

ARTIGO ORIGINAL

Ambientes inteligentes na Agricultura Digital: uma revisão sistemática e taxonomia

Smart environments in Digital Agriculture: a systematic review and taxonomy

Flavio Rocha de Avila ^{1,2} and Jorge Luis Victória Barbosa ¹

¹Universidade do Vale do Rio dos Sinos, ²Instituto Senai de Inovação em Sistemas de Sensoriamento

*flavio.avila@senairs.org.br; jbarbosa@unisinos.br

Recebido: 26/08/2023. Revisado: 02/04/2024. Aceito: 25/04/2024.

Resumo

Este artigo apresenta uma revisão sistemática sobre ambientes inteligentes aplicados à agricultura digital, relacionando tecnologias habilitadoras para a viabilização da sua implementação nos mercados emergentes, especialmente nos países de terceiro mundo, que ainda carecem de informação dirigida para a sua implantação. A revisão buscou em bases acadêmicas, trabalhos científicos relatando estudos sobre Ambientes Inteligentes e Agricultura Digital. Foram consultados artigos publicados entre o ano de 2019 e abril de 2023 em 5 bases acadêmicas, ACM, IEEE, Scopus, Science Direct e Springer, resultando inicialmente em 631 artigos. Após a filtragem, levando em consideração o protocolo de seleção, restaram 51 trabalhos para condução do estudo. Os ambientes inteligentes têm o potencial de aumentar a produtividade, reduzir custos e garantir a sustentabilidade ambiental. A maioria dos artigos selecionados focam na utilização das tecnologias habilitadoras de Sensores e Internet das Coisas, Big Data e Análise de Dados, Inteligência Artificial e Aprendizado de Máquina e Conectividade e Redes de Comunicação. Além disso, ainda há desafios a serem superados para que os ambientes inteligentes possam ser adotados. Esses desafios incluem o custo das tecnologias, a falta de recursos humanos capacitados e a necessidade de ampliação de políticas governamentais que incentivem o uso de tecnologias agrícolas inovadoras.

Palavras-Chave: Agricultura digital; Ambientes inteligentes; Aprendizado de Máquina; Internet das Coisas

Abstract

This paper presents a systematic review of smart environments applied to digital agriculture, relating enabling technologies for the feasibility of its implementation in emerging markets, especially in third world countries, which still lack targeted information for its implementation. The review searched in academic databases, works reporting studies on Smart Environments and digital agriculture. Articles published between 2019 and April 2023 were consulted in 5 academic databases, ACM, IEEE, Scopus, Science Direct and Springer, resulting initially in 631 articles. After filtering, considering the selection protocol, 51 works remained for the study. Smart environments have the potential to increase productivity, reduce costs and ensure environmental sustainability. Most of the selected articles focus on the use of enabling technologies of Sensors and Internet of Things, Big Data and Data Analysis, Artificial Intelligence and Machine Learning and Connectivity and Communication Networks. In addition, there are still challenges to be overcome for smart environments to be adopted. These challenges include the cost of technologies, the lack of qualified human resources and the need for expansion of government policies that encourage the use of innovative agricultural technologies.

Keywords: Digital agriculture; Internet of things (IoT); Machine learning; Smart environments

1 Introdução

Os ambientes inteligentes são espaços que possibilitam maior interação entre o digital e o mundo real, por meio de diversos recursos tecnológicos. Na agricultura, esse tipo de metodologia traz uma série de benefícios, proporcionando uma importante contribuição para os agricultores e para os consumidores (Anand e Sharma, 2022), (Ramanathan et al., 2022). Constantemente novas ferramentas são desenvolvidas para facilitar a rotina e permitir que as atividades agrícolas sejam feitas com mais praticidade e rapidez. Para descrever a abrangência e as ramificações existentes na agricultura digital, este trabalho propõe uma taxonomia que define grupos temáticos e tecnológicos, criando uma classificação hierárquica, atribuindo subgrupos a cada uma das ramificações.

O presente artigo foca em estudos científicos relacionados a ambientes inteligentes na agricultura digital para a aplicação de tecnologias na criação da fazenda inteligente. Neste trabalho foram pesquisadas 5 bases de artigos científicos, ou seja, ACM, IEEE, Scopus, Science Direct, e Springer, tendo sido encontrados 631 artigos candidatos a seleção conforme protocolo pré-estabelecido para a estratificação dos trabalhos. Considerando-se a busca inicial, foram selecionados 51 artigos para o estudo, os quais atenderam aos requisitos de pertinência do protocolo.

Este trabalho está organizado em 6 seções. A Seção 1 apresenta a introdução ao estudo. Por sua vez, a Seção 2 contempla a análise de artigos relacionados. A Seção 3 apresenta o método utilizado para a seleção dos artigos desta revisão bibliográfica. Na Seção 4 são apresentados os resultados às perguntas de pesquisa. A Seção 5 apresenta uma discussão dos resultados através de estatísticas sobre as soluções encontradas e a proposição de uma taxonomia para classificação dos conceitos relacionados à agricultura digital. Por fim, a Seção 6 aborda a conclusão do artigo.

2 Trabalhos relacionados

Durante a busca de artigos, foram encontrados trabalhos de revisão bibliográfica com conteúdo semelhante à área da proposta nesse estudo. Cinco artigos foram selecionados que continham no título a expressão *Smart (Farming ou*

Agriculture) (Akshatha e Poornima, 2022), (de Araujo Zanelle et al., 2020), (Mathi et al., 2023), (O'Grady et al., 2020), (Qazi et al., 2022). Esses estudos deram ênfase à agricultura digital, ambientes inteligentes e IoT. A Tabela 1 apresenta os temas identificados na taxonomia deste estudo, que incluem os sistemas: Ciclo de vida, Administração, Tecnologia habilitadora e Automação. A tabela mostra ainda o número de trabalhos revisados.

A revisão apresentada neste artigo se diferencia das demais pela abordagem focada na aplicação de ambientes inteligentes na agricultura digital, especialmente em mercados emergentes e países em desenvolvimento. Ao explorar as tecnologias habilitadoras que viabilizam essa implementação, o estudo não somente identifica tendências e avanços recentes, mas também enfatiza os desafios de segurança, custos e disponibilidade de recursos humanos enfrentados por essa realidade. Adicionalmente, ao examinar as soluções de IoT, Análise de Dados, IA e outras, a revisão oferece uma análise crítica das interações entre essas tecnologias, destacando como elas podem colaborar para promover uma agricultura mais eficiente, sustentável e produtiva. Além disso, o artigo diferencia-se pela abordagem que abrange todo o ciclo de vida do cultivo agrícola.

3 Método de pesquisa

Este trabalho utiliza o método de Revisão Sistemática da Literatura (RSL), descrito por Fabbri et al. (2016), Keshav (2007) e Kitchenham (2004), que definem a estrutura para a execução de cada etapa de revisão, podendo ser aplicado em diferentes áreas do conhecimento, dentre elas em ambientes inteligentes na agricultura digital para a busca de tecnologias que suportem a criação da fazenda inteligente.

3.1 Questões de pesquisa

Este trabalho busca respostas para os questionamentos descritos na Tabela 2. A partir das respostas obtidas, pode-se identificar o nível de abrangência do problema pesquisado, bem como possíveis soluções propostas por pesquisadores para o problema em questão.

Tabela 1: Comparação entre trabalhos relacionados

Autor	Ciclo de vida	Administração	Tecnologia habilitadora	Automação	Nº estudos
(Akshatha e Poornima, 2022)	Produção.	Gestão de culturas, Gestão da água, Gestão do solo.	Sensores e IoT, Big Data e Análise de Dados, Conectividade e Redes de Comunicação.	Monitoramento remoto.	42
(de Araujo Zanelle et al., 2020)	Produção.	Gestão de culturas.	Sensores e IoT, Big Data e Análise de Dados, Conectividade e Redes de Comunicação.	Monitoramento remoto, Agricultura de Precisão.	70
(Mathi et al., 2023)	Produção.	Gestão de culturas, Gestão da água, Gestão do solo.	Sensores e IoT, Big Data e Análise de Dados, Conectividade e Redes de Comunicação, Inteligência Artificial e Aprendizado de Máquina.	Monitoramento remoto.	30
(O'Grady et al., 2020)	Produção, Pós-produção.	Gestão de culturas, Gestão da água, Gestão do solo.	Sensores e IoT, Big Data e Análise de Dados, Conectividade e Redes de Comunicação, Inteligência Artificial e Aprendizado de Máquina, Blockchain.	Robótica Agrícola, Monitoramento remoto, Agricultura de Precisão.	76
(Qazi et al., 2022)	Produção.	Gestão de culturas, Gestão da água, Gestão do solo.	Sensores e IoT, Big Data e Análise de Dados, Conectividade e Redes de Comunicação, Sistema de Informação Geográfica (SIG), Inteligência Artificial e Aprendizado de Máquina.	Robótica Agrícola, Sistemas de Irrigação Inteligente, Monitoramento remoto, Agricultura de Precisão.	114

Tabela 2: Questões de pesquisa

Questão principal
QP1 O que os trabalhos científicos abordam sobre ambientes inteligentes na agricultura digital?
Questões complementares
QC1 Como é descrito o sistema de produção e os processos envolvidos no ciclo de vida da agricultura?
QC2 Quais tecnologias vêm sendo usadas em ambientes inteligentes na agricultura digital?
QC3 Quais estratégias de predição vêm sendo usadas nos ambientes inteligentes na agricultura digital?
Questões estatísticas
QE1 Qual é o número de publicações por fonte de pesquisa?
QE2 Quantas publicações ocorreram por ano?

