

**INSTITUTO FEDERAL GOIANO  
CAMPUS MORRINHOS  
CURSO DE BACHARELADO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO**

**JULIA GABRIELA SILVA**

**REVISÃO SISTEMÁTICA: ROBÔS QUADRÚPEDES NO SETOR AGRÍCOLA**

**MORRINHOS – GO  
2026**

**JULIA GABRIELA SILVA**

**REVISÃO SISTEMÁTICA: ROBÔS QUADRÚPEDES NO SETOR AGRÍCOLA**

Monografia apresentada ao Curso Superior de Ciências da Computação do Instituto Federal Goiano – Campus Morrinhos, como requisito parcial para obtenção de título de Bacharel em Ciências da Computação.

**Área de concentração:** Ciência da Computação.

**Orientador:** Prof. Dr. Alexandre Carvalho Silva.

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**  
**Sistema Integrado de Bibliotecas – SIBI/IF Goiano Campus Morrinhos**

S586r Silva, Julia Gabriela.  
Revisão Sistemática: Robôs quadrúpedes no setor agrícola. / Julia Gabriela Silva. – Morrinhos, GO: IF Goiano, 2026.  
31 f. : il. color.

Orientador: Dr. Alexandre Carvalho Silva.

Trabalho de conclusão de curso (graduação) – Instituto Federal Goiano Campus Morrinhos, Bacharelado em Ciências da Computação, 2026.

1. Automação agrícola. 2. Robótica agrícola. 3. Tecnologias agrícolas. I. Silva, Alexandre Carvalho. II. Instituto Federal Goiano. III. Título.

CDU 658.52.011.56

Fonte: Elaborado pela Bibliotecária-documentalista Morgana Guimarães, CRB1/2837

## TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano a disponibilizar gratuitamente o documento em formato digital no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

### IDENTIFICAÇÃO DA PRODUÇÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA

- |  |   |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> Tese (doutorado)            | <input type="checkbox"/> Artigo científico              |
| <input type="checkbox"/> Dissertação (mestrado)      | <input type="checkbox"/> Capítulo de livro              |
| <input type="checkbox"/> Monografia (especialização) | <input type="checkbox"/> Livro                          |
| <input checked="" type="checkbox"/> TCC (graduação)  | <input type="checkbox"/> Trabalho apresentado em evento |

Produto técnico e educacional - Tipo:

Nome completo do autor:

Julia Gabriela Silva

Matrícula:

2017104201940164

Título do trabalho:

Revisão Sistemática: Robôs Quadrúpedes no Setor Agrícola

### RESTRIÇÕES DE ACESSO AO DOCUMENTO

Documento confidencial:  Não  Sim, justifique:

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIIF Goiano:  /  /

O documento está sujeito a registro de patente?  Sim  Não

O documento pode vir a ser publicado como livro?  Sim  Não

### DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O(a) referido(a) autor(a) declara:

- Que o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- Que obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autoria, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- Que cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

Morrinhos- GO

23 /06 /2026

Local

Data



Documento assinado digitalmente  
JULIA GABRIELA SILVA  
Data: 23/06/2026 14:18:46-0300  
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Assinatura do autor e/ou detentor dos direitos autorais

Ciente e de acordo:

Assinatura do(a) orientador(a)



Documento assinado digitalmente  
ALEXANDRE CARVALHO SILVA  
Data: 25/06/2026 09:47:25-0300  
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA  
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

Ata nº 27/2026 - CCEG-MO/CEG-MO/DE-MO/CMPMHOS/IFGOIANO

### ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CURSO

#### ATA DE DEFESA DA BANCA DE EXAME DE TRABALHO DE CURSO POR VIDEOCONFERÊNCIA

Aos **08** dias do mês de **junho** de **2026**, às 19 horas foi realizada a Banca de Exame, em formato remoto para a apresentação pública e defesa do trabalho de curso do discente **Julia Gabriela Silva** intitulado como: **REVISÃO SISTEMÁTICA: ROBÔS QUADRÚPEDES NO SETOR AGRÍCOLA**, como requisito necessário para a conclusão do curso Bacharelado em Ciência da Computação - IFGoiano campus Morrinhos.

A Banca de Exame foi constituída pelos membros: **Prof. Dr. Alexandre Carvalho Silva (orientador)**, **Prof. Me. Angel Rodrigues Ferreira** e **Prof. Bel. Lucas de Carvalho Batista Cruz**. Após a análise, emitiram o seguinte resultado:

1 - (  ) **Aprovado**

2 - ( ) **Aprovado com ressalva**

(A Banca Examinadora deve definir as exigências a serem cumpridas pelo aluno na revisão, ficando o orientador responsável pela verificação do cumprimento das mesmas.)

Observações: \_\_\_\_\_

3 - ( ) **Reprovado com o seguinte parecer:** \_\_\_\_\_

Morrinhos - GO, **08** de junho de 2026.

Por ser verdade firmamos a presente:

*(Assinado Eletronicamente)*

**Prof. Dr. Alexandre Carvalho Silva**

Orientador(a)

*(Assinado Eletronicamente)*

**Prof. Me. Angel Rodrigues Ferreira**

Membro Interno

*(Assinado Eletronicamente)*

**Prof. Bel. Lucas de Carvalho Batista Cruz**

Membro

*(Assinado Eletronicamente)*

Documento assinado eletronicamente por:

- **Alexandre Carvalho Silva**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO , em 08/06/2026 20:16:48.
- **Lucas de Carvalho Batista da Cruz**, PROF ENS BAS TEC TECNOLOGICO-SUBSTITUTO , em 08/06/2026 20:18:30.
- **Angel Rodrigues Ferreira**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO , em 09/06/2026 09:02:03.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 08/06/2026. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

**Código Verificador:** 827752  
**Código de Autenticação:** 3e65323597



## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, agradeço a Deus por me conceder fé, sabedoria e força para enfrentar e superar todas as dificuldades encontradas ao longo desta jornada acadêmica.

À minha família, expresso minha mais profunda gratidão. Vocês estiveram presentes em todos os momentos, oferecendo apoio, incentivo e acreditando em mim mesmo nos momentos mais desafiadores. Cada palavra de motivação, cada gesto de carinho e cada comemoração diante das conquistas foram fundamentais para que eu pudesse chegar até aqui.

Ao Instituto Federal Goiano Campus Morrinhos, agradeço pela oportunidade de formação e pelo ambiente acadêmico que contribuiu significativamente para o meu desenvolvimento pessoal e profissional. Sou grata também ao corpo docente, que ao longo dessa trajetória compartilhou conhecimentos e experiências essenciais para minha formação.

De maneira especial, agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Alexandre Carvalho, pela dedicação, paciência e por todo o conhecimento compartilhado durante o desenvolvimento deste trabalho.

Por fim, agradeço à minha família por fazer parte de mais esta conquista. Sem o amor, o apoio e a presença de vocês, não seria possível concretizar esta importante etapa da minha vida.

## RESUMO

Os robôs quadrúpedes, têm se destacado como uma das inovações tecnológicas emergentes no contexto da agricultura moderna. O avanço das tecnologias computacionais, aliado ao desenvolvimento da robótica e dos sistemas inteligentes, tem possibilitado a criação de soluções capazes de auxiliar nas atividades agrícolas, promovendo maior eficiência operacional, otimização de recursos e apoio às tarefas realizadas no campo. Nesse cenário, os robôs quadrúpedes apresentam características relevantes, como mobilidade, autonomia e capacidade de locomoção em terrenos irregulares, o que os torna potencialmente adequados para aplicações em diferentes ambientes agrícolas.

Apesar do crescimento das pesquisas relacionadas à automação e à robótica no setor agrícola, observa-se que a utilização de robôs quadrúpedes ainda se encontra em estágio inicial de adoção em diversas atividades do setor. Dessa forma, torna-se relevante ampliar as discussões acadêmicas sobre o potencial dessas tecnologias, bem como compreender de que maneira elas vêm sendo investigadas e aplicadas no contexto agrícola.

Diante desse cenário, este trabalho tem como objetivo analisar a utilização de robôs quadrúpedes na agricultura, buscando compreender suas principais aplicações, benefícios e desafios no setor agrícola. Para isso, foi adotada uma abordagem baseada na revisão sistemática da literatura, com foco na análise de trabalhos acadêmicos relacionados ao uso de robôs quadrúpedes em atividades agrícolas. A metodologia contempla as etapas de busca, seleção e análise de estudos científicos publicados sobre o tema, permitindo identificar tendências de pesquisa, aplicações desenvolvidas e contribuições dessas tecnologias para o avanço da automação no setor agrícola.

Espera-se que os resultados deste estudo contribuam para ampliar o entendimento sobre o uso de robôs quadrúpedes na agricultura, evidenciando o potencial dessas tecnologias como ferramentas de apoio à inovação, automação e desenvolvimento tecnológico no contexto agrícola.

**Palavras-chave:** Robôs quadrúpedes; Robótica agrícola; Automação agrícola; Tecnologias agrícolas; Revisão sistemática.

## ABSTRACT

Legged robots, commonly known as quadruped robots, have emerged as one of the technological innovations within the context of modern agriculture. Advances in computational technologies, combined with developments in robotics and intelligent systems, have enabled the creation of solutions capable of supporting agricultural activities, promoting greater operational efficiency, resource optimization, and assistance in tasks performed in the field. In this context, quadruped robots present relevant characteristics such as mobility, autonomy, and the ability to move across uneven terrain, making them potentially suitable for applications in different agricultural environments.

Despite the growth of research related to automation and robotics in the agricultural sector, the use of quadruped robots is still at an early stage of adoption in several agricultural activities. Therefore, it becomes important to expand academic discussions regarding the potential of these technologies, as well as to understand how they have been investigated and applied in the agricultural context.

In this scenario, this study aims to analyze the use of quadruped robots in agriculture, seeking to understand their main applications, benefits, and challenges within the agricultural sector. To achieve this objective, a systematic literature review approach was adopted, focusing on the analysis of academic studies related to the use of quadruped robots in agricultural activities. The methodology includes the stages of searching, selecting, and analyzing scientific studies published on the topic, allowing the identification of research trends, developed applications, and contributions of these technologies to the advancement of automation in the agricultural sector.

It is expected that the results of this study will contribute to expanding the understanding of the use of quadruped robots in agriculture, highlighting the potential of these technologies as tools to support innovation, automation, and technological development in the agricultural context.

**Keywords:** Quadruped Robots; Agricultural Robotics; Agricultural Automation; Agricultural Technologies; Systematic Review.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Exemplo de robô quadrúpede utilizado em aplicações de inspeção, monitoramento e navegação autônoma .....	5
Figura 2: O modelo detecta apenas os cachos de uva na primeira fileira, mas não nas fileiras ao fundo. ....	7
Figura 3: Fluxo de seleção dos estudos .....	14
Figura 4: Movimento sequencial do robô quadrúpede ao evitar região de baixa trafegabilidade.....	17
Figura 5: Protótipo do robô quadrúpede macio em posição não atuada e em pose de locomoção .....	18
Figura 6: Robô quadrúpede HyQReal em ambiente de vinhedo .....	19
Figura 7: Sistema físico e sistema virtual utilizados no monitoramento de doenças em tomateiros.....	20
Figura 8: Simulação do sistema robótico autônomo para detecção de doenças em ambiente agrícola.....	21
Figura 9: Diagrama de blocos do sistema robótico multifuncional para monitoramento agrícola. ....	22
Figura 10: Sistemas de guiamento de veículos terrestres automáticos aplicados à agricultura .....	23

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 – Síntese comparativa dos artigos selecionados

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

RPAS	Sistema de Aeronave Remotamente Pilotada
IA	Inteligência Artificial
VANTs	Veículos Aéreos não Tripulados
UDA	Adaptação de Domínio não Supervisionada
IoT	Internet das Coisas
QP	Questões de Pesquisa

