

TECNOLOGIAS INOVADORAS NO CAMPO

SUSTENTABILIDADE,
DIGITALIZAÇÃO E FUTURO
DA PRODUÇÃO



Organizadores

CARLA MICHELLE DA SILVA
TALYS MORATTI LEMOS DE OLIVEIRA
KEITHY JULIANE DE OLIVEIRA
AIRTON KLEBER GOMES MATOS
ANTÔNIO VEIMAR DA SILVA

TECNOLOGIAS INOVADORAS NO CAMPO

**SUSTENTABILIDADE,
DIGITALIZAÇÃO E FUTURO
DA PRODUÇÃO**



Organizadores

**CARLA MICHELLE DA SILVA
TALYS MORATTI LEMOS DE OLIVEIRA
KEITHY JULIANE DE OLIVEIRA
AIRTON KLEBER GOMES MATOS
ANTÔNIO VEIMAR DA SILVA**

© 2026 – Editora MultiAtual

www.editoramultiatual.com.br

editoramultiatual@gmail.com

Organizadores

Carla Michelle da Silva

Talys Moratti Lemos de Oliveira

Keithy Juliane de Oliveira

Airton Kleber Gomes Matos

Antônio Veimar da Silva

Editor Chefe: Jader Luís da Silveira

Editoração e Arte: Resiane Paula da Silveira

Capa: Freepik/MultiAtual

Revisão: Respective autores dos artigos

Conselho Editorial

Ma. Heloisa Alves Braga, Secretaria de Estado de Educação de Minas Gerais, SEE-MG

Me. Ricardo Ferreira de Sousa, Universidade Federal do Tocantins, UFT

Me. Guilherme de Andrade Ruela, Universidade Federal de Juiz de Fora, UFJF

Esp. Rícael Spirandeli Rocha, Instituto Federal Minas Gerais, IFMG

Ma. Luana Ferreira dos Santos, Universidade Estadual de Santa Cruz, UESC

Ma. Ana Paula Cota Moreira, Fundação Comunitária Educacional e Cultural de João Monlevade, FUNCEC

Me. Camilla Mariane Menezes Souza, Universidade Federal do Paraná, UFPR

Ma. Jocilene dos Santos Pereira, Universidade Estadual de Santa Cruz, UESC

Ma. Tatiany Michelle Gonçalves da Silva, Secretaria de Estado do Distrito Federal, SEE-DF

Dra. Haiany Aparecida Ferreira, Universidade Federal de Lavras, UFLA

Me. Arthur Lima de Oliveira, Fundação Centro de Ciências e Educação Superior à Distância do Estado do RJ, CECIERJ

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

S586t Tecnologias inovadoras no campo: sustentabilidade, digitalização e futuro da produção
/ Carla Michelle da Silva; Talys Moratti Lemos de Oliveira; Keithy Juliane de Oliveira; et al. (organizadores). – Formiga (MG): Editora MultiAtual, 2026. 222 p. : il.

Outros organizadores:
Airton Kleber Gomes Matos; Antônio Veimar da Silva

Formato: PDF
Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader
Modo de acesso: World Wide Web
Inclui bibliografia
ISBN 978-65-6009-226-6
DOI: 10.29327/5775160

1. Ciências Agrárias. 2. Agronomia geral. 3. Multidisciplinar e Interdisciplinar. I. Silva, Carla Michelle da. II. Oliveira, Talys Moratti Lemos de. III. Oliveira, Keithy Juliane de. IV. Título.

CDD: 630.7
CDU: 631/63

Os artigos, seus conteúdos, textos e contextos que participam da presente obra apresentam responsabilidade de seus autores.

Downloads podem ser feitos com créditos aos autores. São proibidas as modificações e os fins comerciais.

Proibido plágio e todas as formas de cópias.

Editora MultiAtual
CNPJ: 35.335.163/0001-00
Telefone: +55 (37) 99855-6001
www.editoramultiatual.com.br
editoramultiatual@gmail.com
Formiga - MG
Catálogo Geral: <https://editoras.grupomultiatual.com.br/>

Acesse a obra originalmente publicada em:
<https://www.editoramultiatual.com.br/2026/01/tecnologias-inovadoras-no-campo.html>



**TECNOLOGIAS INOVADORAS NO CAMPO:
SUSTENTABILIDADE, DIGITALIZAÇÃO E FUTURO DA PRODUÇÃO**

Organizadores

Carla Michelle da Silva

Talys Moratti Lemos de Oliveira

Keithy Juliane de Oliveira

Airton Kleber Gomes Matos

Antônio Veimar da Silva

Autores

Airton Kleber Gomes Matos

Alexandre Moura Lima Neto

Antônio Veimar da Silva

Carla Michelle da Silva

Diego Fernando Daniel

Erine Natalie Bortot

Fabíola de Pádua Melo Padilha

Jefferson Santos de Amorim

Keithy Juliane de Oliveira

Lucas Santos Campos

Michelle dos Santos Oliveira

Rayane Feitosa de Carvalho

Talys Moratti Lemos de Oliveira

Thiago José Trindade Ferreira

Vinicius Braga Soares

APRESENTAÇÃO

A obra *“Tecnologias Inovadoras no Campo: Sustentabilidade, Digitalização e Futuro da Produção”* nasce em um contexto de profundas transformações no setor agropecuário, marcado pela incorporação acelerada de tecnologias digitais, pela pressão por sustentabilidade e pela necessidade de adaptação às mudanças climáticas e aos novos mercados globais. O livro propõe uma leitura ampla e fundamentada sobre como o campo contemporâneo deixa de ser apenas espaço de produção primária para assumir papel estratégico na inovação, na gestão baseada em dados e na construção de sistemas produtivos mais inteligentes e resilientes.