A utilização de termos de busca abrangentes e sinônimos permite que a revisão sistemática da literatura capture o maior número possível de estudos. Isso significa que a revisão inclui estudos de diferentes disciplinas e de diferentes partes do mundo, sendo assim mais inclusiva e atual. O termo “*agriculture*” é utilizado para referir-se à produção de alimentos e outros processos agrícolas. O termo “*ambient intelligence*” refere-se ao uso de tecnologias para criar ambientes que são sensíveis ao contexto e que podem adaptar-se às necessidades dos usuários. O termo “*Internet of Things*” é um conceito tecnológico que se refere a uma rede interconectada de dispositivos físicos, objetos e sistemas incorporados com sensores, software e tecnologias de comunicação que permitem a coleta e troca de dados através da Internet.

3.2 Processo de pesquisa

O processo de busca define um protocolo de estudo com 3 passos para identificação de trabalhos para a pesquisa: especificar as palavras de busca, selecionar as bases de artigos e buscar os resultados. O primeiro passo identifica os principais termos e seus respectivos sinônimos no contexto da pesquisa. A [Tabela 3](#) mostra como os termos e os sinônimos foram integrados por operadores lógicos para formação da *string* de busca. O segundo passo define as bases de busca, tendo sido selecionadas 5 bases: [ACM](#), [IEEE](#), [Scopus](#), [Science Direct](#), e [Springer](#).

Tabela 3: Definição da *string* de busca

Termos principais	Termos de busca
<i>Agriculture</i>	<i>Agriculture OR Farming OR Cultivation OR "Crop production" OR "Agricultural practices" OR Agribusiness OR "Planting and harvesting" OR "Farm management" AND</i>
<i>Ambient Intelligence</i>	<i>"Ambient Intelligence" OR AmI OR "Ubiquitous Computing" OR "Pervasive Computing" OR "Intelligent Environments" OR "Smart Environments" OR "Context-aware Computing" AND</i>
<i>Internet of Things</i>	<i>"Internet of Things" OR IoT OR "Connected devices" OR "Smart devices" OR "Embedded intelligence" OR "Sensor network" OR "Ubiquitous computing" OR "Cyber-physical systems"</i>

3.3 Filtragem do estudo

A busca inicial retornou um total de 631 artigos relacionados a *string* de busca, nos últimos 5 anos, ou seja, no período entre janeiro/2019 e abril/2023. Ao final da filtragem obteve-se um total de 51 trabalhos que atendiam aos critérios da pesquisa.

A [Figura 1](#) apresenta o fluxo completo do processo de seleção dos artigos. Inicialmente a *string* foi inserida no motor de busca para cada base de pesquisa, retornando 631 trabalhos que satisfizeram as condições lógicas (OR e AND) estabelecida na [Tabela 3](#) e os critérios de exclusão (E1, E2) e de inclusão (I1) estabelecidos na [Tabela 4](#).

Tabela 4: Critérios de inclusão e exclusão

Critério	Descrição dos critérios de inclusão e exclusão
I ₁	Serão incluídos trabalhos publicados em anais de conferências ou periódicos.
I ₂	Adição por heurística
E ₁	Serão excluídos trabalhos anteriores ao ano de 2019
E ₂	Serão excluídos trabalhos que não estiverem na língua inglesa.
E ₃	Serão excluídos trabalhos que tenham pontuação < 10 na pré-classificação da ferramenta StArt.
E ₄	Serão excluídos os trabalhos cujo resumo não esteja focado no contexto desse estudo.
E ₅	Serão excluídos os estudos baseado no método três-passos.

Os artigos selecionados pelas bases foram carregados na ferramenta StArt ¹ que realiza uma pré-classificação automatizada para pontuação do critério de exclusão (E3). Para a pontuação automatizada da ferramenta StArt definiu-se três critérios, ajustados da seguinte forma: (1) Número de termos de busca no título: 10 pontos por ocorrência de *string*; (2) Número de termos de busca no resumo: 5 pontos por ocorrência de *string*; (3) Número de termos de busca nas palavras-chave: 2 pontos por ocorrência. Esta forma prévia de classificação facilitou a ordenação de prioridade para a leitura dos estudos. Os artigos com pontuações baixas neste critério (pontuação StArt < 10) foram descartados do estudo, restando 281 trabalhos.

Posteriormente realizou-se uma leitura dos resumos dos artigos para verificar a aderência ao critério de exclusão (E4) proposto nesta revisão, restando 126 trabalhos. Antes da combinação dos artigos foi feita a remoção dos trabalhos duplicados, onde foram selecionados 113 artigos. Após a combinação, realizou-se os processos descritos no método três-passos ([Kitchenham, 2004](#)), critério de exclusão (E5), restando desta forma 51 trabalhos. No último processo de filtragem, utilizando-se os 51 artigos selecionados, foram analisadas as referências bibliográficas, onde não foram encontradas outras fontes que pudessem ser acrescentadas ao estudo, critério de inclusão (I2). Após

¹O StArt é uma ferramenta desenvolvida pelo Laboratório de Pesquisa em Engenharia de Software (LaPES) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) para suporte ao processo de Revisão Sistemática da Literatura.

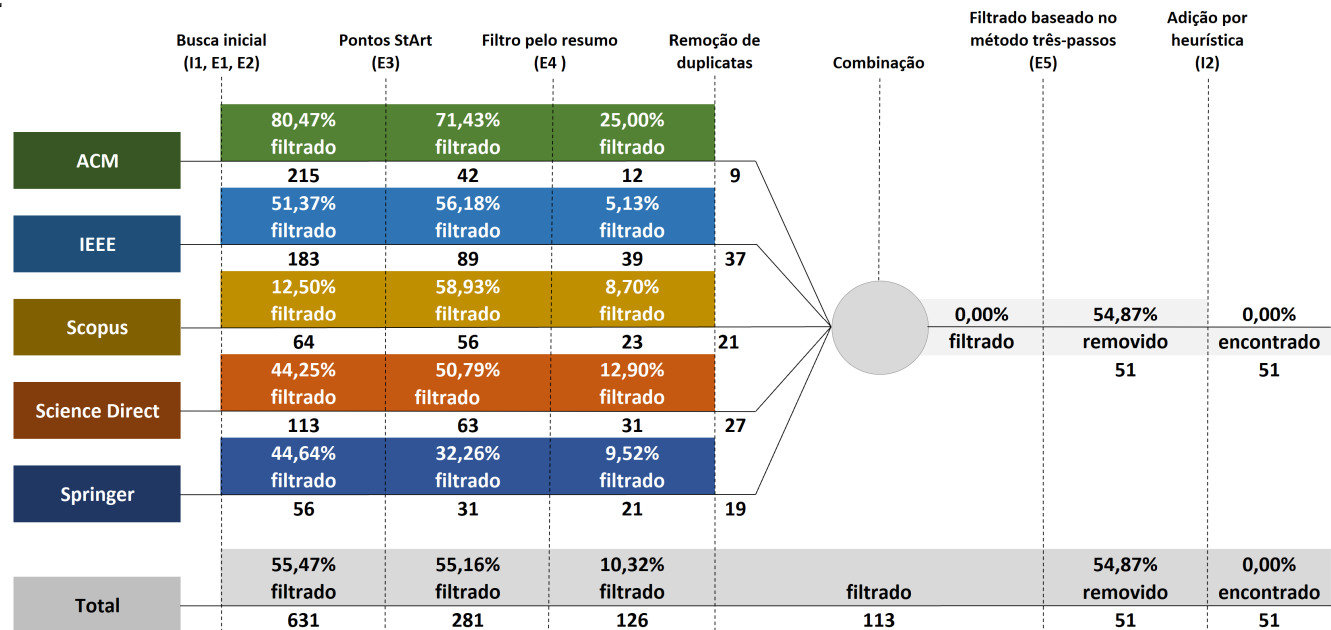


Figura 1: Processo de filtragem da pesquisa

a leitura completa dos artigos foram realizadas anotações e a construção de resumos dos conteúdos de interesse.

4 Resultados

A Tabela 6 apresenta a relação dos artigos selecionados, contendo um ID para as referências, a base de consulta, o ano da publicação, o título do trabalho e seis tecnologias habilitadoras encontradas no decorrer do estudo, distribuídas em seis colunas.

4.1 QP1- O que os trabalhos abordam sobre ambientes inteligentes na agricultura?

Os trabalhos selecionados apresentaram a aplicação de ambientes inteligentes na agricultura, buscando utilizar dados e tecnologias para tomar decisões e otimizar o manejo agrícola. A Figura 2 apresenta o mapeamento dos artigos, onde na primeira coluna são apresentados os sistemas, descritos na Seção 5 (Discussão e Taxonomia). Na segunda coluna estão listados os subsistemas (áreas) associados aos sistemas. Na terceira, encontra-se o número de artigos que abordam especificamente essas áreas. A quarta coluna contém o percentual de trabalhos que abordam essas áreas em relação aos 51 artigos selecionados, onde aplicou-se cores (mapa de calor) sobre as células para a visualização intuitiva dos resultados mais relevantes (vermelho) e, por fim, na quinta coluna os identificadores dos artigos relacionados na Tabela 6.

4.1.1 Correlação entre o sistema de Tecnologias habilitadoras e Administração

Essa subseção apresenta as principais correlações com o subsistema de Administração. As correlações dos subsis-

temas de Ciclo de vida e Automação com Tecnologias habilitadoras serão exploradas nas seções seguintes, pois encaixam-se nas respostas das demais perguntas.

A Figura 3 mostra um mapa de calor onde estão anotadas as correlações entre o sistema de Administração (linhas) e as Tecnologias habilitadoras (colunas) e a quantidade de artigos em cada subsistema.

