informacional, distinguindo Modelo Digital (troca manual de dados entre o ativo físico e o modelo virtual), Sombra Digital (fluxo automatizado unidirecional do físico para o virtual) e Gêmeo Digital propriamente dito (sincronização automatizada bidirecional e capacidade de atuação sobre o ativo físico) (AWAIS *et al.*, 2025; TAGARAKIS *et al.*, 2024; PURCELL; NEUBAUER, 2023). Em paralelo, Verdouw *et al.* (2021) propuseram uma tipologia em seis níveis de maturidade: (i) imaginários, concebidos na fase de *design* para entidades simuladas ainda inexistentes; (ii) de monitoramento, focados no estado atual; (iii) preditivos, voltados para simulação de estados futuros; (iv) prescritivos, centrados na recomendação de ações; (v) autônomos, capazes de controle robótico em malha fechada sem intervenção humana; e (vi) de recordação, que preservam o histórico digital de entidades que deixaram de existir.

A evolução desses sistemas tem sido impulsionada pelo Aprendizado por Reforço aplicado à decisão no ambiente virtual (GOLDENITS *et al.*, 2024), seguindo roteiros de melhoria que integram modelagem, redes e análise para a curadoria preditiva do campo (PYLIANIDIS; OSINGA; ATHANASIADIS, 2021). A partir de 2023, as investigações se concentraram na orquestração de aplicações e em arquiteturas modulares que integram as réplicas às redes IoT (ESCRIBÀ-GELONCH *et al.*, 2024), com suporte de infraestruturas distribuídas em camadas de nuvem, névoa e borda que descentralizam o processamento e viabilizam ações de baixa latência (KALYANI *et al.*, 2024). A expansão da rede ciberfísica torna a cibersegurança um pilar, exigindo mecanismos de detecção inteligentes de anomalias e controles de integridade para proteger os dispositivos conectados (BOLAT-AKÇA; BOZKAYA-ARAS, 2024; PELADARINOS *et al.*, 2023). Análises bibliométricas confirmam o crescimento e a diversificação do tema, evidenciando a transição gradual de modelos conceituais para protótipos funcionais e aplicados (TAGARAKIS *et al.*, 2024; WANG, 2024; GUND *et al.*, 2025).

A principal restrição a essa maturidade decorre da complexidade integrada aos ecossistemas agrícolas: diferentemente dos ambientes estáticos da manufatura, a agricultura exige a modelagem de processos biológicos e condições climáticas estocásticas e dinâmicas, dificultando o mapeamento exato e a atuação cibernética direta (ESCRIBÀ-GELONCH *et al.*, 2024; VERDOUW *et al.*, 2021; PURCELL; NEUBAUER, 2023). Para superar essa barreira, destaca-se a Modelagem Funcional-Estrutural de Plantas (FSPM), que captura a arquitetura 3D e o comportamento das culturas nas interações entre fisiologia e microclima (MITSANIS; HURST; TEKINERDOGAN, 2024), e a transição para a Modelagem Híbrida (KDDM), que integra a capacidade adaptativa dos modelos orientados a dados ao conhecimento mecanístico das leis biológicas, compensando parcialmente as incertezas da variabilidade do campo (GOLDENITS *et al.*, 2024; PURCELL; NEUBAUER, 2023). A articulação entre FSPM e KDDM auxilia na conversão do ecossistema agrícola dinâmico em um ambiente passível de modelagem e suporte à decisão (GOLDENITS *et al.*, 2024; MITSANIS; HURST; TEKINERDOGAN, 2024).

A implementação prática, contudo, esbarra em desafios de infraestrutura e de fator humano, aprofundados na Seção 4: a deficiência de conectividade rural, mitigável em operações críticas locais pelo pré-processamento via Computação de Borda, reduz a dependência de banda larga contínua embora ainda exija sincronização periódica com a nuvem (PELADARINOS *et al.*, 2023; PLAGERAS; PSANNIS, 2022); a interoperabilidade de plataformas heterogêneas, endereçada em domínios específicos por padrões como OPC UA e FIWARE e por técnicas de fusão de dados orientadas por IA (PELADARINOS *et al.*, 2023; VERDOUW *et al.*, 2021); e as barreiras financeiras e ergonômicas, incluindo o desconforto visual e ciberenjoo (*cybersickness* / *simulation sickness*) documentado em interfaces de Realidade Virtual (RV) para estufas (ESCRIBÀ-GELONCH *et al.*, 2024; SLOB *et al.*, 2023). Nesse contexto, modelos de negócios propostos conceitualmente na literatura, como o "Gêmeo Digital como Serviço" (*Digital Twin as a Service* – DTaaS) e sistemas de locação, visam transformar a aquisição tecnológica em prestação de serviço, diluindo custos iniciais para os agricultores (VERDOUW *et al.*, 2021; WANG, 2024), enquanto o *design* das interfaces imersivas deve priorizar a usabilidade em detrimento do hiper-realismo visual (SLOB *et al.*, 2023).

3.2 Reconstrução Morfológica e Modelagem Física

A precisão de um Gêmeo Digital depende de sua fidelidade morfofisiológica à contraparte física. Para atingir esse nível de detalhamento, pesquisas articulam técnicas distintas que não devem ser confundidas: a simples visualização tridimensional estática (representação gráfica), a reconstrução geométrica (captura da forma espacial por nuvens de pontos ou malhas), os modelos fisiológicos e de processo (que simulam trocas gasosas, fotossíntese e balanço hídrico-nutricional) e, por fim, o Gêmeo Digital operacional, que acopla essas camadas à atualização contínua por sensores.

Catala-Roman *et al.* (2024) destacam a captura de dados via fotogrametria e a geração de nuvens de pontos 3D para mapear a geometria das culturas. Trabalhos específicos de fronteira expandem essa capacidade de reconstrução geométrica ao introduzir os Campos de Radiância Neural (NeRF) para reconstruções 3D de alta fidelidade em múltiplas escalas, enfrentando desafios de cenários complexos como pomares (KIM; HEO, 2024; ZHANG *et al.*, 2024). Para integrar modelos baseados em NeRF ao ciclo dinâmico de um Gêmeo Digital, a atualização morfológica ocorre de maneira discreta e periódica (por campanhas sucessivas de coleta de imagens ao longo dos estádios fenológicos), uma vez que o treinamento e a renderização volumétrica exigem alto custo computacional e múltiplas vistas calibradas, além de apresentarem sensibilidade a variações de iluminação solar, oclusão foliar, movimento causado pelo vento e dificuldades de generalização imediata entre diferentes pomares (ZHANG *et al.*, 2024).

Mitsanis, Hurst e Tekinerdogan (2024) destacam que uma representação tridimensional estática carece de capacidades preditivas, o que justifica a adoção de Modelos Funcionais-Estruturais de Plantas (FSPM)

para simular o comportamento biológico e adaptativo da cultura. Essa convergência fundamenta o potencial da chamada "agricultura individualizada", permitindo o manejo sítio-específico em escala de planta individual (árvore por árvore, em oposição ao manejo uniforme por talhão) (CATALA-ROMAN *et al.*, 2024; KIM; HEO, 2024).

Adicionalmente, a representação virtual abrange a avaliação do solo para uma fertilização responsiva e sustentável (CESCO *et al.*, 2023; SILVA *et al.*, 2023) e estende-se tanto ao monitoramento de infraestruturas hidráulicas externas de canais de irrigação — mediante a integração de sistemas de Informação Geográfica (GIS) e Modelagem da Informação da Construção (BIM) em plataforma web (CHO *et al.*, 2023) — quanto à inspeção de ambientes internos construídos (estufas) em Realidade Virtual (SLOB *et al.*, 2023).

3.3 Interação Ciberfísica e Inteligência Orquestrada: Robótica, IoAT e Interfaces Imersivas

A materialização das decisões no ecossistema do Gêmeo Digital ocorre pela atuação ciberfísica em arquiteturas de nuvem e borda ou névoa e borda (KALYANI *et al.*, 2024). No campo aberto, o controle de maquinário apoia-se em algoritmos de visão computacional baseados em correspondência de padrões (*template matching*) para guiar cultivadores autônomos (DE BORTOLI *et al.*, 2024), enquanto revisões da literatura exploram o potencial do Aprendizado por Reforço para otimizar operações robóticas e de manejo (GOLDENITS *et al.*, 2024); a Computação de Borda de Múltiplo Acesso (*Multi-access Edge Computing* – MEC) associada a bancos NoSQL em redes 6LoWPAN/5G e arquiteturas *Serverless Edge Computing* otimizam a alocação dinâmica de réplicas e a latência dos equipamentos móveis (PLAGERAS; PSANNIS, 2022; LI *et al.*, 2024), enquanto sistemas de detecção de anomalias baseados em *Autoencoders* e XGBoost atuam como uma camada complementar de autocura (*self-healing*) para reforçar a cibersegurança dos ativos conectados (BOLAT-AKÇA; BOZKAYA-ARAS, 2024), mitigando o risco físico de que comandos incorretos ou adulterados acionem indevidamente sistemas de irrigação, ventilação de estufas, dosadores de agroquímicos ou rotas de maquinário autônomo.