Ao longo dos capítulos, evidencia-se que a agricultura moderna passa por um processo de reconfiguração estrutural, impulsionado pelos princípios da Indústria 4.0. A integração entre automação, conectividade, análise de dados e inteligência artificial redefine práticas produtivas, amplia a eficiência operacional e fortalece a competitividade do agronegócio brasileiro. Essa transformação não se limita ao uso de máquinas avançadas, mas envolve uma mudança profunda na forma de planejar, monitorar e tomar decisões no ambiente rural.

O livro destaca o agronegócio digital como eixo central dessa transição, mostrando como tecnologias como Internet das Coisas, big data, sistemas ciberfísicos e plataformas digitais permitem uma gestão mais precisa da produção agropecuária. A digitalização do campo favorece o uso racional de insumos, a redução de perdas e a ampliação da rastreabilidade, elementos essenciais para atender às exigências de sustentabilidade econômica, ambiental e social impostas ao setor agroalimentar contemporâneo.

Um aspecto relevante abordado na obra é o papel do sensoriamento remoto e da agricultura de precisão na modernização do campo. O uso de imagens de satélite, drones e sensores possibilita o acompanhamento contínuo das lavouras, do solo e dos recursos naturais, permitindo intervenções mais rápidas e assertivas. Essa abordagem fortalece práticas produtivas sustentáveis, reduz impactos ambientais e contribui para a adaptação dos sistemas agrícolas às variabilidades climática.

A obra também evidencia a importância das Agtechs e dos novos modelos de negócio no fortalecimento dos ecossistemas de inovação do agronegócio. Startups,

empresas de base tecnológica e parcerias entre setor público, privado e instituições de pesquisa ampliam o acesso às soluções digitais, aceleram a difusão tecnológica e criam oportunidades para produtores de diferentes escalas. Esses novos arranjos produtivos favorecem a integração das cadeias agroindustriais e promovem maior transparência e eficiência nos fluxos produtivos e comerciais.

A relação entre agricultura digital e sustentabilidade é tratada de forma transversal ao longo do livro, evidenciando que a inovação tecnológica pode atuar como aliada estratégica na mitigação dos impactos ambientais e no uso eficiente dos recursos naturais. A automação e o monitoramento orientado por dados contribuem para reduzir o consumo de água, energia e insumos químicos, ao mesmo tempo em que fortalecem a viabilidade econômica das propriedades rurais.

Entretanto, a obra não ignora os desafios sociais, econômicos e institucionais associados à digitalização do campo. Questões como desigualdade de acesso à conectividade, custos de adoção tecnológica, qualificação da mão de obra e governança dos dados são analisadas de forma crítica. O livro evidencia que a transformação digital ocorre de maneira heterogênea no território brasileiro, exigindo políticas públicas, estratégias de inclusão digital e ações de capacitação contínua.

Outro ponto de destaque é a reflexão sobre as transformações no trabalho rural e na organização social do campo. A automação e o uso intensivo de tecnologias digitais redefinem o perfil do trabalhador agrícola, criando novas demandas por competências técnicas e analíticas. Ao mesmo tempo, a obra ressalta a importância de garantir que esse processo de modernização não amplie desigualdades, mas contribua para a permanência digna das famílias no meio rural.

Por fim, *Tecnologias Inovadoras no Campo* reafirma que o futuro da produção agropecuária está diretamente ligado à capacidade de integrar tecnologia, sustentabilidade e gestão inteligente. Mais do que uma evolução técnica, a agricultura digital representa uma oportunidade de construir sistemas produtivos mais eficientes, resilientes e socialmente responsáveis. A obra se consolida, assim, como uma contribuição relevante para pesquisadores, estudantes, profissionais e formuladores de políticas interessados em compreender e atuar nos desafios e possibilidades do agronegócio contemporâneo.

Os autores.