No subsistema de Gestão de culturas, 44 estudos (86,27%) descrevem como o subsistema Sensores e IoT são implantados nas áreas de cultivo para coletar dados em tempo real sobre as condições do solo, clima e culturas. Os autores descrevem ainda, como sensores podem ser usados para automatizar tarefas agrícolas, como a irrigação, a fertilização e a pulverização de pesticidas. Na correlação com o subsistema Big Data e Análise de Dados, 43 artigos (84,31%) descrevem como a tomada de decisões baseada na coleta massiva de dados agrícolas é empregada para extrair informações, padrões e tendências. Na correlação com o subsistema Inteligência Artificial e Aprendizado de Máquina, 36 estudos (70,59%) apresentam a IA e o Aprendizado de Máquina para automatizar tarefas agrícolas e tomar decisões inteligentes, aplicadas para identificar problemas potenciais nas culturas, como doenças e pragas. Segundo 44 estudos (86,27%) a Conectividade e as Redes de Comunicação são essenciais para a integração das tecnologias habilitadoras para a gestão de culturas, pois a conectividade é necessária para compartilhar os dados e os modelos de IA com os agricultores.

No subsistema de Gestão da Água, 24 artigos (47,06%) descrevem como Sensores e IoT permitem monitorar com precisão as condições hídricas e possibilitam a transmissão contínua desses dados para sistemas de gerenciamento centralizados. No subsistema de Big Data e Análise de Dados, 23 artigos (45,1%) apresentam como a análise de grandes conjuntos de dados permite identificar padrões de consumo de água, otimizar os cronogramas de irriga-

Sistemas	Subsistemas (áreas)	N° artigos	% área	ID da referência
Ciclo de vida	Pré-produção	8	15,69%	[13] [15] [24] [30] [39] [40] [44] [49]
	Produção	47	92,16%	[1] [2] [4] [5] [6] [7] [8] [10] [11] [12] [13] [14] [15] [16] [17] [18] [19] [20] [22] [23] [24] [25] [26] [27] [28] [30] [31] [32] [33] [34] [35] [36] [37] [38] [39] [40] [41] [42] [43] [44] [45] [46] [47] [48] [49] [50] [51]
	Pós-produção	12	23,53%	[3] [9] [15] [21] [24] [29] [30] [31] [33] [39] [40] [42]
Administração	Gestão de estoque	5	9,80%	[9] [21] [24] [29] [40]
	Gestão de culturas	46	90,20%	[1] [2] [4] [5] [6] [7] [8] [9] [10] [11] [12] [13] [14] [15] [16] [17] [18] [19] [20] [22] [23] [24] [25] [26] [27] [28] [30] [31] [32] [33] [34] [35] [36] [37] [38] [39] [40] [41] [42] [43] [44] [45] [46] [47] [48] [49] [50] [51]
	Gestão de resíduos	2	3,92%	[12] [24]
	Gestão de rastreabilidade	10	19,61%	[3] [9] [15] [21] [24] [29] [30] [33] [39] [40]
	Gestão da Água	25	49,02%	[1] [2] [4] [5] [7] [8] [12] [13] [14] [17] [18] [19] [24] [27] [33] [37] [38] [39] [40] [43] [44] [45] [46] [48] [51]
	Gestão do Solo	29	56,86%	[1] [2] [4] [5] [8] [12] [13] [14] [16] [17] [18] [19] [24] [26] [27] [31] [32] [33] [34] [35] [37] [38] [39] [40] [41] [44] [48] [49] [51]
Tecnologia habilitadora	Sensores e IoT	49	96,08%	[1] [2] [3] [4] [5] [6] [7] [9] [10] [11] [12] [13] [14] [15] [16] [17] [18] [19] [20] [21] [22] [23] [24] [25] [26] [27] [28] [29] [30] [31] [32] [33] [34] [35] [36] [37] [38] [39] [40] [41] [42] [43] [44] [45] [46] [47] [48] [50] [51]
	Big Data e Análise de Dados	48	94,12%	[1] [2] [3] [4] [5] [6] [9] [10] [11] [12] [13] [14] [15] [16] [17] [18] [19] [20] [21] [22] [23] [24] [26] [27] [28] [29] [30] [31] [32] [33] [34] [35] [36] [37] [38] [39] [40] [41] [42] [43] [44] [45] [46] [47] [48] [49] [50] [51]
	Inteligência Artificial e Aprendizado de Máquina	37	72,55%	[1] [4] [10] [11] [12] [13] [14] [15] [16] [17] [18] [19] [20] [21] [22] [23] [24] [27] [28] [31] [32] [33] [34] [35] [36] [37] [38] [39] [40] [41] [42] [45] [46] [47] [49] [51]
	Sistema de Informação Geográfica (SIG)	11	21,57%	[1] [13] [16] [17] [22] [23] [24] [31] [32] [37] [47]
	Blockchain	9	17,65%	[3] [4] [9] [15] [24] [29] [30] [33] [40]
	Conectividade e Redes de Comunicação	47	92,16%	[1] [2] [3] [4] [5] [6] [7] [9] [10] [11] [12] [13] [14] [15] [16] [17] [18] [19] [20] [21] [22] [23] [24] [25] [26] [27] [28] [29] [30] [31] [32] [33] [34] [35] [36] [37] [38] [39] [40] [41] [42] [45] [46] [47] [48] [50] [51]
Automação	Robótica Agrícola	13	25,49%	[1] [5] [7] [17] [21] [22] [24] [33] [37] [38] [41] [42] [47]
	Sistemas de Irrigação Inteligente	14	27,45%	[1] [5] [7] [12] [18] [21] [37] [42] [43] [44] [45] [46] [48] [51]
	Monitoramento remoto	42	82,35%	[1] [4] [5] [6] [7] [10] [11] [12] [13] [14] [15] [16] [17] [18] [19] [21] [22] [24] [25] [26] [28] [29] [30] [31] [32] [33] [34] [35] [37] [38] [39] [41] [42] [43] [44] [45] [46] [47] [48] [49] [50] [51]
	Agricultura Vertical e Indoor	4	7,84%	[1] [7] [21] [42]
	Agricultura de Precisão	29	56,86%	[1] [4] [5] [6] [13] [14] [15] [16] [17] [18] [19] [22] [24] [26] [32] [33] [34] [35] [37] [38] [41] [42] [43] [44] [47] [48] [49] [50] [51]

Figura 2: Sistemas da agricultura Inteligente

ção e antecipar demandas sazonais. Existem 18 artigos (35,29%) que mostram como o subsistema Inteligência Artificial e Aprendizado de Máquina podem prever necessidades de irrigação com base em variáveis complexas, como histórico climático, tipo de cultura e padrões de consumo hídrico, aprendendo com os dados ao longo do tempo. Para o subsistema de Conectividade e Redes de Comunicação, 22 artigos (43,14%) descrevem a importância da comunicação em tempo real entre os sensores, dispositivos de irrigação, sistemas de análise de dados e soluções de IA.

No subsistema de Gestão do Solo, 27 artigos (52,94%) reportam como o subsistema de Sensores e IoT é essencial para a coleta de dados em tempo real sobre as condições do solo, como umidade, pH, temperatura e nutrientes. No subsistema de Big Data e Análise de Dados, 28 artigos (54,9%) descrevem como os dados coletados pelos sensores são processados e analisados em larga escala. A análise de dados em profundidade pode identificar tendências sazonais, padrões de nutrientes e variações nas condições do solo ao longo do tempo. Existem 23 artigos (45,1%) que relatam o subsistema Inteligência Artificial e Aprendizado de Máquina usados para automatizar tarefas relacionadas ao solo, como amostragem de solo, diagnóstico de doenças e recomendação de práticas agrícolas. No subsistema de Conectividade e Redes de Comunicação, os 26 artigos (50,98%) apresentam a importância desse subsistema que viabiliza a coleta e a transmissão eficiente de dados entre

sensores e dispositivos.

4.2 QC1 - Como é descrito o sistema de produção e os processos envolvidos no ciclo de vida da agricultura?

O Ciclo de vida da agricultura abrange o período que se estende desde a preparação do solo até a colheita e a comercialização dos produtos agrícolas. Este sistema é composto por três subsistemas: Pré-produção, Produção e Pós-produção. O subsistema Produção desempenha um papel central na agricultura, o que faz as investigações dos estudos concentrarem-se principalmente nesta fase. Esta fase apresenta uma correlação significativa com os sistemas de Administração, Tecnologias Habilitadoras e Automação. O mapa de calor representado na Figura 4 apresenta a quantidade de artigos e o percentual correspondente em cada uma das fases do ciclo de vida (linhas), correlacionados com os diferentes subsistemas (colunas).

No sistema de Administração, subsistema de Gestão de culturas, em 45 estudos (88,24%) os autores relatam que uma gestão eficaz das culturas envolve o conhecimento detalhado das necessidades específicas de cada tipo de planta em relação a nutrientes, água, luz solar e outros fatores. No subsistema de Gestão da Água, 25 artigos (49,02%) afirmam que a água é um recurso crítico na agricultura, e

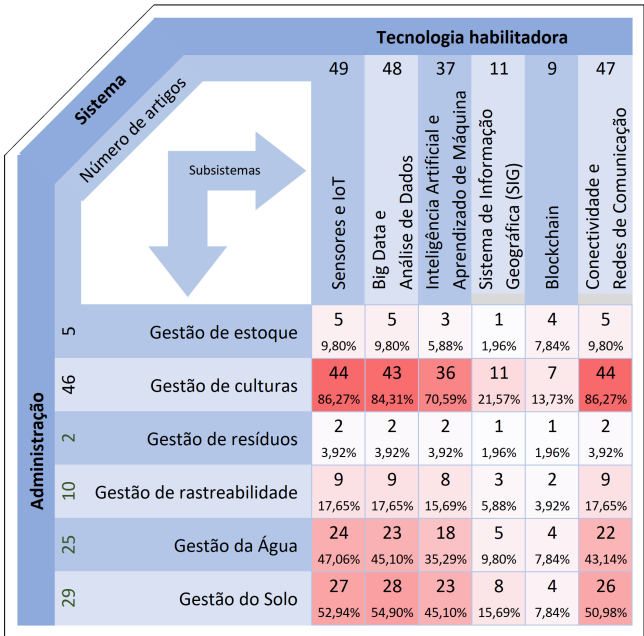


Figura 3: Correlação entre Administração e Tecnologias habilitadoras em Ambientes Inteligentes

sua gestão cuidadosa é essencial para evitar desperdícios e assegurar a irrigação precisa das plantas. No subsistema de Gestão do Solo, em 29 artigos (56,86%) os autores relatam que a correlação com a fase Produção é essencial para otimizar a qualidade do solo e criar um ambiente propício ao crescimento saudável das culturas. A saúde do solo impacta diretamente na absorção de nutrientes pelas plantas, sua estrutura física e sua capacidade de retenção de água. Considerando o sistema de Tecnologias habilitadoras no subsistema de Sensores e IoT, 45 artigos (88,24%) demonstram como a correlação com o subsistema de Sensores e IoT são estratégicos para obter informações em tempo real sobre as condições do campo agrícola. No subsistema Big Data e Análise de Dados, 44 artigos (86,27%) amplificam essa correlação, pois os dados coletados pelos sensores são processados em larga escala para identificar padrões e tendências significativas. No subsistema de Inteligência Artificial e Aprendizado de Máquina, 36 artigos (70,59%) descrevem como a correlação com esse subsistema introduz a capacidade de predição e otimização nas práticas de produção.