Na gestão de infraestruturas construídas e ambientes controlados, a tecnologia articula representações 3D de engenharia e interfaces imersivas, associando a Modelagem da Informação da Construção (BIM) e GIS ao monitoramento web de canais de irrigação externos (CHO *et al.*, 2023) e a Realidade Virtual (RV) à inspeção interna de estufas (SLOB *et al.*, 2023). A experiência do operador em uma réplica interativa 3D, retroalimentada em tempo real por redes de sensores IoT, viabiliza a gestão remota com consciência situacional espacial, reduz visitas físicas, mitigando riscos de contaminação biológica cruzada, e melhora a ergonomia analítica (SLOB *et al.*, 2023; VERDOUW *et al.*, 2021). A implementação enfrenta, porém, desafios de usabilidade: modelos densos que sobrecarregam a renderização provocam desconforto visual e náuseas (ciberenjoo – *cybersickness* / *simulation sickness*), limitando o tempo de uso contínuo (SLOB *et al.*, 2023).

A Internet das Coisas aplicada ao ecossistema agrícola (*Internet of Agro-Things* – IoAT) atua como infraestrutura sensorial e de atuação dos Gêmeos Digitais, estabelecendo a ponte entre entidades físicas (solo, culturas, maquinário) e o ambiente virtual (PELADARINOS *et al.*, 2023; VERDOUW *et al.*, 2021; ESCRIBÀ-GELONCH *et al.*, 2024). Suas redes coletam dados de alta resolução sobre umidade do solo, temperatura, pH e saúde fenotípica (ALVES; MAIA; LIMA, 2023); em comunicação bidirecional com as arquiteturas de nuvem e borda, o Gêmeo Digital envia comandos de controle aos atuadores, automatizando sistemas, otimizando recursos e mitigando riscos fitossanitários (ZHANG *et al.*, 2025; VERDOUW *et al.*, 2021).

Para superar as limitações dos modelos baseados exclusivamente em dados históricos, a inteligência

dessas réplicas evolui para abordagens híbridas e cognitivas: a fusão da FSPM com algoritmos de aprendizado de máquina (como *Reversible Jump Markov Chain Monte Carlo* – RJMCMC com *Simulated Annealing* para inferência de *L-Systems*) aprimora as predições de crescimento e arquitetura das culturas (MITSANIS; HURST; TEKINERDOGAN, 2024), enquanto os Gêmeos Digitais Cognitivos adotam Sistemas Multiagentes (*Multi-Agent Systems* – MAS), nos quais as decisões são negociadas cooperativamente entre entidades virtuais, como agentes de solo, de irrigação/clima e de cultura (PELADARINOS *et al.*, 2023). No controle autônomo multivariável, destacam-se o Aprendizado por Reforço Multiagente (*Multi-Agent Reinforcement Learning* – MARL) e métodos *Actor-Critic* para parâmetros climáticos em ambientes controlados (GOLDENITS *et al.*, 2024), Sistemas de Inferência *Fuzzy* para prescrições dinâmicas de irrigação (ALVES; MAIA; LIMA, 2023), redes convolucionais profundas e quaternions otimizadas por meta-heurísticas para diagnóstico fitossanitário em borda (DU; JIN; JIN, 2025; RAJAREDDY *et al.*, 2025) e algoritmos computacionalmente eficientes, como a correspondência de padrões (*template matching*), que viabilizam a navegação responsiva de cultivadores autônomos sem a sobrecarga computacional das redes neurais profundas (DE BORTOLI *et al.*, 2024).

Para materializar a orquestração dessa inteligência distribuída, a Figura 2 apresenta, de forma esquemática, uma arquitetura hierárquica em três camadas que sustenta a operação do Gêmeo Digital. Na base encontra-se a camada física, composta por sensores, maquinário (como *drones*) e ferramentas de diagnóstico de *hardware*, responsáveis pela coleta primária de dados do ambiente (PLAGERAS; PSANNIS, 2022; WANG, 2024). Logo acima, a computação de borda (*Edge Computing*) atua como primeira linha de processamento por meio de *gateways* e servidores locais, garantindo baixa latência para a filtragem de dados, a inferência local, o registro de ações e o tráfego de eventos máquina-a-máquina (M2M) (PLAGERAS; PSANNIS, 2022; ESCRIBÀ-GELONCH *et al.*, 2024).

Os dados filtrados e os alertas de anomalias são enviados à camada de computação em nuvem (*Cloud Computing*) que, operando com maior capacidade de armazenamento e processamento, hospeda a simulação global do Gêmeo Digital. É nesse ambiente computacional (ou de forma distribuída entre nuvem e borda, dependendo da arquitetura) que ocorre o treinamento de modelos complexos de Inteligência Artificial, incluindo o Aprendizado por Reforço, focado na otimização de funções de recompensa (ESCRIBÀ-GELONCH *et al.*, 2024; GOLDENITS *et al.*, 2024).

O fluxo do diagrama evidencia o ciclo de retroalimentação contínua constituído por essas arquiteturas: enquanto os dados brutos e alertas fluem das camadas inferiores para alimentar a atualização dos modelos na nuvem, os parâmetros de IA atualizados e as metas de otimização percorrem o caminho inverso, descendo para a borda e apoiando a operação adaptativa da propriedade (ESCRIBÀ-GELONCH *et al.*, 2024; WANG, 2024).

Uma vertente investigada nessas plataformas reside na integração de algoritmos preditivos e prescritivos, com destaque para o Aprendizado por Reforço (*Reinforcement Learning* – RL). No corpus analisado nesta revisão ($n = 38$), a análise do RL apoia-se centralmente na revisão sistemática dedicada de Goldenits *et al.* (2024) — que mapeou e categorizou 71 publicações primárias sobre RL na agricultura selecionadas a partir de 200 estudos — e em 10 revisões gerais que discutem seu potencial analítico para tomada de decisão autônoma (PURCELL; NEUBAUER, 2023; PURCELL; NEUBAUER; MALLINGER, 2023; NASIRAHMADI; HENSEL, 2022; PELADARINOS *et al.*, 2023; ESCRIBÀ-GELONCH *et al.*, 2024; WANG, 2024; AWAIS *et al.*, 2025; GUND *et al.*, 2025; ZHANG *et al.*, 2025; TSAOUSIDIS *et al.*, 2026), enquanto os 12 estudos primários experimentais do nosso portfólio adotam outras técnicas de decisão e controle (como inferência *Fuzzy*, *template matching*, aprendizado profundo supervisionado e simulação de eventos discretos). Conforme sistematizado por Goldenits *et al.* (2024), o RL atua como um mecanismo de otimização sequencial de políticas de controle para Gêmeos Digitais, abrangendo algoritmos como *Q-learning* tabular, *Deep Q-Network* (DQN — o mais prevalente na literatura agrícola), *Double DQN* (DDQN), *Deep Deterministic Policy Gradient* (DDPG), *Proximal Po-*

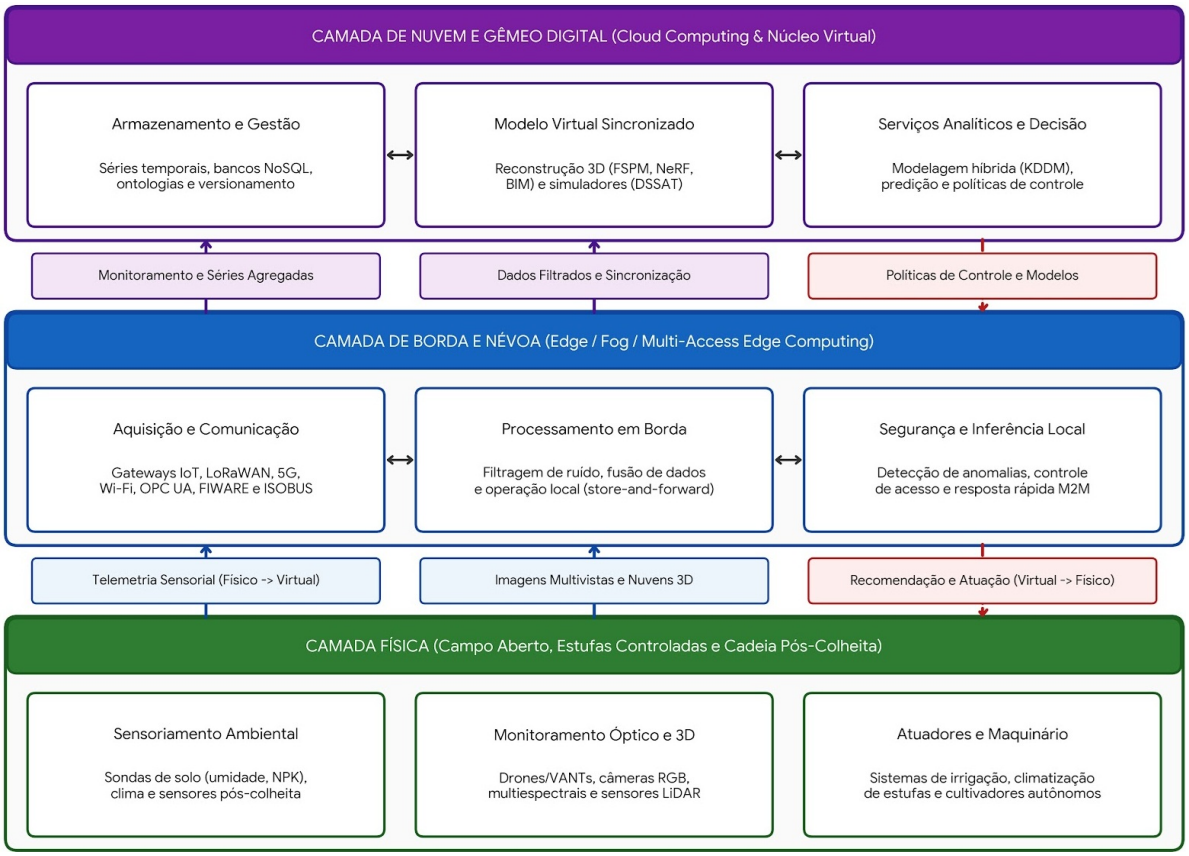


Figura 2 – Diagrama técnico da arquitetura hierárquica em três camadas (física, borda/névoa e nuvem) para Gêmeos Digitais na agricultura, destacando os subsistemas de aquisição, comunicação, processamento, modelagem, decisão e os fluxos bidirecionais físico-virtual (linha contínua) e virtual-físico (linha tracejada). Fonte: elaborado pelos autores (2026).

licy Optimization (PPO), *Soft Actor-Critic* (SAC), *Twin Delayed DDPG* (TD3), arquiteturas *Actor-Critic* (A2C, A3C e *Bayesian Actor-Critic*, identificadas em 19 dos 71 estudos) e abordagens cooperativas multiagentes (MARL e SCORE).