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>4</b>
<b>2.1 Conceito Robôs Quadrúpedes .....</b>	<b>4</b>
<b>2.2 Robótica Aplicada à Agricultura .....</b>	<b>5</b>
<b>2.3 Aplicações de Robôs Quadrúpedes no Setor Agrícola.....</b>	<b>6</b>
<b>2.4 Desafios e Avanços Tecnológicos .....</b>	<b>8</b>
<b>3 METODOLOGIA .....</b>	<b>9</b>
<b>3.1 Classificação da Pesquisa.....</b>	<b>9</b>
<b>3.2 Questões de Pesquisa .....</b>	<b>10</b>
<b>3.3 Estratégia de Coleta e Bases de Dados .....</b>	<b>10</b>
<b>3.4 Critérios de Inclusão e Exclusão .....</b>	<b>11</b>
<b>3.5 Seleção dos Estudos e Extração de Dados .....</b>	<b>12</b>
<b>4 ANÁLISE DOS ARTIGOS SELECIONADOS .....</b>	<b>15</b>
<b>4.1 Apresentação descritiva dos estudos selecionados .....</b>	<b>15</b>
<b>4.1.1 Online Feet Potential Fields for Quadruped Robots Navigation in Harsh Terrains .....</b>	<b>16</b>
<b>4.1.2 Efficient Trotting of Soft Robotic Quadrupeds .....</b>	<b>17</b>
<b>4.1.3 Computer-Vision Based Real Time Waypoint Generation for Autonomous Vineyard Navigation with Quadruped Robots .....</b>	<b>18</b>
<b>4.1.4 High-throughput robotic phenotyping for quantifying tomato disease severity enabled by synthetic data and domain-adaptive semantic segmentation .....</b>	<b>19</b>
<b>4.1.5 Crop Disease Detection with Autonomous Robotic Systems .....</b>	<b>20</b>
<b>4.1.6 Autonomous Robot for Field Health Indication and Crop Monitoring System using Artificial Intelligence.....</b>	<b>21</b>
<b>4.1.7 A comprehensive review of path planning for agricultural ground robots</b>	<b>22</b>

<b>4.1.8 Monitoring agricultural fields through collaboration between autonomous robots and drones .....</b>	<b>24</b>
<b>4.1.9 Intelligent Multi-agent Systems for UAV-UGV Path Optimization via Reflective Evolution .....</b>	<b>24</b>
<b>4.2 Comparação estruturada dos artigos.....</b>	<b>25</b>
<b>4.3 Questões de pesquisa .....</b>	<b>29</b>
<b>4.3.1 QP1 – Quais são as arquiteturas de locomoção e sensores predominantes em robôs quadrúpedes aplicados ao monitoramento agrícola? .....</b>	<b>29</b>
<b>4.3.2 QP2 – Como a visão computacional e o aprendizado profundo (Deep Learning) são empregados no monitoramento fitossanitário e na identificação de doenças em culturas agrícolas?.....</b>	<b>31</b>
<b>4.3.3 QP3 – De que forma a integração entre sistemas aéreos (UAV) e terrestres (UGV) otimiza a navegação autônoma e a coleta de dados em campo? .....</b>	<b>32</b>
<b>4.4 Síntese dos resultados e discussão geral .....</b>	<b>34</b>
<b>5 CONCLUSÃO .....</b>	<b>37</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>40</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Atualmente, a agricultura enfrenta desafios significativos relacionados à alta demanda por alimentos, à necessidade de incremento na produtividade e à adoção de práticas sustentáveis. Neste contexto, a inovação digital tem impulsionado a incorporação de sistemas robóticos, sensores inteligentes e inteligência artificial (IA) como ferramentas estratégicas para otimizar a gestão das culturas. A convergência entre robótica móvel e análise automatizada de dados tem viabilizado um monitoramento agrícola mais preciso, apoiando a tomada de decisão baseada em evidências e reduzindo perdas produtivas (VÉLEZ et al., 2025).

Estudos recentes evidenciam o potencial dessa aplicação. HE et al., (2024) demonstram que sistemas de fenotipagem robótica de alto rendimento, aliados à segmentação semântica adaptativa, permitem a quantificação automatizada da severidade de doenças em plantas, reduzindo a dependência de avaliações manuais. De forma complementar, VÉLEZ et al., (2025) apresentam um framework para detecção de uvas em vinhedos que utiliza modelos de IA treinados por veículos aéreos não tripulados (VANTs) e operados via smartphones, exemplificando a democratização do acesso à agricultura de precisão.

Contudo, apesar dos avanços nos modelos computacionais e de visão, observa-se que a literatura ainda dedica atenção insuficiente às limitações físicas das plataformas robóticas em ambientes não estruturados. Terrenos irregulares e obstáculos naturais representam desafios de mobilidade que soluções de rodas ou aéreas nem sempre superam com eficiência. Nesse cenário, os robôs quadrúpedes emergem como uma alternativa proeminente, dada sua estabilidade superior e versatilidade na integração de sensores.

Diante desse cenário, este trabalho tem como objetivo geral realizar uma revisão sistemática da literatura sobre o uso de robôs quadrúpedes e sistemas robóticos terrestres no setor agrícola. A partir de uma análise de artigos científicos, busca-se avaliar a aplicabilidade da robótica móvel e da inteligência artificial no monitoramento agrícola, identificando técnicas vigentes e lacunas tecnológicas para a adaptação dessas plataformas em ambientes reais de cultivo. Com base nesta busca, este trabalho tem como objetivos específicos responder a três questões de pesquisa:

QP1- Quais são as arquiteturas de locomoção e sensores predominantes em robôs quadrúpedes aplicados ao monitoramento agrícola?

QP2- Como a visão computacional e o aprendizado profundo (Deep Learning) são empregados no monitoramento fitossanitário e na identificação de doenças em culturas agrícolas?

QP3- De que forma a integração entre sistemas aéreos (UAV) e terrestres (UGV) otimiza a navegação autônoma e a coleta de dados em campo?

Com base nas respostas obtidas para as questões de pesquisa, espera-se contribuir para o avanço do conhecimento científico, bem como para a identificação de oportunidades relacionadas à aplicação de robôs quadrúpedes no contexto agrícola. Busca-se, assim, fornecer subsídios relevantes que possam apoiar tanto o desenvolvimento tecnológico quanto a implementação prática dessa tecnologia no setor.

## **1.1 Organização do Trabalho**

Este trabalho está estruturado em cinco capítulos que detalham o percurso da pesquisa, partindo da fundamentação teórica até a análise crítica dos resultados. O primeiro capítulo compreende a introdução, na qual são apresentadas a contextualização do tema, a delimitação do problema de pesquisa, a justificativa e os objetivos geral e específicos que norteiam o estudo.

O segundo capítulo dedica-se à fundamentação teórica, abordando os conceitos fundamentais de robótica móvel e as técnicas de inteligência artificial aplicadas ao setor agrícola, além de explorar o estado da arte das plataformas quadrúpedes. Na sequência, o terceiro capítulo descreve a metodologia utilizada, detalhando o processo de revisão sistemática da literatura, o que inclui as bases de dados consultadas, os critérios de inclusão e exclusão e o processo de seleção dos artigos científicos analisados.

O quarto capítulo concentra o desenvolvimento e a discussão do trabalho, realizando uma análise comparativa entre as tecnologias de visão computacional vigentes e as limitações físicas de mobilidade enfrentadas no campo, com foco no potencial dos robôs quadrúpedes para superar tais desafios.

Por fim, o quinto capítulo apresenta as considerações finais, sintetizando os principais achados da revisão e as conclusões alcançadas acerca da viabilidade e dos benefícios da adaptação dessas plataformas em ambientes reais de cultivo.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

O conteúdo apresentado nesta seção tem como objetivo proporcionar ao leitor uma aproximação inicial com o tema do estudo, introduzindo os principais conceitos relacionados aos robôs quadrúpedes e à robótica aplicada ao setor agrícola. Dessa forma, as subseções seguintes abordam, de maneira mais detalhada, os aspectos teóricos e conceituais que fundamentam a discussão proposta neste trabalho.

### 2.1 Conceito Robôs Quadrúpedes

As plataformas robóticas denominadas quadrúpedes são sistemas bioinspirados projetados para reproduzir, em alguma medida, a locomoção de organismos com quatro apoios. Esses robôs se caracterizam pelo uso de membros articulados, capazes de ampliar a adaptabilidade a terrenos irregulares e não estruturados. Historicamente, o interesse por mecanismos que simulam movimento remonta a dispositivos mecânicos antigos, evoluindo posteriormente para estruturas mais complexas voltadas ao estudo da locomoção e da transformação de movimento, como aquelas inspiradas nos mecanismos de Theo Jansen (SANTOS et al., 2018).

Com o avanço da robótica, esses sistemas passaram a incorporar sensores, algoritmos de controle e estratégias de planejamento de trajetória, permitindo maior autonomia e adaptação dinâmica ao ambiente. Nesse contexto, o desenvolvimento de robôs quadrúpedes passou a despertar interesse em áreas que exigem deslocamento seguro em superfícies complexas, como inspeção, exploração e aplicações em ambientes externos. Em comparação a plataformas baseadas exclusivamente em rodas ou esteiras, os quadrúpedes tendem a oferecer maior capacidade de transposição de obstáculos e melhor distribuição de apoio em terrenos acidentados, ainda que apresentem maior complexidade mecânica e computacional (CHAKRABORTY et al., 2022).

Sob a perspectiva estrutural, a configuração com quatro membros contribui para a estabilidade do sistema, especialmente em cenários nos quais o contato com o solo precisa ser constantemente reajustado. Essa característica torna

os robôs quadrúpedes relevantes para pesquisas que envolvem mobilidade em superfícies instáveis, navegação em ambientes não estruturados e execução de tarefas que demandam proximidade com o solo (SANTOS et al., 2018).

A representação visual de um robô quadrúpede é apresentada na Figura 1, permitindo observar sua estrutura locomotora baseada em quatro membros articulados, característica que favorece a mobilidade em diferentes tipos de terreno.



Figura 1: Exemplo de robô quadrúpede utilizado em aplicações de inspeção, monitoramento e navegação autônoma

Fonte: Adaptado de Boston Dynamics (2024)

## 2.2 Robótica Aplicada à Agricultura

A modernização do setor agrícola tem sido impulsionada pela necessidade de aumentar a eficiência produtiva, reduzir desperdícios e lidar com limitações de mão de obra. Nesse cenário, a robótica aplicada à agricultura tem se consolidado como uma área estratégica, especialmente em atividades relacionadas ao monitoramento de culturas, aquisição de dados e apoio à tomada de decisão.

Entre as contribuições recentes, destacam-se os sistemas terrestres voltados à fenotipagem e ao monitoramento fitossanitário. He et al. (2024) apresentam um sistema robótico de fenotipagem de alto rendimento para quantificação da severidade de doenças em tomateiros, baseado em segmentação semântica e

adaptação de domínio a partir de dados sintéticos. O estudo demonstra a viabilidade do uso de robôs terrestres equipados com visão computacional para monitorar doenças em condições de campo, reduzindo a dependência de avaliações exclusivamente manuais e ampliando o potencial de automação no acompanhamento das plantas.

Além disso, a agricultura digital também tem se beneficiado de frameworks baseados em visão computacional para estimativa de produtividade e detecção de frutos. Vélez et al. (2025), por exemplo, propõem uma abordagem voltada à detecção de cachos de uva em vinhedos por meio de modelos treinados com dados obtidos por UAVs e posteriormente aplicados a imagens capturadas por smartphones. Essa proposta evidencia como diferentes plataformas tecnológicas podem ser integradas para tornar ferramentas de agricultura de precisão mais acessíveis ao produtor.

Embora os sistemas aéreos apresentem vantagens relacionadas à cobertura de grandes áreas, os robôs terrestres oferecem benefícios específicos em tarefas que exigem observação em nível de planta ou coleta de dados sob a folhagem. Dessa forma, a combinação entre robótica terrestre, sensores e algoritmos de inteligência artificial tem ampliado as possibilidades de monitoramento detalhado das culturas, contribuindo para uma agricultura mais orientada por dados e por intervenções mais precisas (HE et al., 2024; VÉLEZ et al., 2025).

### **2.3 Aplicações de Robôs Quadrúpedes no Setor Agrícola**

As aplicações de robôs quadrúpedes no setor agrícola ainda se encontram em estágio de desenvolvimento e validação, mas já demonstram potencial em tarefas que exigem mobilidade em terrenos irregulares, navegação autônoma e interação próxima com o ambiente de cultivo.

Um exemplo relevante é apresentado por Milburn et al. (2023), no contexto do projeto VINUM, no qual o robô quadrúpede HyQReal foi empregado em vinhedos para navegação autônoma e aproximação de videiras em tarefas relacionadas à poda de inverno. O estudo descreve uma arquitetura baseada em visão computacional para geração de waypoints em tempo real, evidenciando a viabilidade do uso de plataformas quadrúpedes em ambientes agrícolas complexos. Os resultados apontam confiabilidade do sistema em condições controladas de campo,

embora os próprios autores indiquem a necessidade de avanços adicionais na precisão da detecção e da navegação.