No subsistema Conectividade e Redes de Comunicação, 43 artigos (84,31%) destacam como esse subsistema desempenha um papel relevante ao facilitar a troca contínua de dados entre dispositivos, sistemas de análise de dados e soluções de IA. No sistema de Automação, considerando o subsistema de Monitoramento Remoto, 40 artigos (78,43%) demonstram como a relação com o subsistema de Produção é essencial para permitir a supervisão contínua das atividades agrícolas a distância para os agricultores acompanharem as condições do campo, o crescimento das culturas e outras variáveis críticas sem a necessidade de presença física constante. No subsistema de Agricultura de Precisão, 29 artigos (56,86%) descrevem que esse subsistema é fundamental para otimizar as práticas agrícolas

de maneira mais granular e personalizada.

4.3 QC2 - Quais tecnologias vêm sendo usadas em ambientes inteligentes na agricultura digital?

Sensores conectados entre si e com a Internet garantem um volume de dados significativo para o apoio ao monitoramento da informação na Agricultura Digital. A Figura 5 contabiliza a quantidade de artigos que citam essas tecnologias. Esta seção faz um resumo de cada um dos subsistemas usados em ambientes inteligentes na agricultura e inclui alguns dos 51 trabalhos que ressaltam essas aplicações.

Os estudos mostram que 49 artigos (96,07%) envolvem aplicações utilizando Sensores e IoT. K"oksal e Tekinerdogan (2019) contribuíram com um sistema de informação de gerenciamento de fazendas (*Farm Management Information Systems - FMIS*), aprimorando as abordagens atuais de design de arquitetura para FMIS baseado em IoT. O estudo de Ma et al. (2022) mostrou como a aplicação da Internet das Coisas (IoT) na agricultura inteligente pode aumentar efetivamente a produção de alimentos com custos de mão de obra relativamente baixos. Mahajan et al. (2021) apresentaram um protocolo eficiente e escalável para monitoramento remoto e tomada de decisões em fazendas inteligentes, chamado de protocolo CL-IoT que reduz o atraso de comunicação, a latência e o consumo de energia na rede de sensores. Mohapatra e Rath (2022) apresentaram um modelo agrícola inteligente baseado em IoE (*Internet of Everything*). Shukla et al. (2022) apresentaram um sistema de irrigação autônomo que utiliza sensores para analisar a umidade do solo e irrigar as plantas de acordo com as necessidades, otimizando o uso de água e reduzindo a intervenção humana. Singh e Singh (2023a) e Singh e Singh (2023b) apresentaram um modelo baseado em névoa com suporte adicional da IoT, que fornece uma infraestrutura de agricultura inteligente amplamente acessível.

Em Big Data e Análise de Dados, 48 artigos (94,11%) descreveram aplicações relacionadas a essa área. Maffezzoli et al. (2022) discutiram as aplicações de IoT e análise de dados na gestão da agricultura para facilitar a análise e suporte à tomada de decisão do produtor rural, de forma preditiva. Moorthy et al. (2023) apresentaram ideias-chave para a otimização de redes de sensores sem fio (WSN) na agricultura de precisão e os resultados da simulação, utilizando um detector de aprendizado profundo baseado em Big Data obtidos de nano-sensores. Penka et al. (2021) propuseram uma arquitetura Kappa refinada com base em um caso de uso concreto na classificação de comportamentos na agricultura, estudando o impacto de cada parâmetro no desempenho geral da arquitetura.

Inteligência Artificial e Aprendizado de máquina são explorados em 37 artigos (72,54%). Gupta e Nahar (2023) apresentaram um modelo híbrido de ML com IoT para previsão de rendimento, utilizando algoritmo Adaptive Kernel Nearest Centroid Neighbor (aKNCN) para estimar a qualidade do solo e classificar as amostras em diferentes classes com base nas suas propriedades e o algoritmo Extreme Learning Machine (ELM) para a predição da produtividade das colheitas. Mehta et al. (2023) abordou vários tópicos

		Administração						Tecnologia habilitadora						Automação				
		Gestão de estoque	Gestão de culturas	Gestão de resíduos	Gestão de rastreabilidade	Gestão da Água	Gestão do Solo	Sensores e IoT	Big Data e Análise de Dados	Inteligência Artificial e Aprendizado de Máquina	Sistema de Informação Geográfica (SIG)	Blockchain	Conectividade e Redes de Comunicação	Robótica Agrícola	Sistemas de Irrigação Inteligente	Monitoramento remoto	Agricultura Vertical e Indoor	Agricultura de Precisão
		5	46	2	10	25	29	49	48	37	11	9	47	13	14	42	4	29
Pré-produção	8	2	7	1	5	5	6	7	8	6	2	4	6	1	1	7	0	5
		3,92%	13,73%	1,96%	9,80%	9,80%	11,76%	13,73%	15,69%	11,76%	3,92%	7,84%	11,76%	1,96%	1,96%	13,73%	0,00%	9,80%
Produção	47	2	45	2	6	25	29	45	44	36	11	6	43	12	13	40	3	29
		3,92%	88,24%	3,92%	11,76%	49,02%	56,86%	88,24%	86,27%	70,59%	21,57%	11,76%	84,31%	23,53%	25,49%	78,43%	5,88%	56,86%
Pós-produção	12	5	9	1	10	4	5	12	12	8	2	8	12	4	2	9	2	4
		9,80%	17,65%	1,96%	19,61%	7,84%	9,80%	23,53%	23,53%	15,69%	3,92%	15,69%	23,53%	7,84%	3,92%	17,65%	3,92%	7,84%

Figura 4: Sistema de produção e os processos envolvidos

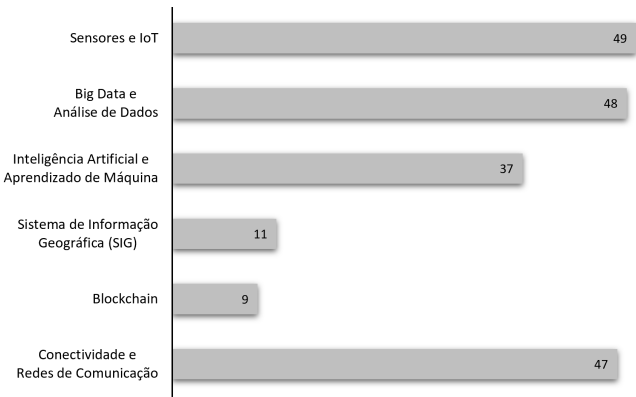


Figura 5: Tecnologias habilitadoras

relacionados a tecnologias baseadas em IoT, bem como os diferentes tipos de dispositivos e sensores que podem ser utilizados para detectar gafanhotos e prevenir a destruição das lavouras.

Sistema de Informação Geográfica (SIG) são tratados em 11 artigos (21,56%). [Stumph et al. \(2019\)](#) apresentaram um sistema georreferenciado para detectar insetos utilizando um veículo aéreo não tripulado. [Jawhar et al. \(2022\)](#) discutiram sobre os sistemas de robôs múltiplos (MRS) georreferenciados. A tecnologia Blockchain foi usada em 9 artigos (17,64%). [Mezquita et al. \(2020\)](#) propuseram um sistema que emprega contratos inteligentes e tecnologia blockchain para eliminar intermediários e otimizar as atividades logísticas. [Mishra et al. \(2022\)](#) propuseram um sistema de rastreamento de alimentos que promove a participação de todos os envolvidos na agricultura inteligente, mesmo sem confiança mútua.

Conectividade e Redes de Comunicação foram abordados por 47 artigos (92,15%). [Fuentealba et al. \(2022\)](#) propuseram um modelo de meta classes para projetos de gêmeos digitais na agricultura, preenchendo a lacuna conceitual entre o conceito e sua aplicação real. [Hassoun et al. \(2023\)](#) apresentaram um estudo para a rastreabilidade da cadeia produtiva que envolve a aplicação das tecnologias da Indústria 4.0 para garantir a autenticidade, segurança e qualidade dos alimentos.