Em contrapartida ao aprendizado supervisionado baseado exclusivamente em conjuntos de dados históricos rotulados, o RL é um subcampo do aprendizado de máquina baseado em interação iterativa e focado na otimização de sequências de ações. Nesse modelo, o Gêmeo Digital (frequentemente acoplado a ambientes de simulação biofísica como *gym-DSSAT*, *CropGym* ou *CyclesGym*) atua como o ambiente virtual de simulação no qual o "agente" de IA interage (GOLDENITS *et al.*, 2024).

A formulação matemática nos estudos revisados por Goldenits *et al.* (2024) articula quatro componentes concretos conforme o domínio agrícola: (i) no manejo de irrigação, o espaço de estados (*states*) engloba umidade edáfica, evapotranspiração da cultura e previsão pluviométrica, as ações (*actions*) definem o acionamento de bombas e a lâmina/vazão por zona, a função de recompensa (*reward*) pondera positivamente a manutenção da faixa hídrica ótima e o rendimento da safra enquanto penaliza o desperdício hídrico e o estresse da planta, sob restrições (*constraints*) de capacidade de bombeamento e disponibilidade de reservatório; (ii) na climatização de estufas, os estados reúnem temperatura interna/externa, umidade relativa, concentração de CO_2 e radiação solar, as ações controlam aberturas de ventilação, cortinas térmicas, aquecedores e iluminação LED, a recompensa maximiza o ganho de massa seca da cultura minimizando o custo elétrico, operando sob restrições de resposta à demanda energética e mascaramento de ações (*soft action masking*) para proibir estados térmicos letais; e (iii) na gestão nutricional e de cul-

turas, os estados monitoram níveis de NPK, carbono orgânico do solo e estádio fenológico, as ações prescrevem taxas variáveis de fertilização e rotação de culturas, e a recompensa equilibra produtividade econômica contra penalizações severas por lixiviação de nitratos (GOLDENITS *et al.*, 2024).

Dessa forma, o algoritmo ajusta sua política de decisão no ambiente virtual antes de sua transferência para o mundo físico, embora a eficácia e a segurança dessa transferência dependam da fidelidade do simulador (problema da lacuna simulação-realidade, ou *sim-to-real gap*) e de travas operacionais físicas. A Figura 3 ilustra a comparação entre os fluxos operacionais de cada abordagem.

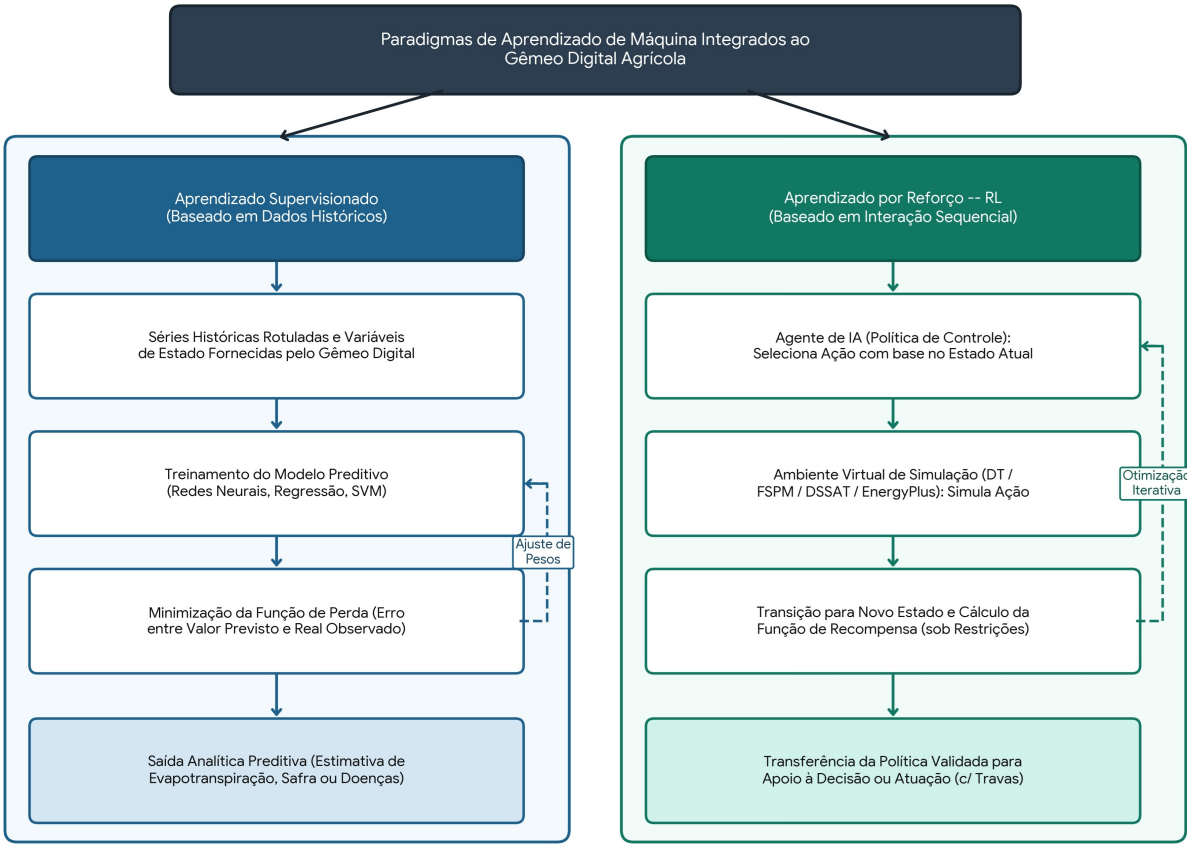


Figura 3 – Comparação conceitual entre os fluxos operacionais do Aprendizado Supervisionado (baseado em dados históricos) e do Aprendizado por Reforço (RL) como paradigmas do aprendizado de máquina integrados ao Gêmeo Digital. Fonte: elaborado pelos autores (2026).

Para elucidar as diferenças operacionais entre essas abordagens dentro do aprendizado de máquina, a Tabela 3 compara as dinâmicas entre o Aprendizado Supervisionado (baseado em dados históricos) e o Aprendizado por Reforço (RL) no contexto dos Gêmeos Digitais.

Tabela 3 – Comparativo entre Aprendizado Supervisionado (Baseado em Dados Históricos) e Aprendizado por Reforço na Agricultura

Característica	**Aprendizado Supervisionado (Dados Históricos)**	**Aprendizado por Reforço (RL)**
Mecanismo de Aprendizado	Treinamento baseado na identificação de padrões e correlações em dados históricos rotulados (MITSANIS; HURST; TEKINERDOGAN, 2024).	Aprendizagem sequencial dinâmica baseada em interação iterativa (tentativa e erro) com o ambiente (GOLDENITS *et al.*, 2024).

Continua na próxima página...

Tabela 3 – Continuação

Característica	**Aprendizado Supervisionado (Dados Históricos)**	**Aprendizado por Reforço (RL)**
Dependência de Dados e Amostragem	Alta dependência de conjuntos de dados históricos predefinidos e rotulados para o treinamento inicial (PURCELL; NEUBAUER, 2023).	Menor dependência de séries históricas rotuladas a priori, mas requer elevado volume de episódios de interação simulada (baixa eficiência amostral) e alta fidelidade do simulador (PURCELL; NEUBAUER, 2023; GOLDENITS *et al.*, 2024).
Objetivo Principal	Prever resultados, estimar variáveis de estado (ex.: evapotranspiração da cultura, rendimento) e classificar dados (MITSANIS; HURST; TEKINERDOGAN, 2024; ZHANG *et al.*, 2025).	Otimizar uma política sequencial de ações para controle e tomada de decisão autônoma (GOLDENITS *et al.*, 2024; ZHANG *et al.*, 2025).
Papel do Gêmeo Digital (DT)	O DT integra fluxos de dados multimodais, atualiza estados virtuais, simula cenários e fornece variáveis estruturadas para os modelos preditivos (ZHANG *et al.*, 2025).	O DT atua como o ambiente de simulação dinâmico onde o "agente" de IA interage e observa os efeitos de suas ações antes da atuação física (GOLDENITS *et al.*, 2024).
Sinal de *Feedback* (Ajuste)	O modelo é ajustado pela minimização de uma função de perda (erro de predição entre o valor previsto e o valor real observado) (GOLDENITS *et al.*, 2024).	O modelo é ajustado pela maximização da recompensa acumulada definida por uma função de recompensa (*reward function*) (GOLDENITS *et al.*, 2024).