Além das aplicações diretamente associadas a robôs quadrúpedes, outras pesquisas envolvendo robôs terrestres ajudam a compreender o papel dessas plataformas na agricultura de precisão. He et al. (2024) demonstram que robôs terrestres podem ser empregados para aquisição de imagens laterais de plantas em campo e para apoio ao monitoramento automatizado da severidade de doenças, o que reforça o potencial dessas tecnologias para fenotipagem e diagnóstico agrícola. Embora o trabalho não trate especificamente de robôs quadrúpedes, ele contribui para a compreensão das funcionalidades que podem ser incorporadas a plataformas móveis mais robustas.

Na viticultura, estudos como o de Vélez et al. (2025) também evidenciam o avanço de soluções baseadas em inteligência artificial para detecção de cachos de uva e apoio ao manejo agrícola. Ainda que a proposta esteja centrada em UAVs e smartphones, ela mostra como a visão computacional pode ser aplicada à estimativa de produtividade e ao acompanhamento de culturas, abrindo possibilidades de integração futura com plataformas terrestres autônomas. Tal limitação de percepção pode ser visualizada na Figura 2, que ilustra a detecção restrita aos cachos de uva posicionados na primeira fileira do vinhedo.

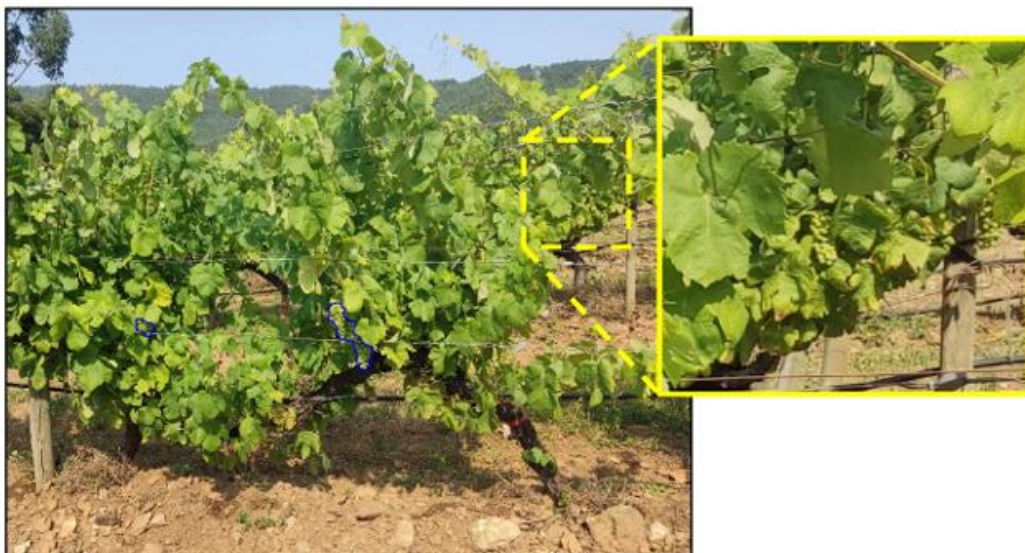


Figura 2: O modelo detecta apenas os cachos de uva na primeira fileira, mas não nas fileiras ao fundo

Fonte: Vélez et al. (2025)

Desse modo, as aplicações de robôs quadrúpedes no setor agrícola podem ser compreendidas, atualmente, em duas frentes complementares: a primeira, voltada à mobilidade e à navegação em ambientes complexos; e a segunda, relacionada à incorporação de sensores e algoritmos capazes de ampliar o monitoramento e a análise das culturas. Essa combinação reforça o potencial dessas plataformas para atuar em cenários onde robustez mecânica e aquisição qualificada de dados são igualmente necessárias.

## **2.4 Desafios e Avanços Tecnológicos**

Apesar dos avanços recentes, a adoção de robôs quadrúpedes e de outras plataformas terrestres no contexto agrícola ainda enfrenta desafios técnicos e operacionais relevantes. Um dos principais pontos diz respeito à adaptação desses sistemas a ambientes reais, marcados por irregularidades do solo, variações climáticas, obstáculos naturais e condições de iluminação nem sempre previsíveis.

No campo da robótica de pernas, um desafio recorrente é a transição entre simulação e aplicação em ambientes reais, frequentemente associada ao chamado gap entre simulação e realidade. Trabalhos conceituais e de modelagem, como o de Santos et al. (2018), contribuem para o entendimento da cinemática e da estrutura mecânica desses robôs, mas a operação em campo exige robustez adicional em termos de percepção, controle e adaptação ao terreno. Nesse sentido, pesquisas como a de He et al. (2024) mostram que técnicas baseadas em dados sintéticos, adaptação de domínio e visão computacional podem reduzir parte das limitações relacionadas à escassez de dados reais e ao treinamento de sistemas inteligentes para ambientes agrícolas.

Outro desafio importante refere-se à autonomia energética e ao custo de implementação. Sistemas quadrúpedes demandam controle sofisticado, múltiplos atuadores e elevada capacidade de processamento, o que impacta diretamente no consumo de energia e na viabilidade econômica da solução. Ghobadpour et al. (2022) discutem como a eletrificação de veículos off-road e o avanço de tecnologias ligadas à agricultura digital podem contribuir para uma transição mais ampla em direção a plataformas agrícolas autônomas e mais sustentáveis, ainda que esse movimento permaneça em consolidação.

Também se destacam os desafios de navegação autônoma e planejamento de trajetória em ambientes agrícolas. Chakraborty et al. (2022) demonstram que o planejamento de caminho para robôs terrestres constitui uma etapa central para aplicações em agricultura de precisão, especialmente quando há necessidade de deslocamento seguro entre linhas de plantio, cobertura de área e desvio de obstáculos. No caso dos quadrúpedes, essa exigência é ainda mais crítica, pois a navegação precisa considerar não apenas o caminho global, mas também a estabilidade local e a interação física com o terreno.

Por fim, os avanços em Internet das Coisas, Edge Computing, sensores embarcados e integração entre múltiplas plataformas apontam para um cenário de crescente sofisticação da robótica agrícola. Ainda que muitas soluções estejam em fase experimental ou de validação, a literatura indica uma tendência de integração entre mobilidade autônoma, percepção ambiental e análise inteligente de dados, consolidando a robótica como elemento estratégico no desenvolvimento da agricultura de precisão (MAKAM et al., 2024; GHOBADPOUR et al., 2022; CHAKRABORTY et al., 2022).

### **3 METODOLOGIA**

Neste capítulo, apresentam-se os procedimentos utilizados para a elaboração desta pesquisa, que se caracteriza como uma revisão sistemática da literatura. O objetivo principal é investigar as tecnologias empregadas em robôs quadrúpedes no cenário agrícola, garantindo a reprodutibilidade do estudo por meio de etapas bem definidas de coleta e filtragem de dados.

#### **3.1 Classificação da Pesquisa**

A investigação foi estruturada para mapear o estado da arte e identificar tendências tecnológicas em plataformas robóticas de pernas. Para garantir o rigor acadêmico e a reprodutibilidade dos resultados, o processo de coleta e análise foi organizado em etapas sequenciais de planejamento, triagem, elegibilidade e síntese dos estudos selecionados.

### 3.2 Questões de Pesquisa

Para direcionar a análise dos artigos selecionados, foram estabelecidas as seguintes questões:

- **QP1:** Quais são as arquiteturas de locomoção e sensores predominantes em robôs quadrúpedes aplicados ao monitoramento agrícola?
- **QP2:** Como a visão computacional e o aprendizado profundo (Deep Learning) são empregados no monitoramento fitossanitário e na identificação de doenças em culturas agrícolas?
- **QP3:** De que forma a integração entre sistemas aéreos (UAV) e terrestres (UGV) otimiza a navegação autônoma e a coleta de dados em campo?

### 3.3 Estratégia de Coleta e Bases de Dados

A prospecção dos documentos foi realizada em bases de dados científicas de relevância internacional, incluindo IEEE Xplore, ScienceDirect, Scopus e o repositório institucional do Instituto Federal. O recorte temporal priorizou publicações recentes, compreendidas entre (2018-2026), a fim de garantir o alinhamento com as inovações tecnológicas vigentes.

A recuperação dos trabalhos foi realizada por meio de combinações booleanas de termos em inglês, associadas aos operadores *AND* e *OR*, conforme os exemplos a seguir:

- quadruped robot and precision agriculture
- legged robots and computer vision and path optimization
- autonomous navigation and vineyard and ai
- uav and ugv and smart farming

### 3.4 Critérios de Inclusão e Exclusão

Com o objetivo de garantir a consistência metodológica e o alinhamento dos estudos ao escopo desta pesquisa, foram definidos critérios de inclusão e exclusão, aplicados de forma sistemática durante o processo de seleção dos trabalhos.

Os critérios de inclusão estabeleceram que seriam considerados estudos que apresentassem: (i) protótipos físicos, modelos de simulação ou algoritmos aplicados a robôs quadrúpedes ou sistemas robóticos terrestres no contexto agrícola; (ii) aplicações voltadas à agricultura de precisão ou fenotipagem de alta eficiência; e (iii) integração de tecnologias digitais, como inteligência artificial, visão computacional e Internet das Coisas (IoT).

Por sua vez, os critérios de exclusão foram definidos com o objetivo de eliminar estudos que não contribuíssem diretamente para a proposta da pesquisa, sendo excluídos aqueles que abordassem exclusivamente veículos aéreos não tripulados (UAVs), sem integração com sistemas terrestres, bem como trabalhos que não apresentassem detalhamento metodológico ou validação experimental.

A aplicação desses critérios foi realizada por meio da análise individual dos estudos selecionados. Observou-se que pesquisas voltadas ao desenvolvimento e controle de robôs quadrúpedes, com validação em ambientes simulados e reais, atendem integralmente aos critérios estabelecidos, uma vez que apresentam modelagem, experimentação e aplicação prática (Morlando et al., 2023; Arachchige et al., 2025).

Da mesma forma, estudos que abordam sistemas robóticos autônomos aplicados à agricultura, com utilização de técnicas de visão computacional e inteligência artificial para monitoramento e detecção de doenças em culturas, também foram considerados aderentes aos critérios de inclusão, por integrarem tecnologias digitais e aplicação no contexto agrícola (Rithani et al., 2023; Pandiaraj et al., 2022).

Além disso, pesquisas que exploram a utilização de robôs terrestres no contexto da agricultura de precisão, incluindo navegação autônoma e planejamento de trajetórias, demonstram forte alinhamento com os objetivos desta pesquisa, especialmente no que se refere à automação de atividades agrícolas e otimização de processos (Chakraborty et al., 2022).

Estudos que abordam a integração entre diferentes plataformas robóticas, como a colaboração entre veículos terrestres e aéreos, também foram considerados relevantes, por contribuírem para a compreensão do ecossistema tecnológico da agricultura inteligente, ainda que não estejam restritos exclusivamente a robôs quadrúpedes (Ciaccio et al., 2025).

Por outro lado, trabalhos que tratam exclusivamente do uso de UAVs, sem integração com sistemas terrestres, foram considerados com restrição, sendo utilizados apenas como suporte teórico para contextualização da agricultura de precisão e das tecnologias digitais aplicadas ao setor (Makam et al., 2024).

Adicionalmente, estudos que apresentam aplicação direta de robôs quadrúpedes em ambientes agrícolas, com uso de visão computacional para navegação autônoma, foram considerados totalmente aderentes aos critérios definidos, por integrarem robótica avançada, automação e aplicação prática no campo (Milburn et al., 2022).

Por fim, trabalhos de caráter predominantemente conceitual, sem aplicação direta no contexto agrícola, foram utilizados de forma complementar, contribuindo para a fundamentação teórica, mas com menor peso na análise principal.

Dessa forma, a aplicação dos critérios de inclusão e exclusão permitiu a seleção de um conjunto de estudos coerente com os objetivos da pesquisa, assegurando rigor metodológico, relevância científica e alinhamento com a temática da robótica aplicada à agricultura de precisão.

### **3.5 Seleção dos Estudos e Extração de Dados**

O processo de seleção dos estudos foi conduzido de forma sistemática, com o objetivo de identificar trabalhos alinhados ao escopo desta pesquisa. Inicialmente, foram identificados 15 estudos a partir das bases de dados selecionadas, conforme os critérios de busca previamente definidos.

Na etapa de triagem, realizou-se a leitura dos títulos e resumos, sendo excluídos 2 estudos que apresentavam baixa aderência ao contexto da robótica aplicada à agricultura. Em seguida, os 13 estudos restantes foram submetidos à leitura completa, permitindo uma avaliação mais aprofundada quanto ao atendimento dos critérios de inclusão e exclusão estabelecidos.