4.4 QC3 Quais estratégias de predição vêm sendo usadas nos ambientes inteligentes na agricultura digital?

A [Tabela 5](#) apresenta as principais estratégias de predição usadas nos ambientes inteligentes na agricultura digital, indicando os autores, estratégias utilizadas e aplicações. [Gupta e Nahar \(2023\)](#) propuseram um sistema de agricultura inteligente baseado em IoT usando um modelo de ML de dois níveis para uma melhor previsão do rendimento das culturas. [Helfer et al. \(2020\)](#) apresentaram um modelo arquitetural que avalia a fertilidade do solo e a produtividade por meio dos históricos de contextos e do método Partial Least Squares Regression (PLS). [Lee et al. \(2019\)](#) apresentaram a aplicação de um sistema que utiliza *Automated Guided Vehicle* (AGV) para transportar produtos no Centro de Processamento de Produtos Agrícolas de Chungju na Coreia do Sul. [Liu et al. \(2019\)](#) apresentaram um sistema de predição baseado em vídeo para o controle da altura da plataforma de uma colheitadeira de grãos. [Pe-erlinck, Sheppard, Pastorino e Maxwell \(2019\)](#) e [Peerlinck, Sheppard e Senecal \(2019\)](#) utilizaram um algoritmo de aprendizado de máquina supervisionado que combina vários classificadores fracos para criar um classificador forte designado como *Adaptive Boosting*, ou AdaBoost para prever o rendimento e o teor de proteína das culturas. [Saleem et al. \(2021\)](#) apresentaram o desempenho dos usos de algoritmos e arquiteturas de ML e DL em robôs agrícolas. [Tripathy et al. \(2022\)](#) propuseram um modelo de recomendação e um algoritmo para avaliar a produtividade das culturas do ano seguinte. [Vij et al. \(2020\)](#) desenvolveram um sistema de monitoramento, cujo principal objetivo foi resolver o problema da irrigação excessiva, da erosão do solo e da irrigação específica de culturas.

4.5 QE1 - Qual é o número de publicações por fonte de pesquisa?

A [Figura 6](#) apresenta o número de publicações selecionadas para cada uma das fontes de pesquisa consultadas. Da base [Scopus](#), ao final da filtragem do estudo, não restaram artigos classificados. Destacam-se as bases [IEEE](#) e [Science Direct](#), que juntas representam 80,39% dos artigos encontrados.

Tabela 5: Estratégias de predição

Autor	Estratégia	Aplicação
(Gupta e Nahar, 2023)	Adaptive k-Nearest Centroid Neighbour Classifier (aKNCN), Extreme Learning Machine (ELM) e modified Butterfly Optimization Algorithm (mBOA)	Classificação de solo e Rendimento de culturas
(Helfer et al., 2020)	Partial Least Squares Regression (PLS)	Fertilidade do solo e Produtividade
(Lee et al., 2019)	Monte Carlo Localization (MCL), Extended Kalman Filter (EKF) e Particle Filter (PF)	Navegação autônoma
(Liu et al., 2019)	Local Binary Pattern (LBP) e Gray Level Co-occurrence Matrix (GLCM)	Controle de colheita de ar
(Peerlinck, Sheppard, Pastorino e Maxwell, 2019)	Adaptive Boosting (AdaBoost-R2 e AdaBoost RΔ) e Feedforward Neural Networks (FFNNs)	Rendimento e teor de proteína das culturas
(Saleem et al., 2021)	Multilayer Perceptron (MP), K-nearest neighbors (KNN), Region-based Convolutional Neural Network (RCNN), Fully Convolutional Network (FCN), Support Vector Machine (SVM) e Random Forest (RF)	Deteção e classificação de doenças de plantas
(Tripathy et al., 2022)	Backpropagation (BP) e Random Forest (RF)	Classificação do solo e Produtividade
(Vij et al., 2020)	Support Vector Machine (SVM), Support Vector Regression (SVR) e Random Forest (RF)	Irrigação

Tabela 6: Relação de artigos selecionados

ID	Base	Ano	Título	Sensores e IoT	Big Data e Análise de Dados	Inteligência Artificial e Aprendizado de Máquina	Sistema de Informação Geográfica (SIG)	Blockchain	Conectividade e Redes de Comunicação
[1] Abbassi e Benlahmer (2021)	Science Direct	2021	The Internet of Things at the service of tomorrow's agriculture	x	x	x	x		x
[2] Akshatha e Poornima (2022)	IEEE	2022	IoT Enabled Smart Farming: A Review	x	x				x
[3] Anand e Saxena (2022)	IEEE	2022	A Model for Secure Food through smart technologies - IOT	x	x			x	x
[4] Anand e Sharma (2022)	Science Direct	2022	Comprehensive analysis of services towards enhancing security in IoT-based agriculture	x	x	x		x	x
[5] Boursianis et al. (2022)	Science Direct	2022	Internet of Things (IoT) and Agricultural Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in smart farming: A comprehensive review	x	x				x
[6] de Araujo Zanella et al. (2020)	Science Direct	2020	Security challenges to smart agriculture: Current state, key issues, and future directions	x	x				x
[7] de Freitas Bezerra et al. (2022)	Science Direct	2022	Discrete controller synthesis applied to smart greenhouse	x					x
[8] Debauche et al. (2020)	Science Direct	2020	Edge AI-IoT Pivot Irrigation, Plant Diseases, and Pests Identification	x	x	x			x
[9] Dyck et al. (2023)	Science Direct	2022	Digital Twins: A novel traceability concept for post-harvest handling	x	x			x	x
[10] El-Din et al. (2021)	Springer	2020	Smart Environments Concepts, Applications, and Challenges	x	x	x			x

ID	Base	Ano	Título						
[11] Fuentetalba et al. (2022)	IEEE	2022	Guidelines for Digital Twins in 5G Agriculture	x	x	x			x
[12] Glushkova et al. (2020)	IEEE	2020	Ambient-Oriented Modelling in an Intelligent Agriculture Infrastructure	x	x	x			x
[13] Gulzar et al. (2020)	IEEE	2020	Climate Smart Agriculture: A Survey and Taxonomy	x	x	x	x		x
[14] Gupta e Nahar (2023)	Springer	2021	Classification and yield prediction in smart agriculture system using IoT	x	x	x			x
[15] Hassoun et al. (2023)	Science Direct	2023	Implementation of relevant fourth industrial revolution innovations across the supply chain of fruits and vegetables: A short update on Traceability 4.0	x	x	x		x	x
[16] Helfer et al. (2020)	Science Direct	2020	A computational model for soil fertility prediction in ubiquitous agriculture	x	x	x	x		x
[17] Jawhar et al. (2022)	IEEE	2022	Networking Architectures and Protocols for Multi-Robot Systems in Agriculture 4.0	x	x	x	x		x
[18] Kaur et al. (2022)	IEEE	2022	Review of IoT Technologies used in Agriculture	x	x	x			x
[19] Khan e Kumar (2020)	Springer	2020	Ambient crop field monitoring for improving context based agricultural by mobile sink in WSN	x	x	x			x
[20] K"oksal e Tekinerdogan (2019)	Springer	2019	Architecture design approach for IoT-based farm management information systems	x	x	x			x
[21] Lee et al. (2019)	IEEE	2021	Autonomous navigation in an agriculture product processing center	x	x	x			x
[22] Liu et al. (2019)	IEEE	2019	Video-Based Prediction for Header-Height Control of a Combine Harvester	x	x	x	x		x
[23] Ma et al. (2022)	IEEE	2022	Industrial Internet of Things (IoT) and 3D Reconstruction Empowered Smart Agriculture System	x	x	x	x		x
[24] Maffezzoli et al. (2022)	Science Direct	2022	Agriculture 4.0: A systematic literature review on the paradigm, technologies and benefits	x	x	x	x	x	x
[25] Mahajan et al. (2021)	Springer	2020	CL-IoT: cross-layer Internet of Things protocol for intelligent manufacturing of smart farming	x					x
[26] Mahmud et al. (2020)	ACM	2020	Application Management in Fog Computing Environments A Taxonomy Review and Future Directions	x	x				x
[27] Mathi et al. (2023)	Science Direct	2023	An Internet of Things-based Efficient Solution for Smart Farming	x	x	x			x
[28] Mehta et al. (2023)	IEEE	2023	Intelligent Technique for Smart Locust Swarm Detection and Prevention Shield for Agricultural Fields	x	x	x			x
[29] Mezquita et al. (2020)	Springer	2020	Blockchain-Based Architecture: A MAS Proposal for Efficient Agri-Food Supply Chains	x	x			x	x
[30] Mishra et al. (2022)	IEEE	2022	Blockchain-based Food Tracking for Intelligent Farming using IoT	x	x			x	x
[31] Mohapatra e Rath (2022)	Springer	2021	IoE based framework for smart agriculture	x	x	x	x		x
[32] Moorthy et al. (2023)	IEEE	2023	A Hybrid Data Acquisition Model for Precision Agriculture using IoT, Engineering Nanomaterials and Artificial Intelligence	x	x	x	x		x
[33] O'Grady et al. (2020)	Science Direct	2019	Edge computing: A tractable model for smart agriculture?	x	x	x	x		x

ID	Base	Ano	Título						
[34] Peerlinck, Sheppard, Pastorino e Maxwell (2019)	IEEE	2019	Optimal Design of Experiments for Precision Agriculture Using a Genetic Algorithm	x	x	x			x
[35] Peerlinck, Sheppard e Senecal (2019)	IEEE	2019	AdaBoost with Neural Networks for Yield and Protein Prediction in Precision Agriculture	x	x	x			x
[36] Penka et al. (2021)	Science Direct	2021	A new Kappa Architecture for IoT Data Management in Smart Farming	x	x	x			x
[37] Qazi et al. (2022)	IEEE	2022	IoT-Equipped and AI-Enabled Next Generation Smart Agriculture: A Critical Review, Current Challenges and Future Trends	x	x	x	x		x
[38] Ramanathan et al. (2022)	Science Direct	2022	Semantic Knowledge for Autonomous Smart Farming	x	x	x			x
[39] Rejeb et al. (2022)	Science Direct	2022	The Interplay between the Internet of Things and agriculture: A bibliometric analysis and research agenda	x	x	x			x
[40] Sakthi e DafniRose (2022)	Science Direct	2022	Blockchain-Enabled Smart Agricultural Knowledge Discovery System using Edge Computing	x	x	x		x	x
[41] Saleem et al. (2021)	Springer	2021	Automation in Agriculture by Machine and Deep Learning Techniques: A Review of Recent Developments	x	x	x			x
[42] Shiva et al. (2020)	IEEE	2020	Intelligent Farming using Delta Robot	x	x	x			x
[43] Shukla et al. (2022)	IEEE	2022	Internet of Things Application: E-health data acquisition system and Smart agriculture	x	x				
[44] Singh e Sobti (2022)	Science Direct	2022	Long-range real-time monitoring strategy for Precision Irrigation in urban and rural farming in society 5.0	x	x				
[45] Singh e Singh (2023a)	IEEE	2023	A Cost Effective IoT-Assisted Framework Coupled with Fog Computing for Smart Agriculture	x	x	x			x
[46] Singh e Singh (2023b)	IEEE	2023	A Fog Computing based Agriculture-IoT Framework for Detection of Alert Conditions and Effective Crop Protection	x	x	x			x
[47] Stumph et al. (2019)	IEEE	2019	Detecting Invasive Insects with Unmanned Aerial Vehicles	x	x	x	x		x
[48] Sudharson et al. (2023)	IEEE	2023	Efficient Soil Condition Monitoring with IoT Enabled Intelligent Farming Solution	x	x				x
[49] Tripathy et al. (2022)	IEEE	2022	Smart Farming based on Deep Learning Approaches		x	x			
[50] Tummers et al. (2021)	Springer	2021	Reference architecture design for farm management information systems: a multi-case study approach	x	x	x			x
[51] Vij et al. (2020)	Science Direct	2020	IoT and Machine Learning Approaches for Automation of Farm Irrigation System	x	x	x			x