Fonte: Elaborado pelos autores com base na Revisão da Literatura (2026).

Para fins de organização sistemática, a Tabela 4 compila as dimensões tecnológicas emergentes abordadas, as suas aplicações diretas no ecossistema agrícola, o estágio de maturidade tecnológica e os artigos que fundamentam o estado da arte nesses domínios.

Tabela 4 – Síntese das principais tecnologias, ambientes produtivos, maturidade e aplicações dos Gêmeos Digitais na agricultura (2021–2026)

Dimensão Tecnológica	**Cultura e Ambiente-Alvo**	**Aplicação Prática, Metodologia e Maturidade**	**Referências**
Modelagem 3D, FSPM e Agricultura Individualizada	Pomares de citros/tangerinas e macieiras (campo aberto) e estufas de fenotipagem.	Reconstrução e Fenotipagem: utilização de VANTs (*drones*) com câmeras RGB/multiespectrais e métodos NeRF para gerar reconstruções e nuvens de pontos 3D (validados em campo aberto), integrados a Modelos Funcionais-Estruturais (FSPM) (protótipo em estufa) para simular o crescimento dinâmico e viabilizar o manejo planta por planta.	(CATALA-ROMAN *et al.*, 2024; MITSANIS; HURST; TEKINERDOGAN, 2024; KIM; HEO, 2024; ZHANG *et al.*, 2024)
Monitoramento Preditivo de Doenças e Irrigação	Campos de arroz (*Oryza sativa*), milho/soja irrigados e estufas de tomateiros.	Detecção de Doenças e Automação: Gêmeos Digitais acoplados a Redes de Sensores Sem Fio (WSNs), arquiteturas *fog/edge*, algoritmos de Aprendizado Profundo e inferência *Fuzzy* (protótipos validados em bancada/simulação HIL e estufas) para classificação precoce de doenças foliares e prescrição hídrica.	(ALVES; MAIA; LIMA, 2023; DU; JIN; JIN, 2025; ZHANG *et al.*, 2025; RAJAREDDY *et al.*, 2025)

Continua na próxima página...

Tabela 4 – Continuação

Dimensão Tecnológica	**Cultura e Ambiente-Alvo**	**Aplicação Prática, Metodologia e Maturidade**	**Referências**
Modelagem Edáfica	Avaliação da qualidade do solo em múltiplos sistemas agrícolas.	Mapeamento do Estado da Arte (revisão sistemática): identificação de como sensores de solo (IoT) estão sendo integrados a Gêmeos Digitais, destacando como principal lacuna a ausência de modelos de controle preditivo em malha fechada para a automação da fertilização.	(SILVA *et al.*, 2023)
Robótica e Automação Terrestre	Culturas em fileiras (campo aberto).	Controle Mecânico de Plantas Daninhas: validação em campo real de algoritmo de visão computacional de baixo custo com base em correspondência de padrões (*template matching*), testado em um Gêmeo Digital simulando infestações para calcular o desvio lateral em tempo real e guiar cultivadores autônomos.	(DE BORTOLI *et al.*, 2024)
Realidade Virtual (RV) e BIM	Estufas de alta tecnologia e infraestrutura de canais de irrigação.	Inspeção Remota e Interação Humano-Computador (HCI): criação de protótipos 3D (BIM/GIS/Web) de instalações físicas (validados em laboratório/ambiente controlado), avaliando ergonomia, interface visual e a incidência de ciberenjoo (*cybersickness* / *simulation sickness*) durante inspeções virtuais.	(SLOB *et al.*, 2023; CHO *et al.*, 2023)
Orquestração *Edge/Fog/Cloud*	Ambientes agrícolas dinâmicos (agricultura arvense, estufas e hidroponia) e redes IIoT.	Sincronização Ciberfísica (arquiteturas conceituais e simulações de rede): uso de Computação de Borda (*Edge/MEC/Serverless*) e Névoa (*Fog*) para processar dados de sensores IoT localmente, reduzindo a latência e permitindo interações M2M em tempo real.	(ESCRIBÀ-GELONCH *et al.*, 2024; KALYANI *et al.*, 2024; PLAGERAS; PSANNIS, 2022; LI *et al.*, 2024)
Aprendizado por Reforço (RL) e Simulação CEA	Controle de irrigação, clima em estufas (CEA) e manejo de culturas.	Tomada de Decisão Autônoma (revisão de 71 estudos e arquitetura conceitual CEA): o RL atua como mecanismo de otimização de políticas de controle (DQN, DDPG, PPO, SAC, *Actor-Critic*, MARL), utilizando o Gêmeo Digital (ou acoplamentos EnergyPlus/DSSAT) como ambiente virtual de simulação.	(GOLDENITS *et al.*, 2024; CHAUX; SANCHEZ-LONDONO; BARBIERI, 2021)

Fonte: Elaborado pelos autores com base na Revisão da Literatura (2026).

3.4 Sustentabilidade e Gestão do Ciclo de Vida

A gestão do ciclo de vida das culturas encontra nos Gêmeos Digitais o suporte para modelos agrícolas ambientalmente sustentáveis: as plataformas permitem simular e predizer o consumo de recursos em diferentes estádios fenológicos, evitando a aplicação excessiva de fertilizantes e agroquímicos e reduzindo a lixiviação de nutrientes e a contaminação de água e solo (CESCO *et al.*, 2023; PURCELL; NEUBAUER, 2023; ESCRIBÀ-GELONCH *et al.*, 2024).

Escribà-Gelonch *et al.* (2024) categorizam os benefícios dessa transição em quatro frentes: preservação do solo, desenvolvimento da cultura, adaptabilidade climática e eficiência de maquinário. No nível edáfico, a tecnologia atua preventivamente contra a erosão e o esgotamento de nutrientes (SILVA *et al.*, 2023); no manejo da fertilização nitrogenada, o processamento da variabilidade espacial define taxas variáveis e sítio-específicas de aplicação, minimizando a lixiviação de nitratos e a emissão operacional

de gases de efeito estufa sem comprometer o rendimento (CESCO *et al.*, 2023).

Na gestão hídrica, os sistemas de supervisão em malha fechada abandonam cronogramas estáticos e cruzam, em tempo real, umidade do solo e evapotranspiração para especificar o volume de água: no protótipo baseado na plataforma IoT FIWARE do projeto SWAMP (validado em bancada de simulação *Hardware-in-the-Loop* – HIL acoplada a simulação de eventos discretos), Alves, Maia e Lima (2023) avaliaram a prescrição de irrigação em zonas de manejo de 8×22 m utilizando séries meteorológicas de São Bernardo do Campo/SP, demonstrando que o Sistema de Inferência *Fuzzy* prescreveu uma lâmina de 2,00 mm (352,0 L) frente a 4,15 mm (730,4 L) do método padrão de Penman-Monteith (FAO-56), resultando em uma redução simulada de 51,8% no volume hídrico aplicado no ciclo avaliado. Em culturas de arroz (*Oryza sativa*), a irrigação regulada por redes de sensores sem fio opera simultaneamente à detecção precoce de doenças foliares por Aprendizado Profundo (ZHANG *et al.*, 2025; RAJAREDDY *et al.*, 2025).

A otimização estende-se à chamada "agricultura individualizada" (KIM; HEO, 2024): em pomares de tangerinas, dados multiespectrais viabilizam a fertilização em taxas variáveis baseadas nas necessidades de cada árvore (KIM; HEO, 2024); em estufas, modelos térmicos acoplados ao Aprendizado por Reforço ajustam iluminação e ventilação, minimizando o gasto energético operacional sem comprometer o desenvolvimento vegetal (GOLDENITS *et al.*, 2024; WANG, 2024). A orquestração ciberfísica aplicada ao maquinário pesado viabiliza o monitoramento contínuo e o controle preditivo da performance energética (NASIRAHMADI; HENSEL, 2022). No âmbito do planejamento produtivo, Semin *et al.* (2023) desenvolveram um *framework* teórico-metodológico de modelagem organizacional e simulação comparativa aplicado a complexos agropecuários na Rússia (abrangendo cultivo de soja, suinocultura e avicultura na região de Belgorod), no qual a comparação entre fazendas convencionais (base de comparação sem Gêmeo Digital) e cenários integrados à arquitetura proposta estimou reduções de 21% no material de sementes e de 19% no uso de fertilizantes, além de 7% de otimização nos custos logísticos da cadeia de suprimentos e 25% de ganho produtivo. Já quanto à eficiência energética mecanizada, a síntese bibliográfica integrante do estudo de Cesco *et al.* (2023) reporta (a partir da literatura prévia de agricultura de precisão, sem identificar nominalmente o estudo primário de origem) que a variação espacial da profundidade de escarificação do solo e da irrigação em taxa variável apresenta o potencial de reduzir em 34% o consumo de combustível e em 56% os requisitos gerais de energia.