Durante a etapa de elegibilidade, foram excluídos 4 estudos que abordavam exclusivamente o uso de veículos aéreos não tripulados (UAVs) ou apresentavam aplicação indireta ao contexto da robótica terrestre, sendo considerados apenas como suporte teórico. Dessa forma, foram selecionados 9 estudos para compor o portfólio final da análise.

A seleção dos estudos seguiu uma lógica estruturada, baseada nas etapas de identificação, triagem, elegibilidade e inclusão, garantindo maior transparência e reprodutibilidade ao processo metodológico. O processo de seleção dos estudos está representado na Figura 3.

Após a definição do conjunto final de estudos, foi realizada a etapa de extração de dados. Nessa fase, foram coletadas informações relevantes de cada artigo, incluindo: tipo de plataforma robótica utilizada, contexto de aplicação agrícola, tecnologias empregadas (como inteligência artificial, visão computacional e Internet das Coisas), abordagem metodológica (experimental, simulação ou revisão), bem como os principais resultados e contribuições.

A extração dos dados foi conduzida de forma padronizada, permitindo a comparação entre os estudos selecionados e a identificação de tendências, lacunas e oportunidades de pesquisa no campo da robótica aplicada à agricultura.

Adicionalmente, os estudos selecionados foram organizados conforme sua temática predominante e sua relação com as questões de pesquisa definidas neste trabalho. Essa classificação permitiu agrupar os artigos nos eixos de locomoção e navegação, visão computacional e aprendizado profundo, e integração entre sistemas UAV e UGV, contribuindo para uma análise mais estruturada dos resultados obtidos.

Dessa forma, o processo de seleção e análise dos estudos assegura rigor metodológico, consistência científica e alinhamento com os objetivos propostos nesta pesquisa.

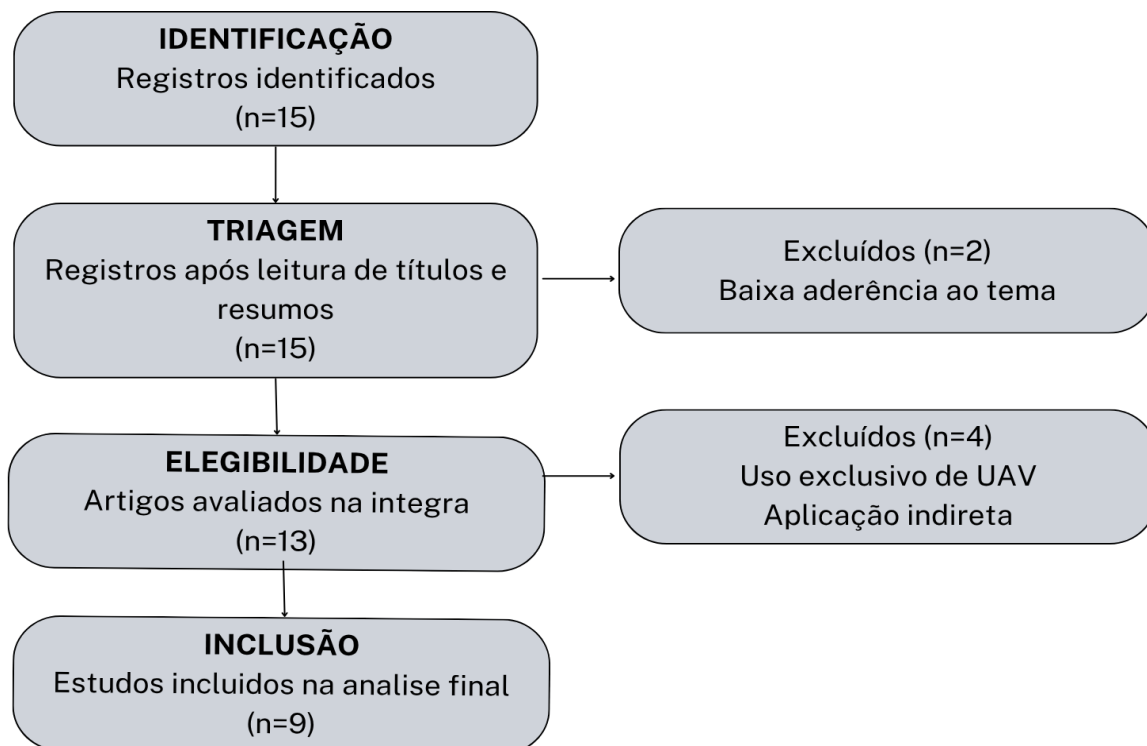


Figura 3: Fluxo de seleção dos estudos

Fonte: A autora.

O fluxograma apresentado na Figura 3 ilustra as etapas do processo de seleção dos estudos, desde a identificação inicial até a definição do portfólio final de análise. Observa-se que, dos 15 estudos inicialmente identificados, 9 foram considerados aderentes aos critérios estabelecidos, após as etapas de triagem e avaliação de elegibilidade, garantindo maior rigor metodológico na condução da pesquisa.

Por fim, destaca-se que, durante o desenvolvimento desta pesquisa, foram utilizadas ferramentas de inteligência artificial como apoio à organização das ideias, revisão textual e definição de palavras-chave para a busca dos estudos. Ressalta-se que todas as decisões metodológicas, bem como a seleção, análise e interpretação dos dados, foram realizadas de forma crítica e autônoma pela autora, garantindo a originalidade e a integridade acadêmica do trabalho.

## **4 ANÁLISE DOS ARTIGOS SELECIONADOS**

Nesta seção, apresenta-se a análise dos estudos selecionados para compor o portfólio final desta revisão sistemática, com base nos critérios metodológicos definidos no capítulo anterior. O objetivo central desta etapa consiste em interpretar, de forma crítica e organizada, as contribuições dos artigos quanto ao uso de robôs quadrúpedes e sistemas robóticos terrestres no contexto agrícola, considerando aspectos como arquitetura de locomoção, sensores embarcados, técnicas de visão computacional, aprendizado profundo e integração entre plataformas robóticas.

A análise foi estruturada de modo a ir além da simples descrição dos trabalhos, buscando identificar convergências, diferenças, limitações e tendências presentes na literatura. Para isso, inicialmente é apresentada uma síntese descritiva dos estudos selecionados, permitindo compreender o contexto, os objetivos e os principais resultados de cada artigo. Em seguida, os trabalhos serão organizados em uma comparação estruturada, com o intuito de facilitar a visualização das características predominantes no portfólio analisado. Por fim, a discussão será orientada diretamente pelas questões de pesquisa estabelecidas neste estudo, de modo a responder, de forma fundamentada, quais arquiteturas e sensores têm sido empregados, como a visão computacional e o aprendizado profundo vêm sendo aplicados à detecção de patógenos, e de que maneira a integração entre sistemas aéreos e terrestres contribui para a navegação autônoma e a coleta de dados em campo.

Dessa forma, esta seção constitui o núcleo analítico da pesquisa, pois transforma os artigos selecionados em evidências científicas articuladas entre si, permitindo não apenas compreender o que já foi desenvolvido, mas também identificar limitações técnicas, desafios de validação em campo e possibilidades de avanço para futuras aplicações da robótica quadrúpede na agricultura.

### **4.1 Apresentação descritiva dos estudos selecionados**

Esta subseção apresenta, de forma descritiva, os nove estudos selecionados para compor o portfólio final da revisão sistemática. O objetivo é sintetizar as características centrais de cada trabalho, considerando o problema investigado, a

plataforma robótica utilizada, as tecnologias embarcadas, o contexto agrícola analisado e os principais resultados apresentados. Essa etapa é importante porque oferece ao leitor uma visão inicial e organizada dos estudos antes da comparação estruturada e da discussão orientada pelas questões de pesquisa. Embora os artigos tenham sido reunidos em torno de um mesmo eixo temático, eles não são homogêneos entre si: alguns priorizam locomoção e estabilidade em terrenos complexos, outros enfatizam monitoramento agrícola por visão computacional, e outros exploram arquiteturas cooperativas entre plataformas terrestres e aéreas.

#### **4.1.1 Online Feet Potential Fields for Quadruped Robots Navigation in Harsh Terrains**

O estudo de Morlando et al. (2023) investiga a navegação de robôs quadrúpedes em terrenos severos e de baixa trafegabilidade, propondo uma estratégia baseada em campos potenciais artificiais calculados em tempo real a partir das forças de reação do solo. Em vez de depender exclusivamente de sensores exteroceptivos para avaliar a superfície, o método utiliza a própria interação mecânica do robô com o terreno para estimar a estabilidade do apoio e ajustar a direção do deslocamento. O trabalho foi validado em ambiente de simulação realista, com comparação em relação a métodos de navegação de referência, demonstrando a eficácia da abordagem para evitar regiões escorregadias ou pouco estáveis. Embora não tenha sido desenvolvido especificamente para uma cultura agrícola, o estudo é relevante por enfrentar um problema diretamente associado à operação de robôs em áreas rurais: a necessidade de adaptação contínua a terrenos irregulares, deformáveis ou imprevisíveis. Essa dinâmica de desvio de áreas instáveis pode ser observada na Figura 4, que ilustra a trajetória sequencial do robô quadrúpede ao evitar uma região de baixa trafegabilidade.

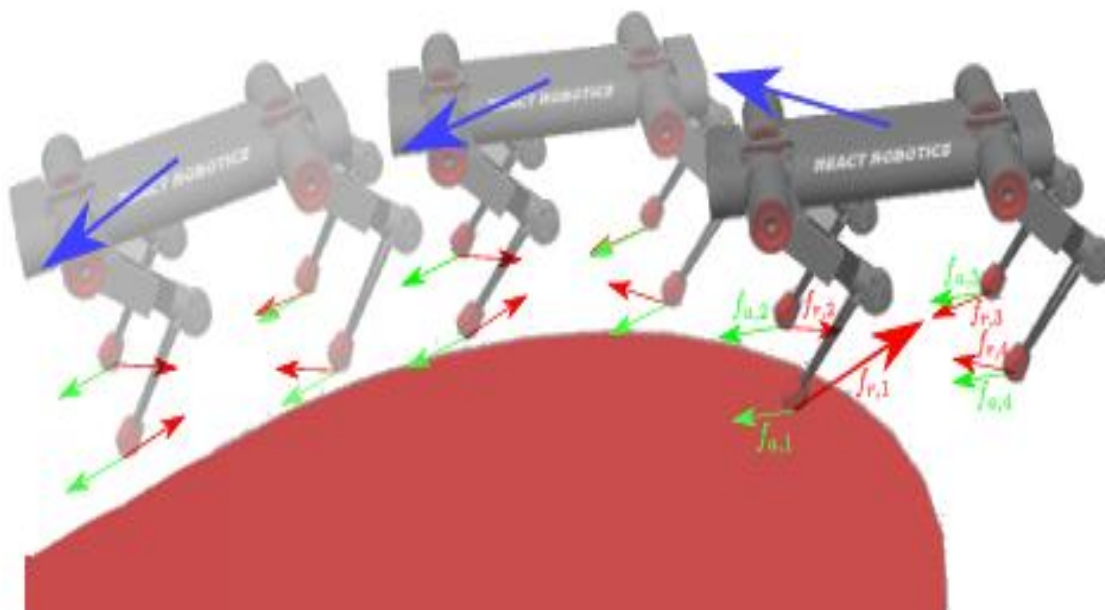


Figura 4: Movimento sequencial do robô quadrúpede ao evitar região de baixa trafegabilidade

Fonte: Morlando et al. (2023)

#### 4.1.2 Efficient Trotting of Soft Robotic Quadrupeds

No trabalho de Arachchige et al. (2025), o foco recai sobre a locomoção troteante de um robô quadrúpede macio, com ênfase na obtenção de movimentos dinamicamente estáveis e energeticamente mais eficientes. Os autores desenvolveram uma plataforma pneumática com membros flexíveis e utilizaram modelagem cinemática e dinâmica para gerar trajetórias de movimento em deslocamentos lineares e curvilíneos. O sistema foi validado experimentalmente em terrenos planos e irregulares, incluindo declives, superfícies naturais e áreas com obstáculos, apresentando resultados consistentes quanto à estabilidade e à eficiência do padrão locomotor adotado. Ainda que o artigo não esteja centrado em uma aplicação agrícola específica, ele contribui para esta revisão por ampliar a discussão sobre soluções mecânicas e cinemáticas que podem ser futuramente incorporadas a robôs de campo com maior capacidade de adaptação ao ambiente. A configuração estrutural da plataforma proposta pelos autores pode ser visualizada na Figura 5, que apresenta o protótipo do robô quadrúpede em posição não atuada e em pose de locomoção.