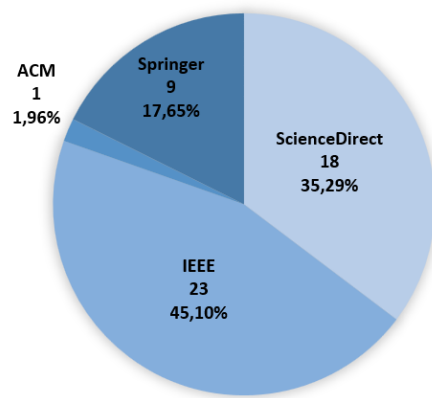


Figura 6: Publicações por fonte de pesquisa

A **Figura 7** apresenta o número de artigos em relação aos subsistemas mais citados na Agricultura Inteligente, a partir dos 51 estudos selecionados das bases de pesquisa. A terceira linha representa o número total de artigos por subsistema (colunas). As células nas linhas das bases de pesquisa correspondem ao número de artigos e percentuais em relação aos subsistemas.

4.6 QE2 - Quantas publicações ocorreram por ano?

A filtragem deste estudo selecionou 51 artigos entre os anos de 2019 e abril de 2023. A **Figura 8** mostra os trabalhos selecionados, distribuídos por ano e base de pesquisa.

Pode-se observar na figura que 6 artigos (11,76%) (IDs= 20, 22, 33, 34, 35, 47) foram publicados em 2019, 12 artigos em 2020 (25,53%) (IDs= 6, 8, 10, 12, 13, 16, 19, 25, 26, 29, 42, 51), 7 artigos em 2021 (13,73%) (IDs= 1, 14, 21, 31, 36, 41, 50), 19 artigos em 2022 (37,25%) (IDs= 2, 3, 4, 5, 7, 9, 11, 17, 18, 23, 24, 30, 37, 38, 39, 40, 43, 44, 49) e 7 artigos em 2023 (13,73%) (IDs= 15, 27, 28, 32, 45, 46, 48). Houve um acréscimo de 100% no número de artigos publicados entre 2019 e 2020, um decréscimo de 41,67% entre 2020 e 2021, um acréscimo significativo de 171,43% entre 2021 e 2022.

5 Discussão e Taxonomia

Uma taxonomia para a agricultura digital em ambientes inteligentes fornece uma estrutura para entender e categorizar as diferentes tecnologias e aplicações. Os estudos sobre o tema agricultura digital levam a sistemas ciberfísicos inteligentes que abrangem todo o ciclo de vida da agricultura, onde a produção está cada vez mais baseada em conteúdo digital e conectividade. A **Figura 9** apresenta uma taxonomia desta transformação digital e está organizada em categorias hierárquicas que abrangem diferentes aspectos dessa transformação, segmentadas em quatro sistemas. Essa segmentação facilita a compreensão da transformação digital na agricultura, permitindo uma vi-

são abrangente dos diferentes aspectos envolvidos. Cada sistema representa uma dimensão específica da transformação digital e está relacionada às outras categorias, formando um panorama completo da adoção de tecnologias e práticas digitais na agricultura. Os sistemas e subsistemas foram selecionados e integrados à taxonomia durante a leitura e interpretação dos artigos desta revisão.

A divisão do sistema Ciclo de Vida da Agricultura em três subsistemas (Pré-produção, Produção e Pós-produção) é fundamental porque a agricultura é um processo que engloba uma série de etapas interconectadas. Cada subsistema lida com atividades específicas e possui demandas distintas. Por exemplo, a Pré-produção envolve aspectos como a genética das culturas, planejamento e escolha de sementes adequadas. A Produção abrange o plantio, crescimento e colheita das culturas, enquanto a Pós-produção trata do processamento, armazenamento e distribuição dos produtos. Essa segmentação permite uma análise aprofundada de cada fase e otimização de processos.

O Sistema Agrícola (Administração), subdividido em seis subsistemas (Gestão de Estoque, Gestão de Culturas, Gestão de Resíduos, Gestão da Rastreabilidade, Gestão da Água e Gestão do Solo) atende à necessidade de controle de vários aspectos da produção agrícola. Cada subsistema aborda uma dimensão estratégica, permitindo uma abordagem mais focada e otimizada em cada aspecto de gestão. A divisão em seis subsistemas (Sensores e IoT, Big Data e Análise de Dados, Inteligência Artificial e Aprendizado de Máquina, Sistema de Informações Geográficas, Blockchain, Conectividade e Redes de Comunicação) no sistema de Tecnologias Habilitadoras reflete a diversidade das ferramentas e tecnologias que impulsionam a agricultura digital. Cada subsistema abrange tecnologias específicas, como sensores e IoT para coleta de dados em tempo real, Big Data e análise de dados, IA e ML, sistemas de informações geográficas para visualização espacial, Blockchain e conectividade e redes de comunicação. Essa segmentação permite um foco mais aprofundado em cada tecnologia e seu papel na otimização da produção agrícola.

O sistema de Automação Agrícola se concentra em práticas e tecnologias específicas de automação na agricultura. Ela engloba áreas como robótica agrícola, sistemas de irrigação inteligente, monitoramento remoto, agricultura vertical e indoor, e agricultura de precisão. Essas tecnologias visam otimizar as tarefas agrícolas, aumentar a eficiência e reduzir a dependência de trabalho manual.

6 Conclusões

A agricultura digital vem ganhando destaque como aliada na modernização do agronegócio. Essa realidade impõe novos desafios ao agronegócio, que deverá atuar cada vez mais em cooperação, compartilhando expertise e conhecimentos para o desenvolvimento de novas soluções, tecnologias e negócios.

Os estudos mostram que os ambientes inteligentes na agricultura convergem para a aplicação de espaços ciberfísicos, pois as aplicações descritas nesta revisão mostraram que a integração de sensores e inteligência computacional possibilitam informações relevantes que auxiliam a previsão, manejo e oportunidades de negócios de diversas

	Ciclo de vida		Administração				Tecnologia habilitadora					Automação						
	Produção		Gestão de culturas	Gestão da Água	Gestão do Solo	Sensores e IoT	Big Data e Análise de Dados	Inteligência Artificial e Aprendizado de Máquina	Conectividade e Redes de Comunicação	Monitoramento remoto								
		47									46	25	29	49	48	37	47	42
ScienceDirect	17	36,2%	17	37,0%	13	52,0%	13	44,8%	17	34,7%	16	33,3%	12	32,4%	16	34,0%	13	31,0%
IEEE	21	44,7%	20	43,5%	10	40,0%	11	37,9%	22	44,9%	23	47,9%	18	48,6%	21	44,7%	20	47,6%
ACM	1	2,1%	1	2,2%	0	0,0%	1	3,4%	1	2,0%	1	2,1%	0	0,0%	1	2,1%	1	2,4%
Springer	8	17,0%	8	17,4%	2	8,0%	4	13,8%	9	18,4%	8	16,7%	7	18,9%	9	19,1%	8	19,0%

Figura 7: Número de artigos x principais subsistemas da Agricultura inteligente

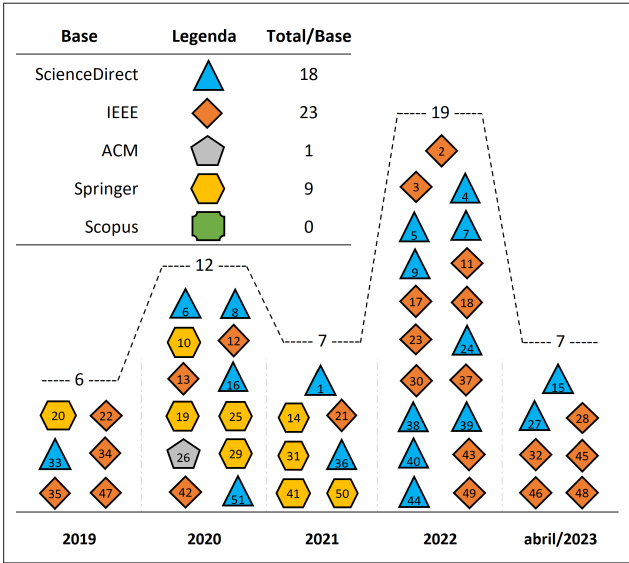


Figura 8: Publicações por ano e base de pesquisa

culturas agrícolas.

Na agricultura os ambientes inteligentes podem se manifestar através de fazendas verticais, estufas automatizadas e fazendas robóticas. Esses ambientes são projetados para otimizar o uso de recursos, como água e energia, além de oferecer condições ideais para o crescimento das plantas. Sensores e algoritmos inteligentes controlam a irrigação, a iluminação e outros fatores ambientais.