Além do campo, a sustentabilidade liga-se à rastreabilidade de ponta a ponta no pós-colheita. Réplicas virtuais de silos e elevadores de grãos superam a regra convencional de "um passo à frente, um passo atrás", monitorando continuamente como a qualidade do produto evolui durante a secagem, resfriamento e transporte, fornecendo uma representação preditiva do inventário biológico (DYCK *et al.*, 2023). Nas cadeias de frio de hortifrutícolas perecíveis, o estudo primário de Shoji *et al.* (2022) — também destacado na revisão de Escribà-Gelonch *et al.* (2024) — monitorou 331 remessas comerciais reais de pepino, berinjela, morango e framboesa exportadas de empacotadoras na Espanha, via transporte rodoviário refrigerado, até centros de distribuição e lojas de varejo na Suíça. Acoplando modelos físicos de transferência de calor e massa por elementos finitos à cinética de deterioração, os Gêmeos Digitais diagnosticaram que os produtos perderam entre 43% e 85% de sua qualidade inicial (média de aproximadamente 60% de perda de qualidade — sendo 43% na berinjela, 50% no pepino, 70% no morango e 85% na framboesa) antes mesmo da exposição nas gôndolas, com o trecho internacional de 1,94 dia respondendo por 39% da degradação total. Esse monitoramento preditivo permite alertar os operadores antes que a deterioração biológica atinja níveis críticos, mitigando perdas e desperdício (*food waste*), garantindo biossegurança até o consumidor final e apoiando a transição para cadeias de suprimentos transparentes e circulares (SHOJI *et al.*, 2022; ESCRIBÀ-GELONCH *et al.*, 2024; GUIDANI; RONZONI; ACCORSI, 2024).

A literatura aponta limitações associadas à sustentabilidade da própria tecnologia (PURCELL; NEUBAUER; MALLINGER, 2023): falhas de projeto, algoritmos não transparentes ("caixa-preta") e depen-

dência excessiva da automação podem gerar instabilidade e efeitos emergentes indesejados (PURCELL; NEUBAUER, 2023), além da expansão de dispositivos IoT no campo e do consumo energético das infraestruturas de nuvem e treinamento de IA, levantando questões sobre resíduos eletrônicos (*e-waste*) e exigindo uma transição do consumo tecnológico linear para estratégias de economia circular (princípios 10R em "Sistemas Circulares Inteligentes") e logística reversa (ESCRIBÀ-GELONCH *et al.*, 2024; RODRIGUEZ ROMO *et al.*, 2025), em consonância contextual com diretrizes regulatórias como a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010) no Brasil, que institui a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos eletroeletrônicos. Para sintetizar o potencial dessas tecnologias, a Tabela 5 resume as metodologias e os indicadores quantitativos reportados.

A análise crítica dos indicadores compilados na Tabela 5 evidencia a importância de distinguir a natureza metodológica de cada métrica reportada no corpus: enquanto a redução de 51,8% no volume de água provém do protótipo SWAMP validado em bancada de simulação HIL alimentada por dados meteorológicos locais (ALVES; MAIA; LIMA, 2023) e o diagnóstico de 43% a 85% (média de $\sim$60%) de perda de qualidade pós-colheita baseia-se no monitoramento empírico de 331 cargas comerciais acoplado a modelos multifísicos (SHOJI *et al.*, 2022), os índices de redução de 19% em fertilizantes e 21% em sementes (bem como 7% de otimização logística e 25% de incremento produtivo) decorrem de estimativas de modelagem teórico-metodológica organizacional comparada ao manejo convencional em propriedades russas (SEMIN *et al.*, 2023), ao passo que as reduções de 34% em combustível e 56% em energia constituem dados secundários mencionados na síntese bibliográfica de Cesco *et al.* (2023) a partir da literatura de agricultura de precisão, sem identificação do estudo primário. A leitura conjunta da Tabela 5 e das evidências reportadas demonstra que os ganhos de sustentabilidade não decorrem de uma tecnologia isolada, mas da orquestração entre sensoriamento contínuo, simulação preditiva e atuação prescritiva ao longo de todo o ciclo de vida, do manejo sítio-específico no campo à cadeia de frio pós-colheita (CESCO *et al.*, 2023; DYCK *et al.*, 2023; ESCRIBÀ-GELONCH *et al.*, 2024).

Vale ressaltar que os percentuais mencionados na literatura representam potenciais observados em estudos de caso, simulações e cenários específicos, cuja generalização depende de fatores como a cultura gerenciada, a escala da propriedade, a infraestrutura de conectividade disponível e a qualidade da calibração dos modelos (PURCELL; NEUBAUER, 2023; ZHANG *et al.*, 2025). Assim, a materialização desses benefícios em larga escala permanece condicionada à superação de barreiras econômicas, técnicas e de dados que ainda restringem a adoção da tecnologia, desafios que serão explorados na seção seguinte.

4. Desafios e Lacunas de Pesquisa

Embora o avanço tecnológico descrito seja relevante, a revisão da literatura revela barreiras que impedem a adoção massiva dos Gêmeos Digitais. A identificação dessas lacunas direciona pesquisas empíricas e teóricas futuras.

4.1 Custo-Eficiência, Conectividade e Dimensão Social

A adoção de Gêmeos Digitais na agricultura enfrenta um desafio socioeconômico relacionado à custo-eficiência e à exclusão tecnológica. A maioria das propostas de arquitetura exige investimentos iniciais substanciais em infraestruturas de computação em nuvem (*Cloud Computing*), redes de sensores IoT de alto custo e expertise técnica especializada, além de custos operacionais recorrentes com manutenção física, recalibração periódica e substituição de sensores expostos a intempéries climáticas, radiação solar e abrasão edáfica, somados ao consumo energético contínuo das infraestruturas de processamento e

Tabela 5 – Impactos comparativos de sustentabilidade via Gêmeos Digitais

Recurso / Métrica	**Abordagem Tradicional de Gestão**	**Abordagem Integrada com Gêmeo Digital**	**Impacto Reportado / Contexto do Indicador**	**Referência**
Água (Irrigação)	Irrigação baseada em temporizadores ou cálculo estático padrão (FAO-56).	Protótipo FIWARE/SWAMP validado em bancada de simulação HIL com inferência *Fuzzy*.	Redução simulada de 51,8% no volume irrigado (352,0 L / 2,00 mm vs. 730,4 L / 4,15 mm de Penman-Monteith em parcelas de 8×22 m).	(ALVES; MAIA; LIMA, 2023)
Fertilizantes	Aplicação uniforme em taxa fixa por toda a área.	Prescrição preditiva em taxa variável segundo variabilidade espacial e modelagem organizacional.	Minimização da lixiviação de nitratos em simulação *in silico* (CESCO *et al.*, 2023) e estimativa de 19% de redução em fertilizantes em modelagem comparativa de empresas agrícolas russas vs. manejo convencional (SEMIN *et al.*, 2023).	(CESCO *et al.*, 2023; SEMIN *et al.*, 2023)
Perdas Pós-Colheita	Monitoramento estático de temperatura no transporte (“um passo à frente”).	Simulação física por elementos finitos da evolução térmica e cinética de deterioração por lote.	Diagnóstico de perdas médias de $\sim$60% de qualidade (43% a 85%) em 331 remessas de hortifrutícolas (Espanha–Suíça) para ação preventiva.	(SHOJI *et al.*, 2022; ESCRIBÀ-GELONCH *et al.*, 2024; DYCK *et al.*, 2023)
Energia e Combustíveis	Controle climático convencional em estufas e preparo uniforme do solo.	Controle via Aprendizado por Reforço em estufas e manejo mecanizado sítio-específico em campo.	Otimização energética em estufas (GOLDENITS *et al.*, 2024) e menção secundária na síntese bibliográfica de Cesco *et al.* (2023) (sem identificação do estudo primário) de até 34% de economia de combustível e 56% de energia em preparo variável do solo.	(GOLDENITS *et al.*, 2024; CESCO *et al.*, 2023; NASIRAHMADI; HENSEL, 2022)
Defensivos (Herbicidas)	Aplicação química preventiva e uniforme em toda a lavoura.	Gêmeos Digitais acoplados a visão computacional (*template matching*) para guiar cultivadores autônomos.	Substituição do controle químico pelo controle mecânico de plantas daninhas, evitando a contaminação química do solo.	(DE BORTOLI *et al.*, 2024; SILVA *et al.*, 2023)
Sementes e Planejamento	Densidade de plantio fixa e gestão convencional em fazendas comerciais.	Modelagem organizacional e simulação comparativa de processos agrícolas (soja, suinocultura e avicultura na Rússia).	Estimativa teórico-metodológica comparada ao manejo convencional apontando redução de 21% em sementes, 7% de otimização logística e 25% de ganho produtivo.	(SEMIN *et al.*, 2023)

Fonte: Elaborado pelos autores com base na Revisão da Literatura (2026).

comunicação.

Conforme alertam Purcell e Neubauer (2023) e Wang (2024), essa exigência de capital cria uma barreira de entrada para pequenos e médios produtores, podendo gerar o que a literatura crítica denomina como "privilégio do Gêmeo Digital", conceito que descreve o risco de agravamento da desigualdade e ampliação do fosso tecnológico no meio rural. Sob a dimensão social dos critérios ESG, a adoção assimétrica impacta diretamente o trabalho rural, exigindo programas de qualificação profissional e letramento digital, interfaces acessíveis e mecanismos que preservem a autonomia decisória do agricultor frente a plataformas automatizadas e ao risco de aprisionamento tecnológico (*vendor lock-in*) por grandes fornecedores (PURCELL; NEUBAUER, 2023; GARRÉ *et al.*, 2026). Análises qualitativas de custo-benefício discutidas na literatura sugerem que, em propriedades de menor escala ou com margens de lucro estreitas, o retorno sobre o investimento (*Return on Investment* – ROI) de sistemas complexos pode ser insuficiente para justificar os gastos de implementação e manutenção contínua (ZHANG *et al.*, 2025).