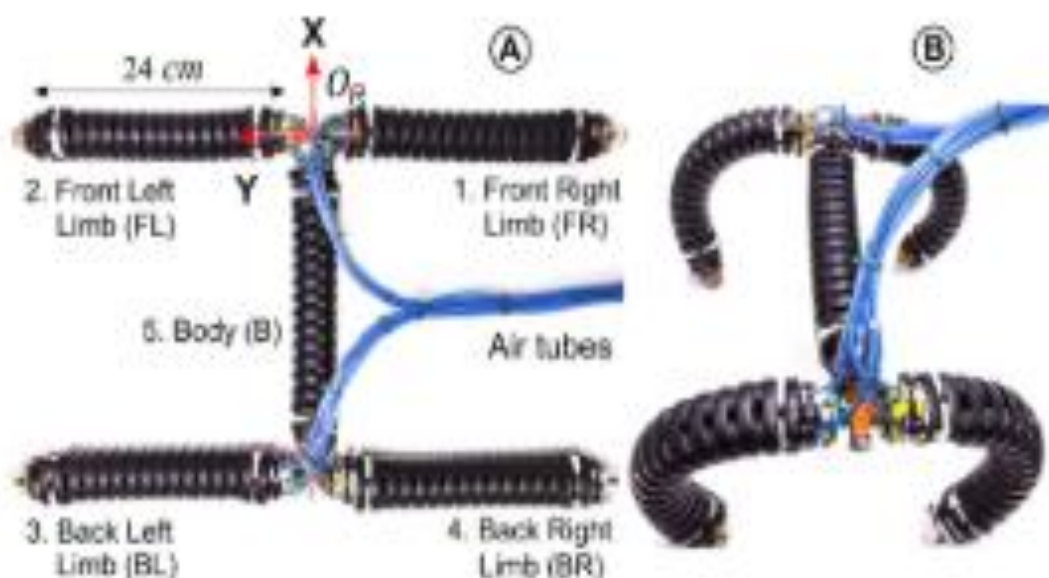


Figura 5: Protótipo do robô quadrúpede macio em posição não atuada e em pose de locomoção

Fonte: Arachchige et al. (2025)

#### 4.1.3 Computer-Vision Based Real Time Waypoint Generation for Autonomous Vineyard Navigation with Quadruped Robots

O artigo de Milburn et al. (2023) apresenta uma das aplicações mais diretamente relacionadas ao tema deste trabalho, ao descrever o uso do robô quadrúpede HyQReal em vinhedos, no contexto do projeto VINUM. A proposta busca lidar com a escassez de mão de obra especializada em tarefas sazonais de poda, utilizando o quadrúpede em conjunto com sensores visuais e um braço robótico. O estudo descreve uma arquitetura de navegação baseada em visão computacional para geração de waypoints em tempo real, permitindo que o robô identifique videiras e se aproxime delas em posições favoráveis à execução da poda. Os resultados indicam que a arquitetura é confiável em condições favoráveis, com erro médio de 21,5 cm na geração de waypoints, mas os próprios autores reconhecem que ainda são necessários avanços na precisão da detecção das videiras para um desempenho ideal. A relevância do trabalho está em demonstrar a viabilidade prática do uso de robôs quadrúpedes em ambientes agrícolas complexos, especialmente onde mobilidade lateral, adaptação ao terreno e autonomia de navegação são fundamentais.



Figura 6: Robô quadrúpede HyQReal em ambiente de vinhedo

Fonte: Milburn et al. (2023)

A Figura 6 apresenta o robô quadrúpede HyQReal operando em ambiente de vinhedo, ilustrando o contexto agrícola no qual a plataforma foi empregada para navegação autônoma e aproximação das videiras.

#### **4.1.4 High-throughput robotic phenotyping for quantifying tomato disease severity enabled by synthetic data and domain-adaptive semantic segmentation**

O estudo de He et al. (2024) trata do monitoramento automatizado da severidade de doenças em tomateiros por meio de um sistema robótico terrestre de fenotipagem de alto rendimento. Para isso, os autores desenvolveram um sistema que combina um robô físico de coleta de imagens laterais em campo, um ambiente virtual baseado em Unreal Engine 5 para geração de dados sintéticos e um algoritmo de segmentação semântica com adaptação de domínio não supervisionada. O trabalho parte do problema de que métodos anteriores se concentravam em folhas isoladas, ambientes laboratoriais ou imagens aéreas com baixa capacidade de observar partes inferiores da planta. Como resultado, os autores demonstram que o sistema é capaz de monitorar a planta inteira em condições de campo, com forte correlação entre as porcentagens de doença derivadas do sistema e a rotulagem manual. A principal

contribuição do artigo está na integração entre robótica terrestre, dados sintéticos e aprendizado profundo para quantificação de severidade de doença, ainda que sua aplicação tenha sido focada em tomate e em um problema bastante específico de segmentação.



Figura 7: Sistema físico e sistema virtual utilizados no monitoramento de doenças em tomateiros

Fonte: He et al. (2024)

A Figura 7 ilustra o sistema físico de coleta em campo e sua contraparte virtual, evidenciando a integração entre aquisição de imagens reais e geração de dados sintéticos proposta por He et al. (2024).

#### 4.1.5 Crop Disease Detection with Autonomous Robotic Systems

Em Rithani et al. (2024), é apresentado um sistema robótico autônomo voltado à detecção de doenças em culturas agrícolas com uso de ROS, câmera embarcada e modelo YOLOv8. O estudo foi concebido em um ambiente simulado de fazenda, no qual o robô navega automaticamente enquanto captura imagens em tempo real para identificar doenças específicas em plantas. A proposta combina navegação automatizada e detecção por visão computacional, destacando o potencial de reduzir o trabalho manual no monitoramento fitossanitário. A principal contribuição do artigo

está em mostrar como modelos modernos de detecção de objetos podem ser integrados a sistemas robóticos agrícolas relativamente leves. Como limitação, a pesquisa permanece vinculada a um cenário controlado, o que exige cautela quanto à generalização dos resultados para cultivos reais com maior variabilidade de iluminação, vegetação e obstáculos.

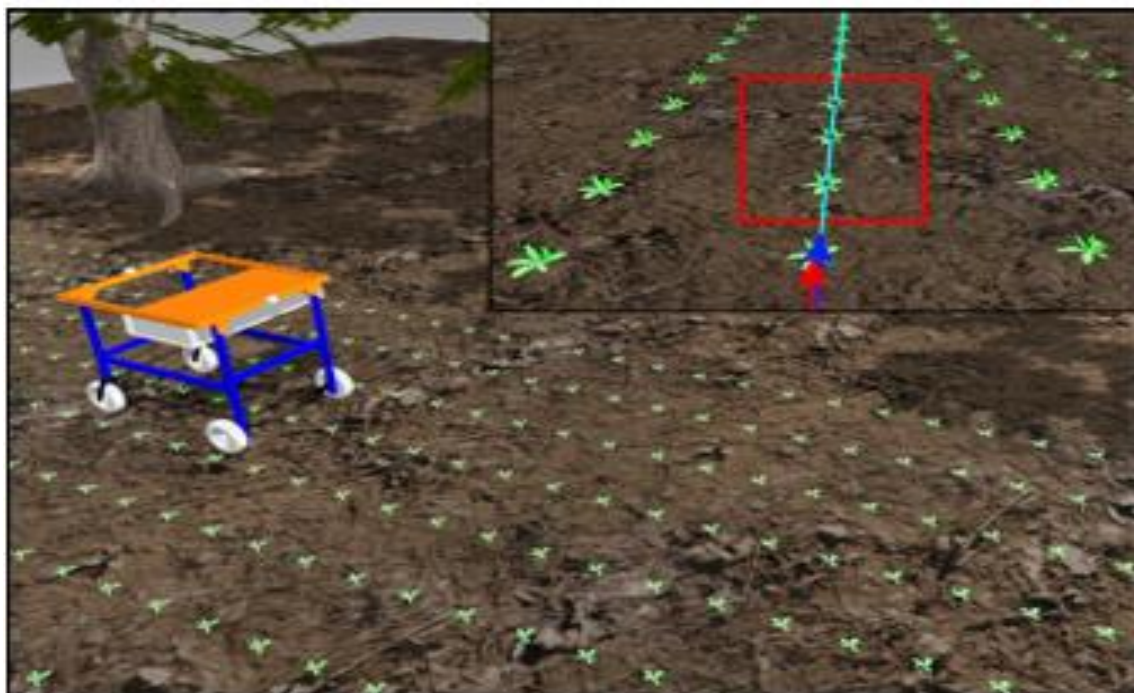


Figura 8: Simulação do sistema robótico autônomo para detecção de doenças em ambiente agrícola

Fonte: Rithani et al. (2024)

A Figura 8 apresenta a simulação do sistema robótico autônomo em ambiente agrícola, evidenciando a navegação da plataforma e a aquisição visual de dados para detecção de doenças em plantas.

#### **4.1.6 Autonomous Robot for Field Health Indication and Crop Monitoring System using Artificial Intelligence**

O trabalho de Pandiaraj et al. (2022) propõe um robô agrícola multifuncional para monitoramento de lavouras e indicação da condição do campo, integrando sensores de umidade do solo, temperatura, presença, fogo e obstáculos, além de uma câmera para transmissão de imagens. A proposta também incorpora funcionalidades de pulverização de água e pesticidas, assim como envio de informações ao produtor por meio de aplicativo. Diferentemente dos artigos centrados em robôs quadrúpedes,

este estudo representa uma abordagem mais ampla de automação agrícola baseada em sensores e em inteligência artificial. Sua contribuição principal está em evidenciar a tendência de integração entre diferentes módulos de sensoriamento e atuação em uma única plataforma de monitoramento. Ainda assim, trata-se de um sistema de menor sofisticação mecânica e com escopo mais geral, o que o posiciona como um estudo de apoio importante para compreender a digitalização do campo, mas não como exemplo central de arquitetura quadrúpede.

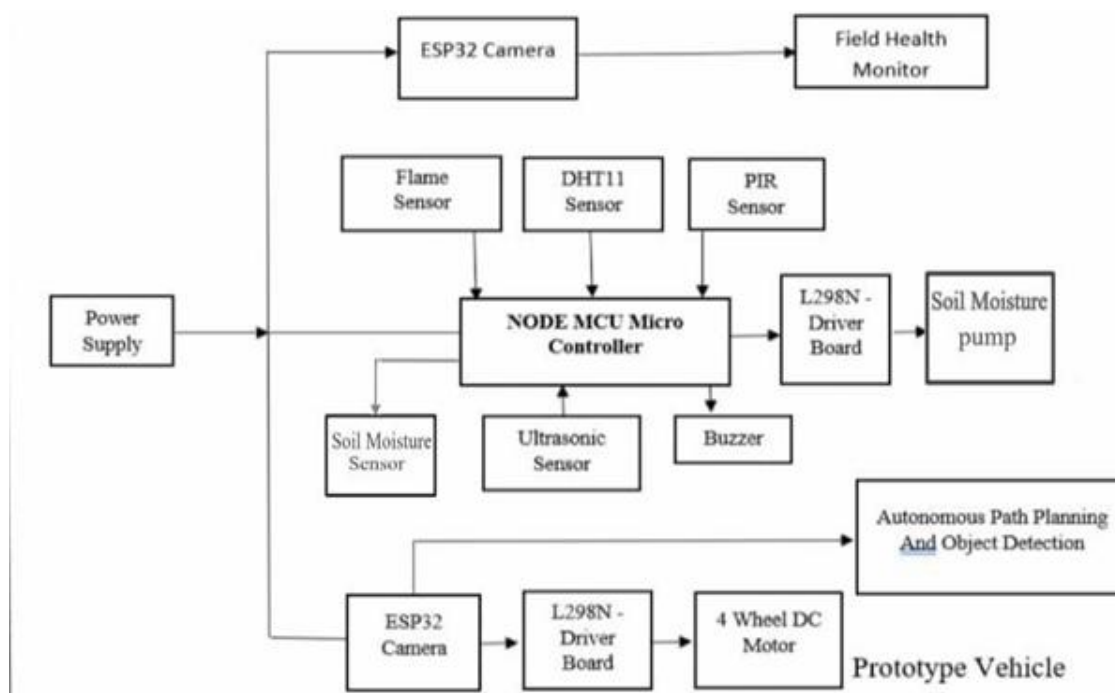


Figura 9: Diagrama de blocos do sistema robótico multifuncional para monitoramento agrícola

Fonte: Pandiaraj et al. (2022)

A Figura 9 apresenta a arquitetura do sistema robótico multifuncional proposto por Pandiaraj et al. (2022), evidenciando a integração entre sensores, módulo de controle, monitoramento do campo e funcionalidades de atuação automatizada.