A agricultura digital em ambientes inteligentes também contribui para a rastreabilidade e a segurança alimentar, permitindo o rastreamento preciso e transparente dos produtos agrícolas ao longo da cadeia de suprimentos. A capacidade de identificar a origem dos alimentos, monitorar a qualidade e garantir a conformidade com os padrões de segurança alimentar é crucial para a confiança dos consumidores e a sustentabilidade dos negócios agrícolas.

A predição da escolha de cultura, plantio, manejo e demanda de mercado podem auxiliar na avaliação da influência de variabilidades de espaço e tempo nos rendimentos dos cultivos. Desta forma, aplicando-se as tecnologias disponíveis, pode-se otimizar recursos naturais (águas e solos), máquinas agrícolas (combustível e operação), insumos para o plantio (herbicidas e fertilizantes), aumen-

tando a produção por área plantada (diminuindo o custo de produção) e consequentemente agregando um valor maior ao produto oferecido.

Os sistemas propostos para a produção agrícola sugerem a utilização de espaços inteligentes integrados e não somente as aplicações de insumos ou de mapeamentos diversos como preconizado pela agricultura de precisão. Os processos envolvidos na produção vão desde a aquisição de sementes, insumos e previsões para a colocação no mercado destas mercadorias.

Observa-se que os trabalhos enfatizam a necessidade de dados consistentes e em tempo real, sejam eles obtidos de sensores no campo ou extraídos de informações na Internet. A necessidade de infraestrutura lógica de rede, comunicação e custos de implementação é primordial para o acesso a aplicação plena desses serviços.

Ainda há espaço para pesquisas e propostas de soluções mais abrangentes e integradas para aplicações da agricultura digital. Como exemplo pode-se criar um modelo para Agricultura Inteligente baseado no Gerenciamento de Históricos de Contextos Dinâmicos e Hierárquicos. Esta abordagem poderá ser uma contribuição científica, pois oferecerá uma ferramenta que aproveitará a infraestrutura e dados disponíveis para o auxílio de decisões no ciclo de vida agrícola.

A agricultura digital e os ambientes inteligentes são um campo de pesquisa emergente e há uma série de contribuições a serem exploradas nessa área. Essas contribuições incluem o desenvolvimento de novas tecnologias, a aplicação de novas técnicas e o desenvolvimento de novos modelos e paradigmas. Essas novas implementações terão o potencial de aumentar a produtividade, reduzir os custos, melhorar a sustentabilidade e promover a segurança alimentar.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade do Vale do Rio dos Sinos (Unisinos), o Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada (PPGCA), o Laboratório de Computação Móvel (Mobilab), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e ao Instituto Senai de Inovação em Sistemas de Sensoriamento (ISI-SIM).

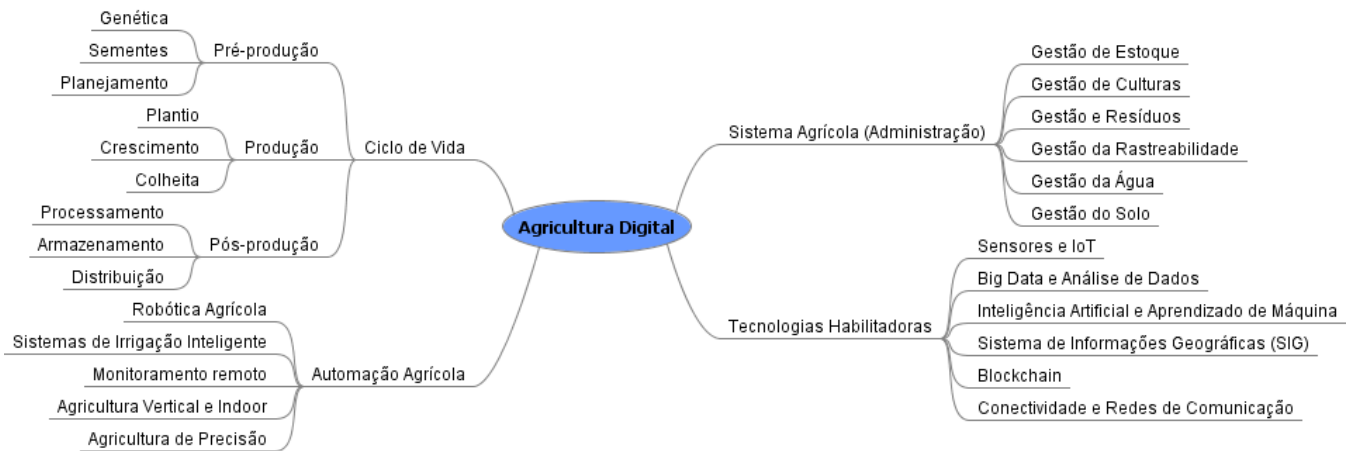


Figura 9: Taxonomia da Agricultura Digital

Referências

- Abbassi, Y. e Benlahmer, H. (2021). The internet of things at the service of tomorrow's agriculture, *Procedia Computer Science* **191**: 475–480. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.07.060>.
- Akshatha, Y. e Poornima, A. (2022). Iot enabled smart farming: A review, *2022 6th International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS)*, IEEE, pp. 431–436. <https://doi.org/10.1109/ICICCS53718.2022.9788149>.
- Anand, R. e Saxena, K. (2022). A model for secure food through smart technologies–iot, *2022 International Mobile and Embedded Technology Conference (MECON)*, IEEE, pp. 189–192. <https://doi.org/10.1109/MECON53876.2022.9752336>.
- Anand, S. e Sharma, A. (2022). Comprehensive analysis of services towards enhancing security in iot-based agriculture, *Measurement: Sensors* **24**: 100599. <https://doi.org/10.1016/j.measen.2022.100599>.
- Boursianis, A. D., Papadopoulou, M. S., Diamantoulakis, P., Liopa-Tsakalidi, A., Barouchas, P., Salahas, G., Karagiannidis, G., Wan, S. e Goudos, S. K. (2022). Internet of things (iot) and agricultural unmanned aerial vehicles (uavs) in smart farming: A comprehensive review, *Internet of Things* **18**: 100187. <https://doi.org/10.1016/j.measen.2022.100599>.
- de Araujo Zanella, A. R., da Silva, E. e Albini, L. C. P. (2020). Security challenges to smart agriculture: Current state, key issues, and future directions, *Array* **8**: 100048. <https://doi.org/10.1016/j.array.2020.100048>.
- de Freitas Bezerra, D., de Medeiros, V. W. C. e Gonçalves, G. E. (2022). Discrete controller synthesis applied to smart greenhouse, *Sustainable Computing: Informatics and Systems* **35**: 100679. <https://doi.org/10.1016/j.sucom.2022.100679>.
- Debauche, O., Mahmoudi, S., Elmoulat, M., Mahmoudi, S. A., Manneback, P. e Lebeau, F. (2020). Edge ai-iot pivot irrigation, plant diseases, and pests identification, *Procedia Computer Science* **177**: 40–48. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.10.009>.
- Dyck, G., Hawley, E., Hildebrand, K. e Paliwal, J. (2023). Digital twins: A novel traceability concept for post-harvest handling, *Smart Agricultural Technology* **3**: 100079. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100079>.
- El-Din, D. M., Hassanein, A. E. e Hassanien, E. E. (2021). Smart environments concepts, applications, and challenges, *Machine Learning and Big Data Analytics Paradigms: Analysis, Applications and Challenges* pp. 493–519. https://doi.org/10.1007/978-3-030-59338-4_24.
- Fabbri, S., Silva, C., Hernandez, E., Octaviano, F., Di Thomaz, A. e Belgamo, A. (2016). Improvements in the start tool to better support the systematic review process, *Proceedings of the 20th international conference on evaluation and assessment in software engineering*, pp. 1–5. <https://doi.org/10.1145/2915970.2916013>.
- Fuentealba, D., Flores, C., Soto, I., Zamorano, R. e Reid, S. (2022). Guidelines for digital twins in 5g agriculture, *2022 13th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP)*, IEEE, pp. 613–618. <https://doi.org/10.1109/CSNDSP54353.2022.9907935>.
- Glushkova, T., Stoyanov, S., Popchev, I. e Doukovska, L. (2020). Ambient-oriented modelling in an intelligent agriculture infrastructure, *2020 IEEE 10th International Conference on Intelligent Systems (IS)*, IEEE, pp. 612–618. <https://doi.org/10.1109/IS48319.2020.9199952>.
- Gulzar, M., Abbas, G. e Waqas, M. (2020). Climate smart agriculture: a survey and taxonomy, *2020 International conference on emerging trends in smart technologies (ICETST)*, IEEE, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICETST49965.2020.9080695>.
- Gupta, A. e Nahar, P. (2023). Classification and yield prediction in smart agriculture system using iot, *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*