Para democratizar o acesso a essas inovações, as pesquisas apontam uma transição tecnológica para soluções modulares, escaláveis e descentralizadas. DE BORTOLI *et al.* (2024) exemplificaram essa mudança de paradigma ao propor algoritmos de visão computacional de baixo custo e computacionalmente eficientes (custo-eficientes) para guiar operações autônomas no campo.

O desenvolvimento de modelos algorítmicos mais "leves", aliados a infraestruturas de processamento local na borda da rede (*Edge Computing*), reduz a dependência de hardwares onerosos e minimiza a necessidade de transmissão contínua de grandes volumes de dados para a nuvem. No contexto de conectividade rural deficitária, essas arquiteturas demandam mecanismos de tolerância a falhas, operação desconectada (*offline*) com armazenamento temporário local (*store-and-forward*) e protocolos de comunicação de longo alcance e baixo consumo (como LoRaWAN), embora a conectividade externa ainda seja requerida periodicamente para atualização de modelos globais e sincronização com a cadeia de suprimentos (PELADARINOS *et al.*, 2023; PLAGERAS; PSANNIS, 2022). Essa abordagem descentraliza as opções econômicas da tecnologia, promovendo uma digitalização agrícola mais inclusiva e adaptável à realidade de propriedades de menor escala.

4.2 O Gargalo da Interoperabilidade e Cibersegurança

A ausência de normas e de padronização na indústria agrícola constitui um importante entrave para a adoção de Gêmeos Digitais (WANG, 2024). No ecossistema agrícola, a infraestrutura física é heterogênea: um produtor específico opera tratores de um fabricante, redes de sensores climáticos de outro e sistemas de supervisão proprietários de uma terceira, acentuando o risco de dependência de ecossistemas fechados (*vendor lock-in*).

Fazer com que esses sistemas fechados alimentem um modelo digital unificado em tempo real esbarra em barreiras que se manifestam em quatro níveis distintos de interoperabilidade: (i) técnica, relativa aos protocolos físicos e de rede para conexão entre dispositivos; (ii) sintática, referente à padronização de formatos e estruturas de dados (como JSON ou XML); (iii) semântica, ligada à capacidade de sistemas distintos interpretarem de forma inequívoca o significado agronômico das variáveis compartilhadas; e (iv) organizacional, associada ao alinhamento de processos de negócios, governança e políticas de acesso entre diferentes elos da cadeia agroalimentar (VERDOUW *et al.*, 2021; ZHANG *et al.*, 2025). A integração dessas arquiteturas distintas e de suas Interfaces de Programação de Aplicações (*Application Programming Interfaces* – APIs) demanda esforço computacional para a harmonização de protocolos, a conversão de formatos de dados, a identificação unívoca de ativos físicos, o controle de qualidade dos fluxos sensoriais, o versionamento de modelos e a sincronização temporal entre as fontes (ESCRIBÀ-

GELONCH *et al.*, 2024; ZHANG *et al.*, 2025).

Para superar a fragmentação e romper com os chamados "silos de dados", torna-se necessária a transição para o uso de ontologias compartilhadas (como *Smart Data Models* do ecossistema FIWARE AgriFood, vocabulários AGROVOC da FAO e padrões da *Open Geospatial Consortium* – OGC) e padrões de dados abertos para o setor agroalimentar (ALVES; MAIA; LIMA, 2023; CHO *et al.*, 2023). A adoção de protocolos padronizados de comunicação, como o padrão ISOBUS (ISO 11783) no escopo de tratores e implementos agrícolas, permite facilitar a comunicação entre hardwares de diferentes fabricantes, viabilizando a orquestração Máquina a Máquina (*Machine-to-Machine* – M2M) e o controle preditivo derivado ao Gêmeo Digital (ESCRIBÀ-GELONCH *et al.*, 2024; WANG, 2024).

Paralelamente à integração de redes heterogêneas, a ampliação da superfície de conexão ciberfísica exige arquiteturas robustas de segurança cibernética. Além dos sistemas de detecção inteligente de anomalias no tráfego de rede (BOLAT-AKÇA; BOZKAYA-ARAS, 2024), a operação segura de um Gêmeo Digital requer mecanismos de autenticação mútua, controle estrito de autorização e acesso, criptografia para confidencialidade e integridade dos dados transmitidos, disponibilidade operacional, gestão segura de atualizações de *firmware* e travas de proteção física nos atuadores, prevenindo que falhas de comunicação ou ataques cibernéticos resultem em intervenções físicas danosas à lavoura ou ao maquinário (PELADARINOS *et al.*, 2023; BOLAT-AKÇA; BOZKAYA-ARAS, 2024).

4.3 Escassez de Conjuntos de Dados Biológicos Abertos e Governança

Embora algoritmos prescritivos, como o Aprendizado por Reforço (RL), possuam a vantagem de aprender por interação iterativa, a construção e a calibração inicial do ambiente virtual no qual operam exigem bases sólidas de dados físicos.

Pesquisas recentes alertam que a comunidade científica enfrenta uma escassez de conjuntos de dados (*datasets*) práticos, fenotípicos e edafoclimáticos em código aberto (*open-source*), obtidos diretamente do campo para o treinamento de algoritmos de aprendizado de máquina. Embora iniciativas e repositórios públicos — como a base de imagens fitossanitárias *PlantVillage*, o repositório *AgData Commons* (USDA), a rede *Global Open Data for Agriculture and Nutrition* (GODAN) e diretrizes baseadas nos princípios FAIR (*Findable, Accessible, Interoperable, Reusable*) — tenham ampliado a disponibilidade de dados estáticos, ainda são escassos os conjuntos de dados longitudinais e multimodais sincronizados exigidos para calibrar Gêmeos Digitais ao longo de todo o ciclo fenológico (MITSANIS; HURST; TEKINERDOGAN, 2024; TAGARAKIS *et al.*, 2024).

Essa limitação técnica articula-se diretamente à dimensão de governança (G) dos princípios ESG no campo: a ausência de marcos regulatórios claros sobre titularidade e propriedade dos dados agrícolas, privacidade comercial das fazendas, consentimento no compartilhamento de informações produtivas, auditabilidade algorítmica e definição de responsabilidade civil em caso de perdas decorrentes de decisões automatizadas gera desconfiança entre os produtores e restringe a formação de repositórios colaborativos abertos (PURCELL; NEUBAUER, 2023; WANG, 2024).

Trabalhos aplicados, como o de DE BORTOLI *et al.* (2024), e revisões, como a de Tagarakis *et al.* (2024), evidenciam essa lacuna na prática. DE BORTOLI *et al.* (2024) relatam a ausência de conjuntos de dados compartilhados para o treinamento de modelos de visão agrícola, o que exige a geração de ambientes sintéticos substitutos como solução alternativa. Conforme demonstram Mitsanis, Hurst e Tekinerdogan (2024), Goldenits *et al.* (2024) e Zhang *et al.* (2025), o desenvolvimento de modelos preditivos e de gestão do ciclo de vida encontra desafios na aquisição de dados empíricos e na disponibilidade limitada de dados estruturados.

Sem repositórios que forneçam dados de validação e protocolos contínuos de recalibração, as réplicas virtuais arriscam-se a operar com níveis elevados de incerteza, dificultando a exploração e a validação de todo o potencial da IA na ciência de plantas. A avaliação rigorosa da fidelidade de um Gêmeo Digital requer o monitoramento conjunto de métricas de erro de predição (como raiz do erro quadrático médio – RMSE e erro absoluto médio – MAE), latência de transmissão, frequência de sincronização físico-virtual, disponibilidade do sistema e robustez fora do domínio de treinamento. Consequentemente, a deficiência de dados representativos compromete a eficácia das decisões, agravando a vulnerabilidade do sistema quando as réplicas virtuais são expostas a desvios de dados e de conceito (*data drift* e *concept drift*) decorrentes de variações entre safras, anomalias climáticas, mudanças de manejo edáfico, diferentes cultivares e transições entre estádios fenológicos, conforme alertam Purcell e Neubauer (2023).

Para garantir uma operação mais robusta diante desses desvios, recomenda-se a adoção da modelagem híbrida. Essa abordagem, também referida especificamente por autores como Mitsanis, Hurst e Tekinerdogan (2024) como Modelagem Guiada por Conhecimento e Dados (KDDM – *Knowledge-and-Data-Driven Modeling*), integra a capacidade analítica e preditiva dos algoritmos de aprendizado de máquina (limitados por sua natureza de "caixa-preta") ao rigor das explicações físicas e estruturais do sistema biológico das culturas (MITSANIS; HURST; TEKINERDOGAN, 2024).