#### 4.1.7 A comprehensive review of path planning for agricultural ground robots

A revisão conduzida por Chakraborty et al. (2022) reúne e organiza diferentes abordagens de planejamento de caminho para robôs terrestres aplicados à agricultura. O estudo discute temas como navegação ponto a ponto, cobertura de área, localização, mapeamento e controle de movimento, argumentando que o planejamento de trajetórias constitui uma das etapas mais críticas no desenvolvimento

de plataformas agrícolas autônomas. Embora o trabalho não se restrinja a robôs quadrúpedes, ele é particularmente relevante para esta revisão por oferecer uma visão consolidada do estado da arte em navegação de robôs terrestres, permitindo situar as propostas mais recentes em um contexto mais amplo de desafios e soluções algorítmicas. Além disso, os autores destacam que a navegação autônoma em ambientes agrícolas depende da articulação entre sistemas de guiamento, percepção do ambiente e definição de rotas seguras e eficientes, o que reforça a centralidade do planejamento de caminho para aplicações de agricultura de precisão. Essa organização conceitual pode ser mais bem compreendida por meio da Figura 10, que apresenta uma visão geral dos sistemas de guiamento utilizados em veículos terrestres automáticos, distinguindo estratégias baseadas em posicionamento local e global. Como limitação típica de artigos de revisão, não apresenta validação experimental própria, mas compensa isso ao oferecer um panorama útil para interpretação dos estudos empíricos selecionados.

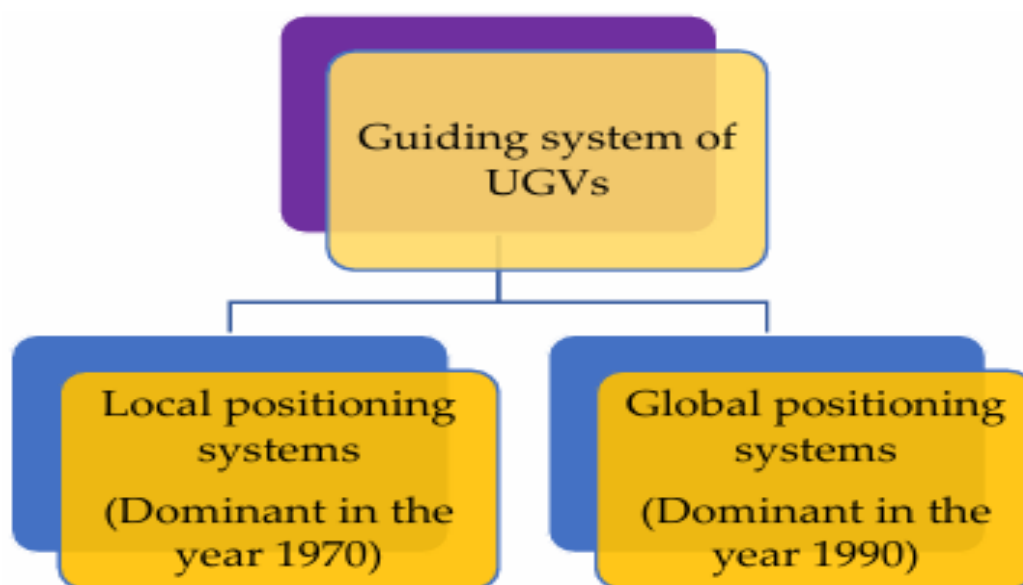


Figura 10: Sistema de guiamento de veículos terrestres automáticos aplicados à agricultura

Fonte: Chakraborty et al. (2022)

#### **4.1.8 Monitoring agricultural fields through collaboration between autonomous robots and drones**

O artigo de Ciacco et al. (2025) aborda a colaboração entre robôs terrestres autônomos e drones no monitoramento de campos agrícolas, propondo um modelo de otimização baseado em programação linear inteira mista. O estudo considera um cenário em que sensores distribuídos no solo coletam dados do ambiente, enquanto um robô terrestre e um drone assumem papéis complementares: o robô é responsável por fertilização e o drone por irrigação. A proposta visa minimizar custos operacionais, considerando restrições energéticas e aspectos de roteamento. A principal contribuição do artigo está em explicitar como a cooperação entre plataformas distintas pode ser organizada de maneira estratégica dentro da agricultura de precisão. Entretanto, seu foco está mais na modelagem e otimização de operações do que na validação prática em larga escala, o que indica a necessidade de estudos futuros em ambientes reais.

#### **4.1.9 Intelligent Multi-agent Systems for UAV-UGV Path Optimization via Reflective Evolution**

Por fim, Chen et al. (2024) investigam a integração entre UAVs e UGVs por meio de um sistema multiagente voltado à otimização de rotas em agricultura de precisão. O estudo propõe uma arquitetura em que UAVs capturam imagens de pomares e um modelo de visão multimodal identifica a localização e o estado dos frutos; essas informações são então encaminhadas a um modelo de otimização, responsável por planejar trajetórias eficientes para os veículos terrestres. Os autores destacam que a abordagem pode melhorar a eficiência das operações agrícolas e reduzir custos de trabalho, combinando processamento visual, coordenação entre agentes e planejamento automático. Trata-se, contudo, de uma proposta ainda fortemente apoiada em modelagem computacional e experimentação controlada, o que recomenda cautela na interpretação de seus resultados. Ainda assim, o estudo é relevante por representar uma direção promissora para a integração entre sensoriamento aéreo e ação terrestre.

De maneira geral, os estudos selecionados mostram que a robótica aplicada ao setor agrícola tem avançado em três frentes principais: a robustez locomotora de plataformas terrestres em ambientes irregulares, a incorporação de visão computacional e aprendizado profundo ao monitoramento de culturas, e a integração entre diferentes plataformas para ampliar a eficiência da navegação e da coleta de dados. Ao mesmo tempo, a análise descritiva evidencia que grande parte das soluções ainda se encontra em estágios intermediários de maturidade tecnológica, com limitações relacionadas à validação em campo, à precisão dos modelos de percepção e à escalabilidade das propostas. Esses aspectos serão aprofundados nas subseções seguintes, por meio da comparação estruturada dos artigos e da discussão orientada pelas questões de pesquisa.

## **4.2 Comparação estruturada dos artigos**

Após a apresentação descritiva dos estudos selecionados, torna-se necessário organizar as informações de forma sistemática, a fim de facilitar a comparação entre os artigos e evidenciar padrões presentes no portfólio analisado. Para isso, foi elaborado um quadro comparativo contendo as principais características de cada trabalho, tais como o tipo de estudo, a plataforma robótica empregada, o ambiente ou cultura analisada, os sensores e técnicas utilizados, a questão de pesquisa mais diretamente relacionada, a principal contribuição do estudo e suas limitações. Essa organização permite visualizar de maneira mais objetiva como a literatura recente tem abordado a robótica terrestre e quadrúpede no setor agrícola, bem como identificar convergências e lacunas entre os estudos.

O quadro comparativo também auxilia na compreensão de que os artigos selecionados não se distribuem de maneira homogênea entre as questões de pesquisa. Alguns estudos concentram-se mais fortemente na locomoção e navegação autônoma, outros enfatizam aplicações de visão computacional e aprendizado profundo para o monitoramento de culturas, enquanto um terceiro grupo destaca a integração entre plataformas aéreas e terrestres na agricultura de precisão. Assim, a comparação estruturada dos artigos constitui uma etapa intermediária fundamental entre a descrição individual dos trabalhos e a análise orientada pelas questões de pesquisa.

<b>Artigo</b>	<b>Tipo de Estudo</b>	<b>Plataforma robótica</b>	<b>Cultura/ambiente</b>	<b>Sensores/técnicas empregadas</b>	<b>QP relacionada</b>	<b>Principal contribuição</b>	<b>Limitação</b>
Morlando et al. (2023)	Simulação	Robô quadrúpede	Terrenos severos e de baixa trafegabilidade	Forças de reação do solo; campos potenciais artificiais; navegação adaptativa	QP1	Propõe estratégia de navegação para quadrúpedes em superfícies instáveis	Validação restrita à simulação
Arachchige et al. (2025)	Experimental	Robô quadrúpede macio	Terrenos planos e irregulares	Modelagem cinemática e dinâmica; locomoção troteante; atuação pneumática	QP1	Demonstra viabilidade de locomoção troteante estável e eficiente	Não se aplica diretamente a uma cultura agrícola específica
Milburn et al. (2023)	Experimental	Robô quadrúpede HyQReal	Vinhedo	Visão computacional; RGB-D; geração de waypoints em tempo real	QP1	Valida o uso de quadrúpede para navegação autônoma em vinhedos	Necessidade de melhorar a precisão da detecção das videiras
He et al. (2024)	Experimental	Robô terrestre de fenotipagem	Tomateiro em campo	Câmera estéreo; dados sintéticos; adaptação de domínio;	QP2	Quantifica automaticamente a severidade de	Aplicação focada em cultura e

				segmentação semântica		doenças em tomateiros	problema específicos
Rithani et al. (2024)	Experimental em ambiente simulado	Robô terrestre autônomo	Fazenda simulada	ROS; câmera embarcada; YOLOv8	QP2	Integra navegação autônoma com detecção de doenças em tempo real	Resultados obtidos em ambiente controlado
Pandiaraj et al. (2022)	Experimental	Robô agrícola multifuncional	Campo agrícola	Sensores de umidade, temperatura, fogo, presença e obstáculos; câmera; IA	QP1 / QP2	Integra múltiplos sensores em uma plataforma de monitoramento agrícola	Plataforma menos sofisticada e não centrada em arquitetura quadrúpede
Chakraborty et al. (2022)	Revisão	Robôs terrestres agrícolas	Agricultura em geral	Planejamento de caminho; cobertura de área; localização; mapeamento	QP1	Sistematiza abordagens de navegação para robôs terrestres agrícolas	Não apresenta validação experimental própria
Ciacco et al. (2025)	Modelagem / otimização	UGV + UAV	Campo agrícola	Sensores distribuídos; programação linear inteira mista;	QP3	Explora a colaboração entre robôs terrestres e	Ênfase maior em modelagem do que em

				roteamento cooperativo		drones em operações agrícolas	validação prática
Chen et al. (2024)	Modelagem / preprint	UAV + UGV	Pomar agricultura de precisão	Visão multimodal; sistema multiagente; otimização de rotas	QP3	Propõe cooperação entre UAVs e UGVs para identificação e planejamento de trajetórias	Forte dependência de modelagem computacional e validação ainda limitada

Quadro 1 Síntese Comparativa dos Artigos Selecionados.

Fonte: A autora

A partir do quadro 1, observa-se que a maior parte dos estudos se concentra em três eixos principais: mobilidade e navegação de plataformas terrestres, aplicação de visão computacional e aprendizado profundo ao monitoramento agrícola e integração entre sistemas aéreos e terrestres. Também se percebe que os artigos variam quanto ao grau de maturidade tecnológica, coexistindo propostas validadas em campo, experimentos em ambientes simulados e estudos de modelagem ou revisão. Essa diversidade reforça a necessidade de uma análise orientada pelas questões de pesquisa, pois somente a comparação descritiva não é suficiente para evidenciar, de maneira aprofundada, quais soluções predominam e quais limitações ainda impedem a adoção mais ampla dessas tecnologias no setor agrícola.

### **4.3 Questões de pesquisa**

Após a apresentação descritiva e a comparação estruturada dos estudos selecionados, esta subseção discute os resultados à luz das questões de pesquisa estabelecidas neste trabalho. O objetivo, neste ponto, é interpretar o conjunto dos nove artigos de forma articulada, buscando identificar quais respostas a literatura já oferece sobre o uso de robôs quadrúpedes e sistemas robóticos terrestres no setor agrícola e, ao mesmo tempo, evidenciar limites e lacunas ainda presentes nas pesquisas analisadas. Em vez de tratar cada artigo de forma isolada, a discussão a seguir organiza os estudos em torno dos três eixos definidos previamente: arquiteturas de locomoção e sensoriamento, aplicação de visão computacional e aprendizado profundo, e integração entre plataformas aéreas e terrestres.