SUMÁRIO

| | |
|---|-----|
| CAPÍTULO 1 | 12 |
| AGRONEGÓCIO DIGITAL: INOVAÇÃO E AUTOMAÇÃO NA ERA 4.0 | |
| <i>Carla Michelle da Silva; Lucas Santos Campos; Antônio Veimar da Silva</i> | |
| CAPÍTULO 2 | 27 |
| SENSORIAMENTO REMOTO E INTERNET DAS COISAS: PILARES DA AGRICULTURA INTELIGENTE | |
| <i>Antônio Veimar da Silva; Airton Kleber Gomes Matos; Carla Michelle da Silva</i> | |
| CAPÍTULO 3 | 43 |
| DRONES E IMAGENS MULTIESPECTRAIS NA AGRICULTURA DE PRECISÃO | |
| <i>Carla Michelle da Silva; Airton Kleber Gomes Matos; Antônio Veimar da Silva</i> | |
| CAPÍTULO 4 | 58 |
| GEOTECNOLOGIAS E NDVI: ANÁLISE DE PERFORMANCE E PRODUTIVIDADE AGRÍCOLA | |
| <i>Antônio Veimar da Silva; Lucas Santos Campos; Carla Michelle da Silva</i> | |
| CAPÍTULO 5 | 73 |
| FERRAMENTAS DIGITAIS E BIOTECNOLÓGICAS NA GESTÃO DA SAÚDE DO SOLO | |
| <i>Carla Michelle da Silva; Airton Kleber Gomes Matos; Antônio Veimar da Silva</i> | |
| CAPÍTULO 6 | 88 |
| BIOINDICADORES E DEGRADAÇÃO DO SOLO: DIAGNÓSTICO E MANEJO SUSTENTÁVEL | |
| <i>Antônio Veimar da Silva; Airton Kleber Gomes Matos; Carla Michelle da Silva</i> | |
| CAPÍTULO 7 | 102 |
| GEOTECNOLOGIAS APLICADAS À GESTÃO DA COBERTURA E USO DO SOLO | |
| <i>Keithy Juliane de Oliveira; Rayane Feitosa de Carvalho; Airton Kleber Gomes Matos; Carla Michelle da Silva; Antônio Veimar da Silva</i> | |
| CAPÍTULO 8 | 115 |
| ESTRESSE HÍDRICO E MANEJO INTELIGENTE DA IRRIGAÇÃO COM SUPORTE DIGITAL | |
| <i>Carla Michelle da Silva; Airton Kleber Gomes Matos; Antônio Veimar da Silva</i> | |
| CAPÍTULO 9 | 129 |
| ÍNDICES ESPECTRAIS (NDVI, EVI, SAVI): DADOS PARA DECISÕES SUSTENTÁVEIS | |
| <i>Antônio Veimar da Silva; Jefferson Santos de Amorim; Diego Fernando Daniel; Carla Michelle da Silva</i> | |
| CAPÍTULO 10 | 144 |
| BIOTECNOLOGIA MICROBIANA: CONTROLE BIOLÓGICO E SUSTENTABILIDADE PRODUTIVA | |
| <i>Carla Michelle da Silva; Jefferson Santos de Amorim; Airton Kleber Gomes Matos; Talys Moratti Lemos de Oliveira; Antônio Veimar da Silva</i> | |

| | |
|---|------------|
| CAPÍTULO 11 BIOINFORMÁTICA E GENÔMICA: IDENTIFICAÇÃO DE GENES DE INTERESSE AGRONÔMICO <i>Michelle dos Santos Oliveira; Jefferson Santos de Amorim; Airton Kleber Gomes Matos; Antônio Veimar da Silva; Carla Michelle da Silva</i> | 159 |
| CAPÍTULO 12 GESTÃO SUSTENTÁVEL DA PROPRIEDADE RURAL NA ERA DIGITAL <i>Carla Michelle da Silva; Erine Natalie Bortot; Antônio Veimar da Silva</i> | 174 |
| CAPÍTULO 13 POLÍTICAS PÚBLICAS E INOVAÇÃO TECNOLÓGICA PARA SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL <i>Antônio Veimar da Silva; Thiago José Trindade Ferreira; Vinicius Braga Soares; Alexandre Moura Lima Neto; Fabíola de Pádua Melo Padilha; Carla Michelle da Silva</i> | 189 |
| CAPÍTULO 14 FORMAÇÃO DO PROFISSIONAL DAS CIÊNCIAS AGRÁRIAS NA ERA DAS TECNOLOGIAS DIGITAIS <i>Carla Michelle da Silva; Antônio Veimar da Silva</i> | 203 |
| CURRÍCULO DOS ORGANIZADORES | 218 |
| CURRÍCULO DOS AUTORES | 219 |



CAPÍTULO 1

AGRONEGÓCIO DIGITAL: INOVAÇÃO E AUTOMAÇÃO NA ERA

4.0

Carla Michelle da Silva

Lucas Santos Campos

Antônio Veimar da Silva

1. Introdução

A transformação digital no agronegócio tem se consolidado como um dos principais vetores de mudança nos sistemas produtivos contemporâneos, reposicionando o campo como espaço estratégico de inovação tecnológica. A incorporação de princípios da Indústria 4.0 à agricultura tem promovido novas formas de organização da produção, baseadas na automação, conectividade e uso intensivo de dados, ampliando a eficiência e a competitividade do setor agropecuário (Oliveira *et al.*, 2022). Nesse contexto, o conceito de agronegócio digital emerge como uma resposta às demandas por maior produtividade, rastreabilidade e sustentabilidade, integrando tecnologias como internet das coisas, inteligência artificial, big data e sistemas ciberfísicos às atividades rurais. Essas inovações permitem uma gestão mais precisa dos processos produtivos, favorecendo decisões baseadas em dados e reduzindo incertezas associadas às variáveis climáticas e econômicas (Massruhá; Leite, 2016).

A digitalização do campo também tem alterado de forma significativa a dinâmica inovativa do setor agropecuário, incorporando novos atores, como startups, empresas de base tecnológica e centros de pesquisa, que passam a atuar de maneira integrada às cadeias produtivas tradicionais. Esse movimento amplia as possibilidades de cooperação, acelera a difusão tecnológica e fortalece ecossistemas de inovação no agronegócio brasileiro (Bambini; Bonacelli, 2024; Nogueira; Wander, 2024).

Paralelamente, a automação agrícola tem avançado por meio da adoção de máquinas e equipamentos inteligentes, capazes de operar de forma autônoma ou semiautônoma, ajustando parâmetros operacionais em tempo real. A integração entre sensores, softwares e sistemas de controle contribui para ganhos expressivos de eficiência operacional, redução de perdas e otimização do uso de insumos, consolidando a agricultura 4.0 como um novo paradigma produtivo (Funio; Rodrigues, 2025). Além dos impactos produtivos, a transformação digital no agronegócio apresenta implicações relevantes para a sustentabilidade ambiental. O uso de tecnologias digitais favorece práticas agrícolas mais racionais, com menor consumo de recursos naturais, mitigação de impactos ambientais e maior adaptação às mudanças climáticas. Dessa forma, a agricultura digital se consolida como ferramenta estratégica para promover sistemas produtivos mais sustentáveis e resilientes (Filho; Lima; Silva, 2025).