- 14(8): 10235–10244. <https://doi.org/10.1007/s12652-021-03685-w>.
- Hassoun, A., Kamiloglu, S., Garcia-Garcia, G., Parra-López, C., Trollman, H., Jagtap, S., Aadil, R. M. e Esatbeyoglu, T. (2023). Implementation of relevant fourth industrial revolution innovations across the supply chain of fruits and vegetables: A short update on traceability 4.0, *Food Chemistry* **409**: 135303. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.135303>.
- Helfer, G. A., Barbosa, J. L. V., dos Santos, R. e da Costa, A. B. (2020). A computational model for soil fertility prediction in ubiquitous agriculture, *Computers and Electronics in Agriculture* **175**: 105602. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105602>.
- Jawhar, I., Mohamed, N., Kesserwan, N. e Al-Jaroodi, J. (2022). Networking architectures and protocols for multi-robot systems in agriculture 4.0, *2022 IEEE International Systems Conference (SysCon)*, IEEE, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/SysCon53536.2022.9773907>.
- Kaur, H., Shukla, A. K. e Singh, H. (2022). Review of iot technologies used in agriculture, *2022 2nd International Conference on Advance Computing and Innovative Technologies in Engineering (ICACITE)*, IEEE, pp. 1007–1011. <https://doi.org/10.1109/ICACITE53722.2022.9823520>.
- Keshav, S. (2007). How to read a paper, *ACM SIGCOMM Computer Communication Review* **37**(3): 83–84. <https://doi.org/10.1145/1273445.1273458>.
- Khan, T. F. e Kumar, D. S. (2020). Ambient crop field monitoring for improving context based agricultural by mobile sink in wsn, *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing* **11**: 1431–1439. <https://doi.org/10.1007/s12652-019-01177-6>.
- Kitchenham, B. (2004). Procedures for performing systematic reviews, Keele, UK, Keele University **33**(2004): 1–26. Disponível em <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=29890a936639862f45cb9a987dd599dce9759bf5>.
- K'oksal, O. e Tekinerdogan, B. (2019). Architecture design approach for iot-based farm management information systems, *Precision Agriculture* **20**: 926–958. <https://doi.org/10.1007/s12652-019-01177-6>.
- Lee, J.-m., Shim, Y.-b. e Kim, G.-w. (2019). Autonomous navigation in an agriculture product processing center, *2014 11th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI)*, IEEE, pp. 619–622. <https://doi.org/10.1109/URAI.2014.7057506>.
- Liu, H., Reibman, A. R., Ault, A. C. e Krogmeier, J. V. (2019). Video-based prediction for header-height control of a combine harvester, *2019 IEEE Conference on Multimedia Information Processing and Retrieval (MIPR)*, IEEE, pp. 310–315. <https://doi.org/10.1109/URAI.2014.7057506>.
- Ma, Z., Rayhana, R., Liu, Z., Xiao, G. G., Ruan, Y. e Sangha, J. S. (2022). Industrial internet of things (iot) and 3d reconstruction empowered smart agriculture system, *2022 IEEE International Conference on Internet of Things and Intelligence Systems (IoTaIS)*, IEEE, pp. 311–316. <https://doi.org/10.1109/IoTaIS56727.2022.9975929>.
- Maffezzoli, F., Ardolino, M., Bacchetti, A., Perona, M. e Renga, F. (2022). Agriculture 4.0: A systematic literature review on the paradigm, technologies and benefits, *Futures* **138**: 102998. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2022.102998>.
- Mahajan, H. B., Badarla, A. e Junnarkar, A. A. (2021). Cl-iot: cross-layer internet of things protocol for intelligent manufacturing of smart farming, *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing* **12**(7): 7777–7791. <https://doi.org/10.1007/s12652-020-02502-0>.
- Mahmud, R., Ramamohanarao, K. e Buyya, R. (2020). Application management in fog computing environments: A taxonomy, review and future directions, *ACM Computing Surveys (CSUR)* **53**(4): 1–43. <https://doi.org/10.1145/3403955>.
- Mathi, S., Akshaya, R. e Sreejith, K. (2023). An internet of things-based efficient solution for smart farming, *Procedia Computer Science* **218**: 2806–2819. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.01.252>.
- Mehta, K., Sood, V. M., Aayushi, A. e Chhabra, P. (2023). Intelligent technique for smart locust swarm detection and prevention shield for agricultural fields, *2023 2nd Edition of IEEE Delhi Section Flagship Conference (DELCON)*, IEEE, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/DELCON57910.2023.10127416>.
- Mezquita, Y., Gonz'alez-Briones, A., Casado-Vara, R., Chamoso, P., Prieto, J. e Corchado, J. M. (2020). Blockchain-based architecture: a mas proposal for efficient agri-food supply chains, *Ambient Intelligence—Software and Applications—, 10th International Symposium on Ambient Intelligence*, Springer, pp. 89–96. https://doi.org/10.1007/978-3-030-24097-4_11.
- Mishra, P., Mohanraj, B., Savithri, G., Roshini, M., Krishnamoorthy, R. e Arun, S. (2022). Blockchain-based food tracking for intelligent farming using iot, *2022 International Conference on Inventive Computation Technologies (ICICT)*, IEEE, pp. 522–527. <https://doi.org/10.1109/ICICT54344.2022.9850782>.
- Mohapatra, H. e Rath, A. K. (2022). Ioe based framework for smart agriculture: Networking among all agricultural attributes, *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing* **13**(1): 407–424. <https://doi.org/10.1007/s12652-021-02908-4>.
- Moorthy, K. S., Neeraia, M. P., Pavitra, P., Arivumalar, R., Veeranjanyulu, K. e Murali, S. M. (2023). A hybrid data acquisition model for precision agriculture using iot, engineering nanomaterials and artificial intelligence, *2023 7th International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI)*, IEEE, pp. 479–485. <https://doi.org/10.1109/ICOEI56765.2023.10125978>.
- O'Grady, M., Langton, D. e O'Hare, G. (2020). Edge computing: A tractable model for smart agriculture?, *Artificial Intelligence in Agriculture* **3**: 42–51. <https://doi.org/10.1016/j.aiaa.2019.12.001>.

- Peerlinck, A., Sheppard, J., Pastorino, J. e Maxwell, B. (2019). Optimal design of experiments for precision agriculture using a genetic algorithm, *2019 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)*, IEEE, pp. 1838–1845. <https://doi.org/10.1109/CEC.2019.8790267>.
- Peerlinck, A., Sheppard, J. e Senecal, J. (2019). Adaboost with neural networks for yield and protein prediction in precision agriculture, *2019 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*, IEEE, pp. 1–8. <https://doi.org/10.1109/IJCNN.2019.8851976>.
- Penka, J. B. N., Mahmoudi, S. e Debauche, O. (2021). A new kappa architecture for iot data management in smart farming, *Procedia Computer Science* **191**: 17–24. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.07.006>.
- Qazi, S., Khawaja, B. A. e Farooq, Q. U. (2022). Iot-equipped and ai-enabled next generation smart agriculture: A critical review, current challenges and future trends, *IEEE Access* **10**: 21219–21235. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.07.006>.
- Ramanathan, G., Vachtsevanou, D., Garcia, K., Lemee, J., Burattini, S., Bektaş, K. e Mayer, S. (2022). Semantic knowledge for autonomous smart farming, *IFAC-PapersOnLine* **55**(32): 217–222. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.11.142>.
- Rejeb, A., Rejeb, K., Abdollahi, A., Al-Turjman, F. e Treiblmaier, H. (2022). The interplay between the internet of things and agriculture: A bibliometric analysis and research agenda, *Internet of Things* **100580**: 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2022.100580>.
- Sakthi, U. e DafniRose, J. (2022). Blockchain-enabled smart agricultural knowledge discovery system using edge computing, *Procedia Computer Science* **202**: 73–82. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.04.011>.
- Saleem, M. H., Potgieter, J. e Arif, K. M. (2021). Automation in agriculture by machine and deep learning techniques: A review of recent developments, *Precision Agriculture* **22**(9): 2053–2091. <https://doi.org/10.1007/s11119-021-09806-x>.
- Shiva, R., Vimal, G., Kaviyarasu, M. et al. (2020). Intelligent farming using delta robot, *2020 International Conference on Power, Energy, Control and Transmission Systems (ICPECTS)*, IEEE, pp. 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICPECTS49113.2020.9337002>.
- Shukla, R., Mishra, A. R., Vishwakarma, N. K. e Mishra, R. (2022). Internet of things application: E-health data acquisition system and smart agriculture, *2022 10th International Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology-Signal and Information Processing (ICETET-SIP-22)*, IEEE, pp. 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICETET-SIP-2254415.2022.9791834>.
- Singh, D. K. e Sobti, R. (2022). Long-range real-time monitoring strategy for precision irrigation in urban and rural farming in society 5.0, *Computers & Industrial Engineering* **167**: 107997. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.107997>.
- Singh, G. e Singh, J. (2023a). A cost effective iot-assisted framework coupled with fog computing for smart agriculture, *2023 IEEE 8th International Conference for Convergence in Technology (I2CT)*, IEEE, pp. 1–8. <https://doi.org/10.1109/I2CT57861.2023.10126231>.
- Singh, G. e Singh, J. (2023b). A fog computing based agriculture-iot framework for detection of alert conditions and effective crop protection, *2023 5th International Conference on Smart Systems and Inventive Technology (ICSSIT)*, IEEE, pp. 537–543. <https://doi.org/10.1109/ICSSIT55814.2023.10060995>.
- Stumph, B., Virto, M. H., Medeiros, H., Tabb, A., Wolford, S., Rice, K. e Leskey, T. (2019). Detecting invasive insects with unmanned aerial vehicles, *2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, IEEE, pp. 648–654. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2019.8794116>.
- Sudharson, K., Alekhya, B., Abinaya, G., Rohini, C., Arthi, S. e Dhinakaran, D. (2023). Efficient soil condition monitoring with iot enabled intelligent farming solution, *2023 IEEE International Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science (SCEECS)*, IEEE, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/SCEECS57921.2023.10063050>.
- Tripathy, S. S., Tripathy, N., Rath, M., Pati, A., Panigrahi, A. e Dash, M. (2022). Smart farming based on deep learning approaches, *2022 2nd Odisha International Conference on Electrical Power Engineering, Communication and Computing Technology (ODICON)*, IEEE, pp. 1–5. <https://doi.org/10.1109/ODICON54453.2022.10010165>.
- Tummers, J., Kassahun, A. e Tekinerdogan, B. (2021). Reference architecture design for farm management information systems: a multi-case study approach, *Precision Agriculture* **22**(1): 22–50. <https://doi.org/10.1007/s11119-020-09728-0>.
- Vij, A., Singh, V., Jain, A., Bajaj, S., Bassi, A. e Sharma, A. (2020). Iot and machine learning approaches for automation of farm irrigation system, *Procedia Computer Science* **167**: 1250–1257. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.03.440>.