#### **4.3.1 QP1 – Quais são as arquiteturas de locomoção e sensores predominantes em robôs quadrúpedes aplicados ao monitoramento agrícola?**

A análise dos estudos selecionados indica que, entre as arquiteturas de locomoção, há predominância de plataformas terrestres voltadas à adaptação a terrenos irregulares, com destaque para robôs quadrúpedes quando o ambiente de operação exige maior capacidade de transposição de obstáculos e ajuste fino da

postura locomotora. No trabalho de Morlando et al. (2023), por exemplo, a navegação do quadrúpede é guiada por informações derivadas da interação do próprio robô com o solo, por meio das forças de reação nos apoios, evidenciando uma arquitetura de locomoção orientada à estabilidade em superfícies de baixa tráfegabilidade. Já Arachchige et al. (2025) demonstram que a locomoção troteante em um quadrúpede macio pode ser obtida de forma dinamicamente estável, inclusive em terrenos planos e irregulares, o que reforça que o deslocamento por pernas permanece como uma solução promissora para cenários não estruturados.

No contexto agrícola propriamente dito, o estudo de Milburn et al. (2023) mostra que a escolha do robô quadrúpede HyQReal está relacionada à necessidade de operar em vinhedos, ambiente em que mobilidade lateral, deslocamento entre fileiras e aproximação cuidadosa das plantas são fatores críticos. Os autores destacam que a plataforma permite movimentos laterais, para frente e para trás, favorecendo a geração e o seguimento de waypoints em tarefas associadas à poda. Esse resultado sugere que, quando a aplicação envolve deslocamento em ambiente agrícola complexo e interação próxima com a cultura, os quadrúpedes tendem a oferecer vantagens sobre plataformas mais convencionais, especialmente pela capacidade de adaptação ao terreno e pela flexibilidade de posicionamento.

No que se refere ao sensoriamento, os artigos apontam predominância de sistemas visuais, especialmente câmeras RGB e RGB-D, frequentemente integradas a algoritmos de visão computacional para percepção do ambiente e tomada de decisão. Em Milburn et al. (2023), a navegação é baseada em câmera RGB-D e processamento visual para detecção de videiras e geração de waypoints. Em He et al. (2024), a aquisição de imagens é realizada por um sistema estéreo embarcado em robô terrestre, o que permite observar lateralmente a planta em condições de campo. Já Pandiaraj et al. (2022) ampliam essa lógica ao integrar, além da câmera, sensores de umidade do solo, temperatura, presença, fogo e obstáculos, compondo uma plataforma de monitoramento multifuncional. Assim, embora a arquitetura locomotora varie entre quadrúpedes e outras plataformas terrestres, os sensores visuais aparecem como núcleo predominante de percepção, frequentemente complementados por sensores ambientais e de posicionamento.

A revisão de Chakraborty et al. (2022) reforça esse entendimento ao mostrar que a navegação autônoma de robôs terrestres agrícolas depende da integração entre localização, planejamento de rota, controle de movimento e mapeamento. Isso

significa que a arquitetura robótica predominante não pode ser compreendida apenas em termos mecânicos, mas como uma combinação entre locomoção física e percepção computacional do ambiente. Desse modo, a resposta à QP1 indica que as arquiteturas mais recorrentes na literatura analisada combinam mobilidade terrestre adaptativa — com destaque para quadrúpedes em ambientes mais desafiadores — e sensoriamento fortemente baseado em visão computacional, apoiado, em alguns casos, por sensores ambientais adicionais.

#### **4.3.2 QP2 – Como a visão computacional e o aprendizado profundo (Deep Learning) são empregados no monitoramento fitossanitário e na identificação de doenças em culturas agrícolas?**

A análise dos artigos selecionados mostra que a visão computacional e o aprendizado profundo são empregados, sobretudo, para reconhecimento de padrões visuais em plantas, identificação de sintomas, classificação de doenças e monitoramento fitossanitário em diferentes contextos agrícolas. Os estudos analisados demonstram a utilização de técnicas de segmentação semântica, detecção de objetos e aprendizado profundo para automatizar tarefas de inspeção e monitoramento, contribuindo para aumentar a eficiência das atividades agrícolas e reduzir a dependência de avaliações manuais.

O caso mais consistente dentro do portfólio analisado é o de He et al. (2024), no qual um robô terrestre equipado com câmera estéreo coleta imagens em campo, integrando dados reais e sintéticos a um modelo de segmentação semântica com adaptação de domínio não supervisionada. Nesse estudo, a inteligência artificial não é utilizada apenas para identificar a presença de doenças, mas também para quantificar sua severidade com base na proporção da área afetada, fornecendo informações mais detalhadas para o monitoramento agrícola.

Outro exemplo relevante é apresentado por Rithani et al. (2024), que empregam o modelo YOLOv8 em um sistema robótico autônomo destinado à detecção de doenças em plantas. Nesse caso, o aprendizado profundo atua como mecanismo de identificação visual em tempo real, integrado à navegação do robô. Embora os experimentos tenham sido realizados em ambiente controlado, o estudo evidencia uma tendência importante da literatura: a integração entre mobilidade

robótica e modelos modernos de visão computacional, permitindo que o processo de inspeção agrícola seja realizado de forma automatizada.

Os estudos analisados também demonstram que as aplicações de visão computacional não se restringem à identificação de doenças. Em diversos cenários, essas técnicas são empregadas para reconhecimento de estruturas vegetais, navegação autônoma, geração de trajetórias e apoio à tomada de decisão em sistemas robóticos agrícolas. Esse resultado evidencia que a visão computacional vem assumindo um papel central não apenas no monitoramento fitossanitário, mas também na percepção do ambiente e na autonomia operacional das plataformas robóticas.

Além disso, observa-se que os avanços recentes em aprendizado profundo têm ampliado a capacidade dos sistemas agrícolas inteligentes de processar grandes volumes de dados visuais, permitindo maior precisão na identificação de padrões e anomalias. A utilização conjunta de sensores embarcados, algoritmos de visão computacional e modelos de inteligência artificial favorece a obtenção de informações relevantes para o acompanhamento da saúde das culturas e para o suporte à tomada de decisão no campo.

Dessa forma, a resposta à QP2 indica que a visão computacional e o aprendizado profundo vêm sendo aplicados principalmente por meio de modelos de detecção, classificação e segmentação de imagens, integrados a plataformas robóticas capazes de realizar monitoramento agrícola de forma automatizada. Os estudos analisados evidenciam avanços significativos na identificação de doenças, no reconhecimento de padrões visuais e na coleta inteligente de dados em campo. Apesar dos avanços observados, ainda existem desafios relacionados à validação em ambientes reais, à robustez dos modelos frente às variações do ambiente agrícola e à ampliação dessas soluções para diferentes culturas e condições de operação.

#### **4.3.3 QP3 – De que forma a integração entre sistemas aéreos (UAV) e terrestres (UGV) otimiza a navegação autônoma e a coleta de dados em campo?**

Os estudos analisados sugerem que a integração entre sistemas aéreos e terrestres tende a otimizar a operação agrícola por meio da complementaridade funcional entre as plataformas. Em termos gerais, os UAVs contribuem com visão

ampla, rapidez de cobertura e aquisição de dados em escala de área, enquanto os UGVs e demais robôs terrestres oferecem observação próxima, maior detalhamento e capacidade de atuação localizada. Essa lógica aparece de forma clara em Ciacco et al. (2025), cujo modelo propõe uma cooperação entre robô terrestre e drone em tarefas como monitoramento, fertilização e irrigação, com o objetivo de reduzir custos operacionais e melhorar a alocação das atividades no campo. Embora a proposta esteja mais centrada em modelagem e otimização do que em validação prática, ela mostra que a integração UAV-UGV pode ser pensada como estratégia de distribuição inteligente de funções no ambiente agrícola.

Em Chen et al. (2024), essa complementaridade aparece de outra forma: os UAVs capturam imagens de árvores frutíferas e as encaminham a um sistema multiagente de visão e otimização, responsável por determinar trajetórias eficientes para os veículos terrestres. Nesse caso, a contribuição dos sistemas aéreos está na obtenção prévia de informação espacial e visual em escala mais ampla, enquanto os UGVs assumem a execução da tarefa física no ambiente. O estudo evidencia que a integração pode melhorar o planejamento de rota e a eficiência das operações, especialmente quando o robô terrestre precisa atuar de forma orientada por dados previamente levantados do alto. No entanto, como se trata de um preprint e de uma proposta ainda fortemente baseada em modelagem computacional, os resultados devem ser interpretados com cautela.

A literatura analisada também permite compreender que a integração UAV-UGV não significa apenas uso simultâneo de duas plataformas, mas uma articulação entre escalas distintas de percepção. Os sistemas aéreos tendem a fornecer dados panorâmicos e de mapeamento, úteis para identificar padrões gerais, localizar alvos ou planejar rotas, enquanto os sistemas terrestres complementam essa visão com dados mais detalhados, capturados em proximidade com a planta e com maior resolução local. Essa complementaridade é coerente com o argumento de que robôs terrestres são mais adequados para tarefas que exigem observação lateral, navegação em proximidade e interação com o ambiente, enquanto drones se destacam pela rapidez e alcance na cobertura de área.

Assim, a resposta à QP3 é que a integração entre UAVs e UGVs pode otimizar tanto a navegação autônoma quanto a coleta de dados ao combinar cobertura ampla e aquisição localizada de informação. Os artigos analisados mostram que essa cooperação pode apoiar o roteamento, a inspeção e a divisão de tarefas no campo.

Contudo, a literatura selecionada também indica que esse tipo de integração ainda se encontra, em boa medida, em estágios de proposição, modelagem ou experimentação controlada. Portanto, embora o potencial seja elevado, ainda são necessários avanços em validação prática, robustez de comunicação entre plataformas e adaptação a condições reais de operação agrícola.

#### **4.4 Síntese dos resultados e discussão geral**

A análise integrada dos estudos selecionados permite observar que a robótica aplicada ao setor agrícola vem se consolidando como um campo multidisciplinar, no qual avanços em mecânica, sensoriamento, inteligência artificial e navegação autônoma convergem para ampliar a automação de tarefas em campo. No conjunto dos nove artigos analisados, percebe-se que os robôs quadrúpedes ocupam uma posição de destaque quando a aplicação exige mobilidade em terrenos irregulares, capacidade de adaptação a superfícies não estruturadas e aproximação precisa às plantas. Ao mesmo tempo, os estudos também mostram que nem toda a evolução da robótica agrícola está restrita a plataformas quadrúpedes, sendo frequente a presença de robôs terrestres mais gerais, sistemas multiagentes e arquiteturas híbridas com UAVs, o que evidencia um ecossistema tecnológico mais amplo e complementar.

No que se refere às arquiteturas de locomoção e sensoriamento, verificou-se que a literatura ainda não aponta para um modelo único ou dominante, mas sim para soluções adaptadas à natureza do ambiente e da tarefa. Os robôs quadrúpedes aparecem como alternativa promissora em cenários de maior complexidade locomotora, como vinhedos, terrenos acidentados ou superfícies de baixa trafegabilidade, enquanto outras plataformas terrestres se mostram viáveis em aplicações de monitoramento e aquisição de dados em áreas menos desafiadoras.

Em relação aos sensores, há clara predominância de sistemas visuais, especialmente câmeras RGB, RGB-D e sistemas estereoscópicos, frequentemente combinados com algoritmos de visão computacional e, em alguns casos, complementados por sensores ambientais. Esse resultado sugere que, embora a mecânica da locomoção seja essencial para o desempenho físico da plataforma, é a percepção computacional que vem desempenhando papel central na operacionalização das tarefas agrícolas automatizadas.

A discussão sobre visão computacional e aprendizado profundo evidenciou que a aplicação dessas técnicas já alcança um nível mais consistente em algumas culturas específicas, como o tomate. O estudo de He et al. mostrou que a combinação entre robótica terrestre, dados sintéticos e segmentação semântica permite quantificar a severidade de doenças em condições de campo, o que representa um avanço importante no monitoramento fitossanitário automatizado. Em contraste, no caso das videiras, os estudos analisados apontaram maior maturidade em aplicações voltadas à detecção de estruturas vegetais, cachos e elementos do ambiente para fins de navegação e manejo, mas não apresentaram, com a mesma consistência, sistemas embarcados dedicados à detecção de patógenos. Esse desequilíbrio entre culturas revela que o avanço das técnicas de aprendizado profundo no setor agrícola não ocorre de forma uniforme, estando condicionado tanto à disponibilidade de dados quanto à especificidade dos problemas tratados.