Entretanto, o avanço do agronegócio digital também evidencia desafios sociais, econômicos e institucionais, especialmente no que se refere à qualificação da mão de obra, à manutenção do emprego e à inclusão digital no meio rural. A adoção desigual das tecnologias pode ampliar assimetrias regionais e sociais, exigindo políticas públicas, estratégias de capacitação e modelos de governança capazes de garantir uma transição tecnológica mais equilibrada (Fernandes *et al.*, 2024; Souza; Bidarra, 2022). Diante desse cenário, torna-se fundamental analisar de forma crítica os processos de inovação e automação no campo, compreendendo tanto seus benefícios quanto suas limitações. A reflexão sobre o agronegócio digital permite identificar caminhos para potencializar ganhos produtivos e sustentáveis, ao mesmo tempo em que se enfrentam os desafios impostos pela rápida transformação tecnológica no setor agropecuário (Silva *et al.*, 2025).

Com base nisso, o objetivo desse capítulo é analisar o agronegócio digital no contexto da era 4.0, destacando os processos de inovação e automação aplicados ao setor agropecuário, bem como seus impactos produtivos, ambientais e sociais, com base em

estudos recentes sobre agricultura digital, indústria 4.0 e transformação tecnológica no campo.

2. Agronegócio Digital: inovação e automação na era 4.0

O agronegócio digital representa uma nova etapa no processo de modernização do setor agropecuário, caracterizada pela incorporação intensiva de tecnologias digitais aos sistemas produtivos. Inserido no contexto da Indústria 4.0, esse modelo produtivo baseia-se na integração entre automação, conectividade, análise de dados e inteligência computacional, promovendo mudanças profundas na forma como o campo produz, gerencia e toma decisões (Amaral *et al.*, 2025; Krueger; Andrade; Soares, 2023). A agricultura 4.0 surge como evolução dos modelos tradicionais e da agricultura de precisão, ampliando o uso de tecnologias digitais para além do manejo localizado, ao incorporar sistemas inteligentes capazes de operar de forma integrada e em tempo real. Essa abordagem possibilita maior controle dos processos produtivos, redução de falhas operacionais e aumento da eficiência, consolidando a digitalização como elemento estruturante do agronegócio contemporâneo (Araujo; Junior; Santana, 2024; Cataneo; Cavichioli, 2023).

A automação agrícola desempenha papel central nesse processo, especialmente por meio da adoção de máquinas, equipamentos e sistemas capazes de executar tarefas com mínima intervenção humana. Tratores autônomos, colheitadeiras inteligentes, sistemas automatizados de irrigação e monitoramento remoto exemplificam como a tecnologia tem redefinido o trabalho no campo, tornando-o mais preciso, previsível e orientado por dados (Bolignani; Filho, 2024). Outro elemento fundamental do agronegócio digital é a integração de dados provenientes de diferentes fontes, como sensores, imagens de satélite, drones e plataformas digitais. O uso de big data e analytics permite transformar grandes volumes de informações em conhecimento estratégico, apoiando decisões relacionadas ao manejo, à logística, ao uso de insumos e à comercialização da produção (Massruhá; Leite, 2016; Pinto *et al.*, 2024).

Esse avanço tecnológico tem provocado transformações significativas na dinâmica inovativa do setor agropecuário, com a emergência de novos atores e relações produtivas (Bambini; Bonacelli, 2024). Startups, empresas de base tecnológica e Agtechs passam a atuar de forma complementar aos agentes tradicionais, promovendo soluções digitais customizadas e acelerando a difusão da inovação no campo (Sordi; Junior, 2020). No

âmbito das cadeias produtivas, o agronegócio digital favorece maior integração entre os elos da produção, processamento e distribuição, ampliando a rastreabilidade, a transparência e a eficiência logística. A digitalização contribui para reduzir custos operacionais, minimizar perdas e aumentar a competitividade do agronegócio brasileiro em mercados cada vez mais exigentes e globalizados (Nogueira; Wander, 2024; Oliveira, 2025).

Além dos ganhos econômicos, a inovação e a automação na era 4.0 também apresentam impactos relevantes sobre o trabalho e a organização social no meio rural. Embora a tecnologia possa reduzir determinadas funções tradicionais, ela também cria novas demandas por qualificação profissional, estimulando a reconfiguração do perfil do trabalhador rural e exigindo políticas de formação alinhadas à nova realidade digital (Fernandes *et al.*, 2024; Silva; Lima; Silva, 2025). O agronegócio digital se consolida como um caminho estratégico para a construção de sistemas produtivos mais eficientes, inteligentes e sustentáveis. A combinação entre inovação tecnológica e automação redefine o papel do campo na economia contemporânea, posicionando a agricultura 4.0 como elemento-chave para enfrentar desafios produtivos, ambientais e sociais do presente e do futuro (Pistori; Neto, 2024).

3. Tecnologias digitais aplicadas à produção agropecuária

A aplicação de tecnologias digitais na produção agropecuária tem promovido uma reconfiguração profunda dos sistemas produtivos, ampliando a capacidade de monitoramento, controle e tomada de decisão no campo. A agricultura digital se fundamenta na integração de ferramentas tecnológicas que permitem acompanhar variáveis produtivas em tempo real, favorecendo maior eficiência operacional e redução de riscos associados às atividades agrícolas (Massruhá; Leite, 2016). Nesse cenário, a agricultura de precisão destaca-se como uma das principais expressões da digitalização no campo, ao possibilitar o manejo localizado e racional dos recursos produtivos. O uso de dados georreferenciados permite aplicar insumos de forma diferenciada, respeitando a variabilidade espacial do solo e das culturas, o que resulta em ganhos de produtividade e sustentabilidade (Cataneo; Cavichioli, 2023; Silva; Cavichioli, 2020).