Ao restringir a lógica de tomada de decisão com base em conhecimento agronômico, o modelo híbrido mitiga parte das incertezas geradas pela falta de dados, contribuindo para um comportamento operacional mais consistente, embora ainda sujeito a erros de calibração e incertezas paramétricas, mesmo sob estresses climáticos não previstos no treinamento inicial (MITSANIS; HURST; TEKINERDOGAN, 2024; PURCELL; NEUBAUER, 2023). A integração de técnicas de Inteligência Artificial Explicável (*Explainable Artificial Intelligence* – XAI) auxilia na transparência algorítmica para que as simulações e recomendações geradas pelo Gêmeo Digital sejam mais interpretáveis para agricultores e agrônomos, embora a explicabilidade computacional não substitua a necessidade de validação agronômica em campo (TSAOUSIDIS *et al.*, 2026).

Por outro lado, quando a aplicação do Gêmeo Digital se volta para Ambientes de Agricultura Controlada (CEA), como estufas, o foco da arquitetura se desloca da resiliência climática externa para a otimização da produtividade frente ao alto consumo energético e de recursos (CHAUX; SANCHEZ-LONDONO; BARBIERI, 2021). Nesses ambientes internos, pesquisas destacam o uso de arquiteturas centralizadas em uma "Camada de Inteligência", responsável por orquestrar simultaneamente simuladores de microclima de edificações, como o *EnergyPlus*, e modelos biofísicos de desenvolvimento de culturas, como o DSSAT, permitindo a definição autônoma e em tempo real das melhores estratégias de controle climático e manejo (CHAUX; SANCHEZ-LONDONO; BARBIERI, 2021).

4.4 Limitações Metodológicas da Revisão

A interpretação dos resultados desta revisão narrativa estruturada deve considerar as escolhas metodológicas de seu delineamento. Primeiramente, optou-se por uma expressão booleana nuclear em língua inglesa (`"digital twin" AND "agriculture"`), visando capturar os estudos centrais da área; contudo, reconhece-se que trabalhos que empregam exclusivamente descritores correlatos (como *"smart farming"*, *"precision agriculture"*, *"greenhouse"* ou *"livestock"*) sem mencionar o termo *"agriculture"* nos metadados podem não ter sido integralmente alcançados. De modo semelhante, a restrição a publicações dotadas de registro DOI privilegiou a rastreabilidade permanente de artigos de periódicos, mas pode ter preterido relatórios técnicos, normas ou anais de conferências desprovidos desse identificador, enquanto o período de buscas (realizado entre 10 de setembro de 2025 e 15 de março de 2026, com execução final das consultas em ambas as bases em 15 de março de 2026 e conferência de metadados até 05 de abril de 2026) contempla apenas parcialmente a produção do ano de 2026.

Adicionalmente, o uso complementar do Google Acadêmico ao Portal de Periódicos CAPES está sujeito a algoritmos de ranqueamento dinâmicos, o que limita a reprodutibilidade exata de buscas futuras. O emprego do sistema Qualis Periódicos (Quadriênio 2017–2020, sob a regra do Qualis Unificado nas áreas de Ciências Agrárias I, Engenharias e Ciência da Computação, complementado pela verificação de indexação nas bases ScienceDirect, IEEE Xplore, Springer Nature e MDPI para títulos lançados após o quadriênio) atuou como um filtro de seleção editorial, não substituindo uma avaliação formal de risco de viés metodológico individual de cada estudo. Por fim, dada a emergência recente do tema, o corpus reflete a heterogeneidade da própria literatura de 2021 a 2026, que ainda combina uma expressiva proporção de revisões teóricas, arquiteturas conceituais e simulações frente a um número reduzido de implantações validadas em campo aberto por múltiplas safras, exigindo cautela na generalização dos indicadores de desempenho operacional.

5. Conclusão

A predição, a prescrição e a autonomia de ciclo fechado definem a evolução da Agricultura 5.0. Respondendo à primeira questão de pesquisa (Q1), sobre as aplicações práticas e o nível de maturidade tecnológica, a análise da literatura no período de 2021 a 2026 indica o avanço dos Gêmeos Digitais não apenas como representações visuais, mas como arquiteturas cibernéticas que viabilizam a transição para a "agricultura individualizada" (KIM; HEO, 2024). As aplicações mapeadas abrangem a irrigação de precisão em malha fechada (ALVES; MAIA; LIMA, 2023), a detecção precoce de doenças (ZHANG *et al.*, 2025), o controle mecânico de plantas daninhas por cultivadores autônomos (DE BORTOLI *et al.*, 2024), a inspeção remota imersiva de estufas (SLOB *et al.*, 2023) e a rastreabilidade pós-colheita (DYCK *et al.*, 2023). Quanto à maturidade, observa-se a transição de modelos conceituais para protótipos funcionais e aplicados, embora a autonomia plena em malha fechada permaneça, majoritariamente, restrita a ambientes controlados (TAGARAKIS *et al.*, 2024; WANG, 2024).

No que se refere à segunda questão (Q2), sobre como a integração da modelagem morfológica e a orquestração ciberfísica potencializam a simulação e a decisão autônoma, as pesquisas evidenciam que o desempenho dessas réplicas virtuais baseia-se nos avanços da modelagem da morfologia de plantas e do solo, utilizando nuvens de pontos 3D, Campos de Radiância Neural (NeRF) e a Modelagem Funcional-Estrutural de Plantas (FSPM) (MITSANIS; HURST; TEKINERDOGAN, 2024; ZHANG *et al.*, 2024), permitindo respostas simuladas bioquímicas e arquitetônicas da cultura. A orquestração desses ecossistemas integra redes de robótica e infraestruturas de computação de borda e nuvem (*Edge/Cloud Computing*) para garantir o processamento de dados em tempo real (ZHANG *et al.*, 2025; DE BORTOLI *et al.*, 2024), operando em conjunto com algoritmos de visão computacional e inferência *Fuzzy* nos protótipos e implantações avaliados (ALVES; MAIA; LIMA, 2023; DE BORTOLI *et al.*, 2024), enquanto o Aprendizado por Reforço (RL) é investigado nas revisões e simulações da literatura como um paradigma promissor para otimizar políticas de decisão autônoma (GOLDENITS *et al.*, 2024). O emprego da tecnologia associa-se predominantemente à dimensão ambiental dos princípios de sustentabilidade e ESG (Ambiental, Social e Governança), entregando uma aplicação otimizada de fertilizantes, a redução do consumo energético operacional e a economia de recursos hídricos (CESCO *et al.*, 2023; PURCELL; NEUBAUER, 2023). O impacto estende-se à mitigação das perdas alimentares, reduzindo a opacidade logística por meio da rastreabilidade e da simulação da deterioração biológica pós-colheita em cadeias de suprimentos virtuais (DYCK *et al.*, 2023; ESCRIBÀ-GELONCH *et al.*, 2024; SHOJI *et al.*, 2022).

Finalmente, respondendo à terceira questão (Q3), sobre as barreiras e lacunas para a adoção, o estudo revela que a expansão dos Gêmeos Digitais esbarra no gargalo da interoperabilidade semântica, na fragmentação de padrões e modelos de dados entre sistemas proprietários (WANG, 2024) e na escassez crítica de conjuntos de dados biológicos abertos para o treinamento de Inteligência Artificial (MITSANIS;

HURST; TEKINERDOGAN, 2024; TAGARAKIS *et al.*, 2024). O custo financeiro das soluções em nuvem e dos sensores IoT suscita na literatura o alerta sobre um potencial "privilégio do Gêmeo Digital", agravando a exclusão tecnológica de pequenos produtores (PURCELL; NEUBAUER, 2023; WANG, 2024). As pesquisas futuras devem concentrar-se na articulação de padrões abertos e ontologias interoperáveis adaptados a cada domínio produtivo, no desenvolvimento de algoritmos computacionalmente eficientes (custo-eficientes) (DE BORTOLI *et al.*, 2024) e na detecção inteligente de anomalias aliada a arquiteturas de proteção para a cibersegurança (BOLAT-AKÇA; BOZKAYA-ARAS, 2024; ZHANG *et al.*, 2025).

A superação dessas limitações estruturais e socioeconômicas é uma condição para a consolidação de um ecossistema de produção pautado pela resiliência, transparência e sustentabilidade em larga escala. No âmbito tecnológico e financeiro, a adoção de plataformas de código aberto e o desenvolvimento de Gêmeos Digitais modulares e escaláveis têm o potencial de reduzir as barreiras e os custos de implementação (ESCRIBÀ-GELONCH *et al.*, 2024). A transição para modelos de negócios propostos conceitualmente com base em sistemas de "produto-serviço", priorizando a oferta de tecnologia ou de infraestrutura inteligente como serviço, visa democratizar o acesso entre pequenos e médios produtores (VERDOUW *et al.*, 2021; WANG, 2024).

Visando mitigar a pegada ambiental e a geração de lixo eletrônico (*e-waste*) subjacente aos controles de sensores IoT, as diretrizes acadêmicas recomendam a integração dos processos a uma Economia Circular, implementando esquemas de logística reversa e designs sustentáveis (ESCRIBÀ-GELONCH *et al.*, 2024; RODRIGUEZ ROMO *et al.*, 2025). A implementação de arquiteturas de modelagem híbrida atua compensando parcialmente as deficiências das "caixas-pretas" dos sistemas orientados especificamente a dados e aprimorando a robustez preditiva do Gêmeo Digital diante de anomalias climáticas (MITSANIS; HURST; TEKINERDOGAN, 2024; PURCELL; NEUBAUER, 2023).