Outro ponto importante observado ao longo da análise é que boa parte das propostas ainda se encontra em estágios intermediários de maturidade tecnológica. Embora existam trabalhos com validação experimental em campo, como os de Milburn et al. e He et al., uma parcela significativa da literatura ainda está apoiada em simulação, modelagem ou ambientes controlados. Isso não reduz a relevância científica desses estudos, mas impõe cautela quanto à generalização imediata de seus resultados para cenários reais de produção agrícola. Em outras palavras, a literatura mostra avanços importantes em concepção, teste e prova de viabilidade, mas ainda há uma distância entre o desempenho demonstrado em condições experimentais e a adoção mais ampla dessas tecnologias em contextos produtivos reais.

A integração entre sistemas aéreos e terrestres desponta como uma das direções mais promissoras observadas no portfólio analisado. Os estudos de Ciacco et al. e Chen et al. evidenciam que a cooperação entre UAVs e UGVs pode otimizar a navegação autônoma, o monitoramento e a coleta de dados ao combinar a visão ampla das plataformas aéreas com a capacidade de observação detalhada e atuação localizada dos sistemas terrestres. Ainda assim, os trabalhos também indicam que essa integração permanece, em grande medida, em fase de desenvolvimento conceitual e experimental, carecendo de validações mais robustas em ambientes reais e de soluções mais maduras para comunicação, sincronização e compartilhamento de informações entre plataformas.

De modo geral, os resultados desta revisão mostram que o campo da robótica agrícola vem avançando de maneira significativa, mas ainda apresenta lacunas importantes. Entre elas, destacam-se a necessidade de maior validação em campo, o aprimoramento da precisão de sistemas de percepção visual, o aumento da robustez da navegação em ambientes dinâmicos e a ampliação de estudos que integrem, de forma prática, sistemas terrestres e aéreos. Também se observa que a literatura ainda é mais abundante em soluções de monitoramento, navegação e detecção do que em sistemas plenamente consolidados para atuação autônoma contínua em lavouras reais.

Em síntese, a literatura analisada demonstra que a robótica agrícola vem evoluindo para soluções cada vez mais autônomas e integradas, capazes de apoiar atividades de monitoramento, inspeção e tomada de decisão no campo. Os estudos evidenciam avanços importantes na combinação entre mobilidade robótica, sensoriamento e inteligência artificial, ampliando as possibilidades de aplicação dessas tecnologias em diferentes cenários agrícolas. No entanto, permanecem desafios relacionados à escalabilidade das soluções, à adaptação a diferentes condições de cultivo e à ampliação de validações em ambientes reais. Nesse contexto, observa-se a necessidade de pesquisas que contribuam para aproximar os avanços tecnológicos das demandas operacionais do setor agrícola, favorecendo a adoção prática dessas soluções.

## 5 CONCLUSÃO

A presente revisão sistemática teve como objetivo analisar, à luz da literatura recente, o uso de robôs quadrúpedes e sistemas robóticos terrestres no setor agrícola, com ênfase em aspectos relacionados à locomoção, ao sensoriamento, à visão computacional, ao aprendizado profundo e à integração entre plataformas robóticas.

Ao longo do estudo, verificou-se que essas tecnologias apresentam potencial relevante para ampliar a automação no campo, especialmente em cenários que exigem mobilidade em terrenos irregulares, monitoramento detalhado das culturas e apoio à tomada de decisão baseada em dados. Nesse contexto, a adoção de plataformas mais adaptáveis ao ambiente agrícola representa um avanço importante para aplicações em condições de maior complexidade operacional.

No que se refere à primeira questão de pesquisa, os estudos analisados mostraram que as arquiteturas de locomoção e sensoriamento mais recorrentes combinam mobilidade terrestre adaptativa e forte dependência de sistemas visuais. Os robôs quadrúpedes se destacam principalmente em ambientes de maior irregularidade, nos quais estabilidade, flexibilidade de movimento e capacidade de aproximação às plantas são fatores determinantes. Em paralelo, os sensores mais frequentemente empregados foram câmeras RGB, RGB-D e sistemas estereoscópicos, muitas vezes associados a algoritmos de percepção e navegação. Esse resultado evidencia que o desempenho dessas plataformas depende não apenas de sua estrutura mecânica, mas também da integração eficiente entre locomoção e percepção computacional do ambiente.

Em relação à segunda questão de pesquisa, observou-se que a visão computacional e o aprendizado profundo vêm sendo aplicados de maneira mais consistente em tarefas de monitoramento visual, detecção de estruturas vegetais e quantificação de sintomas em plantas. Nos estudos voltados ao tomate, verificou-se maior maturidade no uso de segmentação semântica, dados sintéticos e adaptação de domínio para quantificação da severidade de doenças em condições de campo. No caso das videiras, por outro lado, os trabalhos selecionados mostraram aplicações mais fortemente concentradas em navegação autônoma, detecção de cachos e identificação de elementos do ambiente, sem a mesma ênfase em detecção de patógenos. Assim, conclui-se que o emprego de técnicas de aprendizado profundo na

agricultura já apresenta resultados relevantes, embora ainda de forma desigual entre diferentes culturas e objetivos de aplicação.

Quanto à terceira questão de pesquisa, a literatura analisada indicou que a integração entre sistemas aéreos e terrestres pode otimizar a navegação autônoma e a coleta de dados ao explorar a complementaridade entre as plataformas. Enquanto os UAVs se mostram eficientes para cobertura de grandes áreas e obtenção de visão panorâmica do ambiente, os UGVs e robôs terrestres oferecem maior proximidade com a planta, detalhamento local e possibilidade de atuação direcionada. Os estudos examinados sugerem que essa cooperação pode contribuir para planejamento de rotas, monitoramento e distribuição mais eficiente de tarefas no campo. No entanto, também ficou evidente que boa parte dessas propostas ainda se encontra em fases de modelagem, prototipagem ou validação controlada, demandando avanços para aplicação mais robusta em cenários reais.

De maneira geral, os resultados desta revisão evidenciam que a robótica aplicada ao setor agrícola vem avançando de forma significativa, especialmente na convergência entre mobilidade autônoma, sensoriamento visual e análise inteligente de dados. Ainda assim, permanecem desafios relevantes, como a necessidade de validação em campo em larga escala, o aprimoramento da precisão dos sistemas de percepção, a robustez da navegação em ambientes dinâmicos e a redução dos custos de implementação. Também se observa que, embora a literatura já apresente soluções promissoras, muitas delas ainda estão em estágios intermediários de maturidade tecnológica, o que limita sua adoção mais ampla no contexto produtivo.

Como sugestões para trabalhos futuros, recomenda-se o desenvolvimento de estudos voltados à validação de plataformas quadrúpedes em diferentes culturas e condições reais de campo, bem como o aprofundamento de pesquisas sobre integração entre sensoriamento terrestre e aéreo. Além disso, investigações que explorem maior autonomia energética, processamento local de dados e ampliação de bases de imagens para treinamento de modelos de inteligência artificial tendem a contribuir para o avanço prático dessas tecnologias. Também se mostra pertinente ampliar o número de estudos dedicados especificamente à detecção de patógenos em diferentes culturas por meio de plataformas robóticas terrestres, de forma a reduzir a lacuna ainda observada entre os avanços técnicos da computação e a aplicação consolidada dessas soluções no ambiente agrícola.

Por fim, conclui-se que os robôs quadrúpedes e os sistemas robóticos terrestres representam uma área promissora para o desenvolvimento da agricultura de precisão, sobretudo quando associados à visão computacional, ao aprendizado profundo e à navegação inteligente. Embora ainda existam limitações técnicas e operacionais a serem superadas, a literatura analisada demonstra que essas tecnologias possuem potencial concreto para contribuir com a automação, o monitoramento e a modernização do setor agrícola, configurando-se como um campo fértil para novas pesquisas e futuras aplicações práticas.

## REFERÊNCIAS

- ARACHCHIGE, Dimuthu D. K. *et al.* **Efficient Trotting of Soft Robotic Quadrupeds.** IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, [S. l.], v. 22, 2025.
- BELOEV, Ivan *et al.* **Robô autônomo movido por inteligência artificial para agricultura de precisão.** Acta Technologica Agriculturae, [S. l.], v. 24, n. 1, p. 30-36, 2021. DOI: 10.2478/ata-2021-00008.
- OYLE, Anthony *et al.* **Estrutura Acessível para Automação em Agricultura de Precisão Aproveitando o SPOT da Boston Dynamics.** In: CONFERÊNCIA DE TECNOLOGIA DE PESQUISA DE GRADUAÇÃO IEEE MIT (URTC), 2023. DOI: 10.1109/URTC60662.2023.10534979.
- CHAKRABORTY, Suprava *et al.* **A comprehensive review of path planning for agricultural ground robots.** *Sustainability*, v. 14, n. 9156, 2022.
- CHATZISAVVAS, Antonios; LOUTA, Malamati; DASYGENIS, Minas. **Planejamento de Caminhos para Robôs Agrícolas de Solo - Análise.** In: ANAIS DA CONFERÊNCIA AIP, 2023. DOI: 10.1063/5.0182484.
- CHEN, Yijie *et al.* **Intelligent Multi-agent Systems for UAV-UGV Path Optimization via Reflective Evolution.** [Preprint], 2024.
- CIACCO, Alessia *et al.* **Monitoring agricultural fields through collaboration between autonomous robots and drones.** In: IEEE CONFERENCE ON TECHNOLOGIES FOR SUSTAINABILITY (SUSTECH), 2025. Anais [...]. IEEE, 2025. DOI: 10.1109/SusTech63138.2025.11025538.
- FERREIRA, Maria Vitória Santos. **Integração de Tecnologias na Agricultura de Precisão: Otimização e Sustentabilidade na Produção Agrícola.** 2024. 37 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Agronomia) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sertão Pernambucano, Petrolina, 2025.
- GHOBADPOUR, Amin *et al.* **Off-Road Electric Vehicles and Autonomous Robots in Agricultural Sector: Trends, Challenges, and Opportunities.** *Vehicles*, [S. l.], v. 4, n. 3, p. 843-864, 2022.
- GIL, Gustavo *et al.* **Por que a baixa adoção da robótica nas fazendas? Desafios para o estabelecimento de robôs agrícolas comerciais.** *Smart Agricultural Technology*, [S. l.], v. 3, 100069, 2023. DOI: 10.1016/j.atech.2022.100069.

HE, Weilong et al. **High-throughput robotic phenotyping for quantifying tomato disease severity enabled by synthetic data and domain-adaptive semantic segmentation**. *Journal of Field Robotics*, [s. l.], v. 42, n. 3, p. 657-678, mar. 2025.

MAKAM, Swetha et al. **Unmanned aerial vehicles (UAVs): an adoptable technology for precise and smart farming**. *Discover Internet of Things*, [s. l.], v. 4, n. 25, 2024.

MANCINI, Mauro *et al.* **Controle Adaptativo em Modo Deslizante com Campo de Potencial Artificial para Robôs Terrestres em Agricultura de Precisão**. In: WORKSHOP INTERNACIONAL IEEE SOBRE METROLOGIA PARA AGRICULTURA E FLORESTA (METROAGRIFOR), 2023. DOI: 10.1109/MetroAgriFor58484.2023.10424132.

MILBURN, Lee et al. **Computer-Vision Based Real Time Waypoint Generation for Autonomous Vineyard Navigation with Quadraped Robots**. In: 2023 IEEE International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions (ICARSC). Tomar: IEEE, 2023. p. 1-6. DOI: 10.1109/ICARSC58346.2023.10129563.

MORLANDO, Viviana; CACACE, Jonathan; RUGGIERO, Fabio. Online Feet Potential Fields for **Quadraped Robots Navigation in Harsh Terrains**. *Robotics*, [S. l.], v. 12, n. 86, 2023. DOI: 10.3390/robotics12030086.

PANDIARAJ, K. *et al.* **Autonomous Robot for Field Health Indication and Crop Monitoring System using Artificial Intelligence**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCE COMPUTING AND INNOVATIVE TECHNOLOGIES IN ENGINEERING (ICACITE), 2g., 2022. Anais [...]. IEEE, 2022. DOI: 10.1109/ICACITE53722.2022.9823450.

RITHANI, M. *et al.* **Crop Disease Detection with Autonomous Robotic Systems**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE FOR WOMEN IN COMPUTING (INCOWOCO), 1. 2024. Anais [...]. IEEE, 2024. DOI: 10.1109/INCOWOCO64194.2024.10863229.

SANTOS, Denise Irlaine et al. **Trabalho Acadêmico Integrador II: Robô Automato Quadrúpede**. Arcos: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais (IFMG), 2018. 30 p. Relatório técnico final.

VÉLEZ, Sergio et al. **Framework for smartphone-based grape detection and vineyard management using UAV-trained AI**. Heliyon, [s. l.], v. 11, n. 2, e42525, fev. 2025.