O sensoriamento remoto constitui uma das bases tecnológicas da agricultura digital, fornecendo informações estratégicas sobre o desenvolvimento das culturas, condições do solo e impactos climáticos. Imagens obtidas por satélites e drones permitem

identificar padrões de estresse hídrico, falhas de plantio e incidência de pragas, contribuindo para intervenções mais rápidas e assertivas no manejo agrícola (Carvalho *et al.*, 2024; Viola; Mendes, 2022). A Internet das Coisas (IoT) tem ampliado significativamente as possibilidades de automação e conectividade no campo, por meio da instalação de sensores capazes de coletar dados sobre umidade, temperatura, fertilidade do solo e desempenho de máquinas. Esses dispositivos viabilizam sistemas inteligentes de irrigação, fertirrigação e monitoramento ambiental, promovendo maior controle dos processos produtivos (Araujo; Junior; Santana, 2024).

Associado à IoT, o uso de big data e análise avançada de dados tem se consolidado como elemento central da agricultura 4.0. A capacidade de processar grandes volumes de informações provenientes de diferentes fontes permite transformar dados brutos em conhecimento estratégico, apoiando decisões relacionadas ao planejamento produtivo, à logística e à comercialização agrícola (Nogueira; Wander, 2024). A inteligência artificial e os sistemas de apoio à decisão ampliam ainda mais o potencial das tecnologias digitais no agronegócio, ao permitir a previsão de cenários produtivos e a automação de processos complexos. Algoritmos de aprendizado de máquina são utilizados para prever produtividade, identificar doenças e otimizar o uso de insumos, contribuindo para maior eficiência e redução de custos (Krueger; Andrade; Soares, 2023).

As máquinas e equipamentos agrícolas inteligentes também desempenham papel estratégico na digitalização da produção agropecuária. Tratores, pulverizadores e colheitadeiras equipados com sistemas embarcados e conectividade digital possibilitam ajustes automáticos durante a operação, reduzindo perdas e aumentando a precisão das atividades no campo (Funio; Rodrigues, 2025; Bolignani; Filho, 2024). A aplicação dessas tecnologias digitais tem sido observada em diferentes cadeias produtivas, como grãos, fruticultura, silvicultura e agroindústria. Estudos demonstram que a incorporação de soluções digitais promove ganhos expressivos em eficiência produtiva, qualidade do produto e sustentabilidade, ainda que de forma heterogênea entre regiões e segmentos do agronegócio brasileiro (Carvalho *et al.*, 2024; Oliveira, 2025).

Apesar dos avanços, a adoção das tecnologias digitais no campo enfrenta desafios relacionados à infraestrutura, ao acesso à conectividade e à capacitação técnica dos produtores. A desigualdade no acesso às ferramentas digitais pode limitar os benefícios da agricultura 4.0, reforçando a necessidade de políticas públicas e estratégias de inclusão digital no meio rural (Souza; Bidarra, 2022; Silva; Cavichioli, 2023). Assim, as tecnologias

digitais aplicadas à produção agropecuária configuram-se como instrumentos essenciais para a modernização do agronegócio, ao integrar inovação, eficiência e sustentabilidade. Seu uso estratégico contribui para fortalecer a competitividade do setor, ao mesmo tempo em que impõe a necessidade de planejamento, qualificação profissional e governança adequada para garantir uma transição tecnológica equilibrada (Filho; Lima; Silva, 2025; Amaral *et al.*, 2025).

4. Inovação, Agtechs e novos modelos de negócio no agronegócio

A inovação tem assumido papel central na reconfiguração do agronegócio brasileiro, impulsionada pela digitalização dos processos produtivos e pela incorporação de tecnologias associadas à Indústria 4.0. Esse movimento tem ampliado a capacidade do setor de responder a desafios produtivos, ambientais e mercadológicos, consolidando a inovação como elemento estratégico para a competitividade do agronegócio contemporâneo (Oliveira *et al.*, 2022).

No contexto do agronegócio digital, a dinâmica inovativa deixa de ser restrita a grandes empresas e instituições tradicionais, passando a incorporar novos atores, como startups, hubs de inovação, incubadoras e empresas de base tecnológica. Essa ampliação do ecossistema inovador favorece a circulação do conhecimento, a cooperação interorganizacional e a aceleração do desenvolvimento tecnológico no campo (Bambini; Bonacelli, 2024; Nogueira; Wander, 2024).

As Agtechs destacam-se como protagonistas desse processo, ao desenvolver soluções digitais voltadas para diferentes etapas das cadeias produtivas agropecuárias. Essas empresas atuam em áreas como monitoramento agrícola, gestão da produção, logística, comercialização e serviços financeiros, oferecendo ferramentas flexíveis e adaptáveis às demandas do setor rural (Sordi; Junior, 2020). A atuação das Agtechs contribui para a democratização do acesso à inovação, especialmente ao oferecer tecnologias de menor custo e maior facilidade de uso quando comparadas às soluções tradicionais. Esse fator é particularmente relevante para pequenos e médios produtores, que passam a integrar processos de digitalização anteriormente restritos a grandes empreendimentos agroindustriais (Massruhá; Leite, 2016).