Para superar as barreiras de interação humano-computador, a otimização de interfaces imersivas, através da correção de falhas de renderização gráfica, a representação visual de controles no ambiente virtual e a definição de tarefas guiadas, é importante para mitigar os efeitos de ciberenjoo (*cybersickness*), proporcionando um ambiente de operação ergonômico, intuitivo e seguro para o operador (SLOB *et al.*, 2023).

Em conclusão, os Gêmeos Digitais emergem como arquiteturas promissoras para a viabilização da "agricultura individualizada", impulsionando a evolução em direção ao paradigma da Agricultura 5.0.

Referências

ALVES, R. G.; MAIA, R. F.; LIMA, F. Development of a Digital Twin for smart farming: Irrigation management system for water saving. **Journal of Cleaner Production**, v. 388, p. 135920, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.135920>. Acesso em: 28 fev. 2026.

AWAIS, M. *et al.* Advancing precision agriculture through Digital Twins and smart farming technologies: A review. **AgriEngineering**, v. 7, n. 5, p. 137, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agriengineering7050137>. Acesso em: 03 abr. 2026.

BOLAT-AKÇA, B.; BOZKAYA-ARAS, E. Digital twin assisted intelligent anomaly detection system for Internet of Things. **Ad Hoc Networks**, v. 158, p. 103484, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2024.103484>. Acesso em: 20 mar. 2026.

CATALA-ROMAN, P. *et al.* Leveraging Digital Twins for Agriculture 5.0: A comparative analysis of 3D point cloud tools. **Applied Sciences**, v. 14, n. 5, p. 1709, 2024. Disponível em:

<https://doi.org/10.3390/app14051709>. Acesso em: 28 fev. 2026.

CESCO, S. *et al.* Smart agriculture and digital twins: Applications and challenges in a sustainability vision. **European Journal of Agronomy**, v. 146, p. 126809, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2023.126809>. Acesso em: 02 mar. 2026.

CHAUX, J. D.; SANCHEZ-LONDONO, D.; BARBIERI, G. A digital twin architecture to optimize productivity within controlled environment agriculture. **Applied Sciences**, v. 11, n. 19, p. 8875, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app11198875>. Acesso em: 03 abr. 2026.

CHO, J. *et al.* Web-based agricultural infrastructure digital twin system integrated with GIS and BIM concepts. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 215, p. 108441, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.108441>. Acesso em: 05 abr. 2026.

DE BORTOLI, L. *et al.* Low-cost algorithm for autonomous cultivators: Implementing template matching with field digital twins for precision agriculture. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 226, p. 109509, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109509>. Acesso em: 05 abr. 2026.

DU, W.; JIN, P.; JIN, W. Smart farm digital twin model based on edge-cloud architecture for tomato monitoring and detection. **Smart Agricultural Technology**, v. 10, p. 101254, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.101254>. Acesso em: 04 mar. 2026.

DYCK, G. *et al.* Digital twins: A new traceability concept for post-harvest handling. **Smart Agricultural Technology**, v. 3, p. 100079, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100079>. Acesso em: 04 mar. 2026.

ESCRIBÀ-GELONCH, M. *et al.* Digital twins in agriculture: Orchestration and applications. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 72, n. 19, p. 10737–10752, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.4c01934>. Acesso em: 20 mar. 2026.

GARRÉ, S. O. *et al.* Human digital twins for Agriculture 5.0: A systematic literature review and taxonomy. **Smart Agricultural Technology**, v. 12, p. 101791, 2026. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.atech.2026.101791>. Acesso em: 15 mar. 2026.

GOLDENITS, G. *et al.* Current applications and potential future directions of reinforcement learning-based digital twins in agriculture. **Smart Agricultural Technology**, v. 8, p. 100512, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100512>. Acesso em: 07 mar. 2026.

GUIDANI, B.; RONZONI, M.; ACCORSI, R. Virtual agri-food supply chains: A digital twin for food ecosystem design, control and transparency. **Sustainable Production and Consumption**, v. 46, p. 161–179, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.01.016>. Acesso em: 07 mar. 2026.

GUND, R. *et al.* Application of Digital Twin technology in smart agriculture: A bibliometric review. **Agriculture**, v. 15, n. 17, p. 1799, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agriculture15171799>. Acesso em: 22 mar. 2026.

KALYANI, Y. *et al.* Digital twin application scenarios for smart agriculture via cloud-fog-edge infrastructure. **Future Internet**, v. 16, n. 3, p. 100, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/fi16030100>. Acesso em: 01 abr. 2026.

KIM, S.; HEO, S. An agricultural digital twin for tangerines demonstrates potential for individualized agriculture. **Nature Communications**, v. 15, p. 1561, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41467-024-45725-x>. Acesso em: 09 mar. 2026.

LI, J. *et al.* Throughput maximization in Digital Twin-enabled serverless edge computing. **IEEE Transactions on Computers**, v. 73, n. 7, p. 1840–1853, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TC.2024.3388897>. Acesso em: 01 abr. 2026.

MITSANIS, C.; HURST, W.; TEKINERDOGAN, B. A 3D functional-structural plant modeling framework for agricultural digital twins. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 218, p. 108733, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.108733>. Acesso em: 11 mar. 2026.

NASIRAHMADI, A.; HENSEL, O. Toward the next generation of digitalization in agriculture based on digital twin paradigm. **Sensors**, v. 22, n. 2, p. 498, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/s22020498>. Acesso em: 11 mar. 2026.

PELADARINOS, N. *et al.* Enhancing smart agriculture through the implementation of digital twins: A comprehensive review. **Sensors**, v. 23, n. 16, p. 7128, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/s23167128>. Acesso em: 22 mar. 2026.

PLAGERAS, A. P.; PSANNIS, K. E. Digital twins and multi-access edge computing for IIoT. **Virtual Reality & Intelligent Hardware**, v. 4, n. 6, p. 521–534, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.vrih.2022.07.005>. Acesso em: 13 mar. 2026.

PURCELL, W.; NEUBAUER, T. Digital twins in agriculture: A state-of-the-art review. **Smart Agricultural Technology**, v. 3, p. 100094, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100094>. Acesso em: 24 mar. 2026.

PURCELL, W.; NEUBAUER, T.; MALLINGER, K. Digital twins in agriculture: Challenges and opportunities for environmental sustainability. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, v. 61, p. 101252, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2022.101252>. Acesso em: 13 mar. 2026.

PYLIANIDIS, C.; OSINGA, S.; ATHANASIADIS, I. N. Introducing digital twins to agriculture. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 184, p. 105942, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105942>. Acesso em: 14 mar. 2026.

RAJAREDDY, G. N. V. *et al.* A digital twin enabled fog and edge assisted IoAT framework for disease identification and classification in *Oryza sativa*. **Ecological Informatics**, v. 86, p. 103063, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2025.103063>. Acesso em: 24 mar. 2026.

RODRIGUEZ ROMO, M. F. *et al.* Circular economy and digital technologies: A research agenda for smart circular systems. **Resources, Conservation and Recycling Advances**, v. 25, p. 200292, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rcradv.2025.200292>. Acesso em: 14 mar. 2026.

SEMIN, A. *et al.* Enhancing the theoretical and methodological framework for implementing Digital Twin technology in diverse agriculture sectors. **Emerging Science Journal**, v. 7, n. 4, p. 1129–1143, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.28991/ESJ-2023-07-04-05>. Acesso em: 04 abr. 2026.

SHOJI, K. *et al.* Mapping the postharvest life cycle of imported fruits from packhouse to retail stores using physics-based digital twins. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 176, p. 105914, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105914>. Acesso em: 15 mar. 2026.

SILVA, L. *et al.* The Digital Twin paradigm applied to soil quality assessment: A systematic literature review. **Sensors**, v. 23, n. 2, p. 1007, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/s23021007>. Acesso em: 15 mar. 2026.

SLOB, N. *et al.* Virtual reality-based digital twins for greenhouses: A focus on human interaction. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 208, p. 107815, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.107815>. Acesso em: 15 mar. 2026.

TAGARAKIS, A. C. *et al.* Digital twins in agriculture and forestry: A review. **Sensors**, v. 24, n. 10, p. 3117, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/s24103117>. Acesso em: 15 mar. 2026.

TAO, F. *et al.* Digital twin modeling. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 64, p. 372–389, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.06.015>. Acesso em: 15 mar. 2026.

TSAOUSIDIS, M. *et al.* AI-enabled digital twins in agriculture. **AI**, v. 7, n. 3, p. 108, 2026. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ai7030108>. Acesso em: 16 mar. 2026.

VERDOUW, C. *et al.* Digital twins in smart farming. **Agricultural Systems**, v. 189, p. 103046, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.103046>. Acesso em: 15 mar. 2026.

WANG, L. Digital twins in agriculture: A review of recent progress and open issues. **Electronics**, v. 13, n. 11, p. 2209, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/electronics13112209>. Acesso em: 26 mar. 2026.

ZHANG, J. *et al.* Neural radiance fields for unconstrained multi-scale 3D reconstruction and rendering in orchard scenes. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 217, p. 108629, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.108629>. Acesso em: 17 mar. 2026.

ZHANG, R. *et al.* A comprehensive review of Digital Twin technology in agriculture. **Agriculture**, v. 15, n. 9, p. 903, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agriculture15090903>. Acesso em: 17 mar. 2026.

Referência Complementar

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, ano 147, n. 147, p. 3–7, 3 ago. 2010. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Acesso em: 15 mar. 2026.