Além do desenvolvimento tecnológico, a inovação no agronegócio também se manifesta por meio de novos modelos de negócio baseados em plataformas digitais, serviços sob demanda e economia de dados. A digitalização favorece a criação de modelos

mais flexíveis, orientados por informação em tempo real e capazes de agregar valor aos produtos agropecuários ao longo das cadeias produtivas (Oliveira, 2025; Vacilio; Lima, 2025). A integração entre produtores, fornecedores, indústrias e consumidores é ampliada por meio de plataformas digitais, que promovem maior transparência, rastreabilidade e eficiência nos fluxos produtivos e comerciais. Esses novos arranjos contribuem para reduzir assimetrias de informação, otimizar a logística e fortalecer a governança das cadeias do agronegócio (Nogueira; Wander, 2024; Pistori; Neto, 2024).

O avanço da inovação digital também tem sido impulsionado por parcerias entre o setor público, o setor privado e instituições de pesquisa. Políticas públicas de apoio à agricultura digital desempenham papel relevante ao fomentar ambientes favoráveis à inovação, estimular investimentos em tecnologia e promover a inclusão digital no meio rural (Souza; Bidarra, 2022; Bambini; Bonacelli, 2024). Entretanto, a consolidação de ecossistemas inovadores no agronegócio enfrenta desafios relacionados à infraestrutura tecnológica, à conectividade e à capacitação dos atores envolvidos. A ausência de condições adequadas pode limitar o alcance das inovações e comprometer a adoção efetiva das soluções digitais desenvolvidas pelas Agtechs (Silva; Lima; Silva, 2025; Fernandes *et al.*, 2024).

Outro aspecto relevante refere-se às transformações nas relações de trabalho e na organização produtiva decorrentes da inovação digital. A introdução de novos modelos de negócio exige profissionais com competências digitais, capacidade analítica e familiaridade com tecnologias avançadas, redefinindo o perfil do trabalhador no agronegócio (Fernandes *et al.*, 2024; Krueger; Andrade; Soares, 2023). A inovação no agronegócio também tem contribuído para fortalecer estratégias de sustentabilidade, ao viabilizar soluções tecnológicas que promovem o uso eficiente de recursos naturais e a redução de impactos ambientais. Dessa forma, os novos modelos de negócio baseados em tecnologia passam a incorporar princípios de produção sustentável e responsabilidade socioambiental (Viola; Mendes, 2022).

Apesar dos avanços observados, a adoção de inovações e de modelos de negócio digitais ainda ocorre de forma heterogênea no território brasileiro. Diferenças regionais, estruturais e socioeconômicas influenciam a velocidade e a intensidade da transformação digital no campo, exigindo estratégias diferenciadas de apoio e implementação (Oliveira *et al.*, 2022; Silva; Cavichioli, 2023). Assim, a inovação, as Agtechs e os novos modelos de negócio configuram-se como pilares fundamentais do agronegócio digital, ao

promoverem maior eficiência, integração e sustentabilidade nas cadeias produtivas. A consolidação desse novo cenário depende do fortalecimento dos ecossistemas de inovação, da ampliação do acesso às tecnologias e da construção de políticas públicas que assegurem uma transformação digital inclusiva e equilibrada no campo (Amaral *et al.*, 2025; Pinto *et al.*, 2024).

5. Sustentabilidade, mudanças climáticas e agricultura 4.0

A agricultura 4.0 tem se consolidado como uma estratégia fundamental para enfrentar os desafios impostos pelas mudanças climáticas e pela necessidade de sistemas produtivos mais sustentáveis. A incorporação de tecnologias digitais no campo possibilita maior eficiência no uso de recursos naturais, contribuindo para a redução de impactos ambientais e para o fortalecimento da resiliência dos sistemas agropecuários (Lima; Silva, 2025). A relação entre tecnologia e sustentabilidade no agronegócio digital baseia-se na capacidade de monitorar, analisar e intervir de forma precisa nos processos produtivos. O uso de dados em tempo real permite ajustar práticas agrícolas conforme as condições ambientais, minimizando desperdícios e promovendo uma produção mais racional e alinhada aos princípios do desenvolvimento sustentável (Massruhá; Leite, 2016).

As mudanças climáticas têm ampliado a complexidade da atividade agropecuária, ao intensificar eventos extremos, alterar regimes de precipitação e afetar a produtividade das culturas. Nesse contexto, as tecnologias digitais se apresentam como ferramentas estratégicas para antecipar riscos, planejar intervenções e adaptar os sistemas produtivos às novas condições climáticas (Viola; Mendes, 2022).

O sensoriamento remoto e o uso de imagens de satélite e drones possibilitam o acompanhamento contínuo das lavouras, permitindo identificar sinais precoces de estresse hídrico, degradação do solo e impactos climáticos adversos. Essas informações favorecem decisões mais rápidas e eficientes, contribuindo para a mitigação de perdas produtivas e ambientais (Carvalho *et al.*, 2024; Cataneo; Cavichioli, 2023). A Internet das Coisas e os sistemas automatizados de irrigação e manejo representam avanços relevantes para a sustentabilidade agrícola, ao possibilitar o uso eficiente da água e de outros insumos. A automação baseada em sensores ambientais contribui para reduzir o consumo excessivo de recursos naturais, promovendo práticas agrícolas mais equilibradas e ambientalmente responsáveis (Araujo; Junior; Santana, 2024).

Além dos benefícios ambientais diretos, a agricultura 4.0 também favorece a sustentabilidade econômica das propriedades rurais. A redução de custos operacionais, o aumento da eficiência produtiva e a melhoria da qualidade dos produtos fortalecem a viabilidade econômica da atividade agrícola, tornando-a mais competitiva e resiliente frente às oscilações do mercado e do clima (Pistori; Neto, 2024). A sustentabilidade no agronegócio digital também envolve dimensões sociais, especialmente no que se refere à permanência do produtor no campo e à adaptação do trabalho rural às novas tecnologias. Embora a digitalização exija maior qualificação técnica, ela também pode gerar novas oportunidades de trabalho e renda, desde que acompanhada por políticas de formação e inclusão digital (Fernandes *et al.*, 2024; Souza; Bidarra, 2022).

Entretanto, a adoção de tecnologias sustentáveis no campo ainda ocorre de forma desigual, refletindo disparidades regionais, limitações de infraestrutura e dificuldades de acesso à conectividade. Esses fatores podem comprometer o alcance dos benefícios ambientais e sociais da agricultura 4.0, reforçando a necessidade de ações coordenadas entre setor público e privado (Silva; Lima; Silva, 2025; Silva; Cavichioli, 2023).

As políticas públicas desempenham papel central na promoção da sustentabilidade associada à agricultura digital, ao incentivar práticas produtivas responsáveis, apoiar a inovação tecnológica e ampliar o acesso às ferramentas digitais. Programas de apoio à agricultura digital contribuem para alinhar os objetivos produtivos do agronegócio às metas ambientais e climáticas nacionais e internacionais (Souza; Bidarra, 2022). Dessa forma, a agricultura 4.0 se configura como um instrumento estratégico para a construção de sistemas agropecuários mais sustentáveis, resilientes e adaptados às mudanças climáticas. A integração entre tecnologia, gestão e responsabilidade ambiental reforça o papel do agronegócio digital como elemento-chave para garantir a segurança alimentar e o desenvolvimento sustentável no longo prazo (Viola; Mendes, 2022).

6. Desafios sociais, econômicos e institucionais da digitalização no campo

A digitalização do agronegócio, embora traga ganhos expressivos de eficiência e competitividade, também impõe desafios complexos de natureza social, econômica e institucional. A incorporação de tecnologias da agricultura 4.0 ocorre de forma heterogênea, revelando desigualdades estruturais que influenciam diretamente a capacidade de adoção tecnológica no meio rural brasileiro (Amaral *et al.*, 2025; Oliveira *et al.*, 2022). Um dos principais desafios refere-se ao acesso à infraestrutura tecnológica,

especialmente conectividade e disponibilidade de equipamentos adequados. A ausência ou precariedade de acesso à internet em áreas rurais limita a utilização de sistemas digitais, sensores e plataformas de gestão, comprometendo o pleno aproveitamento das tecnologias aplicadas à produção agropecuária (Silva; Cavichioli, 2023).

As desigualdades regionais também se refletem na adoção da agricultura digital, com maior concentração de tecnologias em regiões mais desenvolvidas economicamente. Esse cenário reforça assimetrias produtivas e competitivas entre produtores, exigindo estratégias específicas para promover a inclusão digital e reduzir disparidades territoriais no campo (Nogueira; Wander, 2024; Oliveira, 2025). No âmbito social, a digitalização do agronegócio provoca transformações significativas nas relações de trabalho rural. A automação de processos produtivos pode reduzir determinadas funções tradicionais, ao mesmo tempo em que cria novas demandas por profissionais qualificados e com competências digitais, redefinindo o perfil do trabalhador no campo (Fernandes *et al.*, 2024).

A qualificação da mão de obra rural surge, portanto, como elemento central para o sucesso da transformação digital. A ausência de capacitação técnica adequada pode dificultar a adoção das tecnologias e limitar seus benefícios, reforçando a importância de programas de formação continuada e educação tecnológica voltados ao meio rural (Souza; Bidarra, 2022). Além das questões trabalhistas, a digitalização também impacta a gestão das propriedades rurais, exigindo maior capacidade de análise de dados, planejamento estratégico e tomada de decisão baseada em informações digitais. Esse novo modelo de gestão representa um desafio adicional para produtores que não possuem familiaridade com ferramentas tecnológicas e sistemas informatizados (Pinto *et al.*, 2024; Bolignani; Filho, 2024).

Do ponto de vista econômico, o custo de aquisição e implementação das tecnologias digitais constitui uma barreira relevante, especialmente para pequenos e médios produtores. Investimentos em máquinas inteligentes, sensores e softwares podem comprometer a viabilidade financeira das propriedades, caso não sejam acompanhados por estratégias adequadas de financiamento e apoio institucional (Oliveira *et al.*, 2022; Silva; Cavichioli, 2020). Nesse contexto, os novos modelos de negócio e a atuação das Agtechs podem contribuir para mitigar barreiras econômicas, ao oferecer soluções mais acessíveis, modulares e adaptáveis às diferentes realidades produtivas. Ainda assim, a

consolidação dessas alternativas depende de ambientes institucionais favoráveis e de políticas de incentivo à inovação no campo (Sordi; Junior, 2020).

Os desafios institucionais também envolvem a necessidade de políticas públicas capazes de acompanhar o ritmo acelerado da transformação tecnológica. A ausência de marcos regulatórios atualizados e de estratégias coordenadas pode dificultar a difusão das tecnologias digitais e limitar seus impactos positivos no agronegócio (Souza; Bidarra, 2022). A governança da transformação digital no campo requer articulação entre diferentes atores, incluindo governos, instituições de pesquisa, setor privado e produtores rurais. A cooperação entre esses agentes é fundamental para criar condições favoráveis à inovação, promover a inclusão digital e garantir que os benefícios da agricultura 4.0 sejam distribuídos de forma mais equitativa (Bambini; Bonacelli, 2024; Nogueira; Wander, 2024).

Outro desafio relevante diz respeito à gestão e à segurança dos dados gerados pelas tecnologias digitais no agronegócio. O uso intensivo de informações produtivas levanta questões relacionadas à privacidade, à propriedade dos dados e ao uso estratégico das informações, exigindo mecanismos institucionais claros e confiáveis (Pinto *et al.*, 2024). A transformação digital também demanda adaptações culturais no meio rural, uma vez que a adoção de tecnologias envolve mudanças nos modos tradicionais de produção e tomada de decisão. A resistência à inovação, muitas vezes associada à falta de informação ou confiança nas tecnologias, pode dificultar a consolidação do agronegócio digital (Massruhá; Leite, 2016; Oliveira *et al.*, 2022).

Os impactos sociais da digitalização no campo devem ser analisados de forma integrada, considerando não apenas ganhos produtivos, mas também efeitos sobre a qualidade de vida, a permanência das famílias no meio rural e a redução das desigualdades. A agricultura digital pode contribuir para o desenvolvimento rural sustentável, desde que acompanhada por políticas inclusivas e socialmente responsáveis (Viola; Mendes, 2022; Filho; Lima; Silva, 2025). Diante desse conjunto de desafios, torna-se evidente que a digitalização do agronegócio exige abordagens sistêmicas e articuladas, capazes de integrar dimensões tecnológicas, sociais, econômicas e institucionais. A superação dessas barreiras é condição essencial para consolidar a agricultura 4.0 como instrumento de desenvolvimento sustentável e competitivo no campo brasileiro (Pistori; Neto, 2024).

7. Conclusão

A transformação digital no agronegócio evidencia que o campo deixou de ser apenas um espaço de produção primária para se consolidar como um ambiente estratégico de inovação, tecnologia e gestão baseada em dados. Ao longo deste livro, foi possível compreender como a incorporação de tecnologias digitais, automação e sistemas inteligentes redefine processos produtivos, amplia a eficiência operacional e fortalece a competitividade do setor agropecuário brasileiro. A análise do agronegócio digital na era 4.0 demonstrou que a inovação tecnológica não se limita à adoção de máquinas e equipamentos avançados, mas envolve uma mudança estrutural na forma de planejar, produzir, monitorar e tomar decisões no campo. A integração entre agricultura de precisão, sensoriamento remoto, Internet das Coisas, inteligência artificial e plataformas digitais cria novas possibilidades de gestão sustentável e orientada por informação.

Os capítulos dedicados às tecnologias aplicadas à produção agropecuária e aos novos modelos de negócio evidenciaram o papel central das Agtechs, das plataformas digitais e dos ecossistemas de inovação na modernização das cadeias produtivas. Esses atores contribuem para democratizar o acesso à tecnologia, estimular a inovação contínua e promover maior integração entre os diferentes elos do agronegócio. A relação entre agricultura 4.0, sustentabilidade e mudanças climáticas destacou que a digitalização do campo pode atuar como aliada estratégica na mitigação de impactos ambientais e na adaptação dos sistemas produtivos aos desafios climáticos. O uso racional de recursos naturais, a redução de desperdícios e o aumento da resiliência produtiva reforçam o potencial da tecnologia como instrumento de desenvolvimento sustentável.

Entretanto, os desafios sociais, econômicos e institucionais discutidos ao longo da obra revelam que a transformação digital no agronegócio não ocorre de forma homogênea. Questões relacionadas à infraestrutura, qualificação profissional, inclusão digital, governança e políticas públicas continuam sendo fatores determinantes para o sucesso ou limitação da agricultura digital no Brasil. Dessa forma, a consolidação do agronegócio digital exige abordagens integradas que articulem inovação tecnológica, capacitação humana, inclusão social e responsabilidade ambiental. A tecnologia, por si só, não garante desenvolvimento; é a forma como ela é incorporada aos contextos produtivos e sociais que define seus impactos. Por fim, este livro reforça que o futuro da produção agropecuária está diretamente associado à capacidade de integrar tecnologia,

sustentabilidade e gestão inteligente. O agronegócio digital representa não apenas uma evolução técnica, mas uma oportunidade de construir um campo mais eficiente, resiliente, competitivo e socialmente justo, alinhado às demandas contemporâneas e aos desafios das próximas décadas.

Referências Bibliográficas

- AMARAL E. A. E. *et al.* O agronegócio e a indústria 4.0—principais mudanças, impactos e desafios. **Revista Tópicos**, v. 3, n. 19, p. 1-12, 2025.
- ARAUJO, F. B. F.; JUNIOR, O. R. A.; SANTANA, G. G. Tecnologias na agricultura 4.0. **Facit Business and Technology Journal**, v. 1, n. 53, 2024.
- BAMBINI, M. D.; BONACELLI, M. B. M. Revolução digital no setor agropecuário e transformação da dinâmica inovativa: novos atores e relacionamentos. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, p. e27359-e27359, 2024.
- BOLIGNANI, E. A.; FILHO, J. L. Integração de tecnologias de automação na agricultura: desafios e oportunidades. **Revista Interface Tecnológica**, v. 21, n. 1, p. 150-159, 2024.
- CARVALHO, L. C. L. *et al.* Transformação digital na fruticultura: uma revisão sistemática na base Web of Science no período 2010-2021. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 62, p. e270355, 2024.
- CATANEO, J. V.; CAVICHIOLI, F. A. Agricultura de precisão: o uso da agricultura digital no campo. **Revista Interface Tecnológica**, v. 20, n. 1, p. 435-446, 2023.
- FERNANDES, T. L. X. *et al.* Determinantes da manutenção do emprego em tempos de Indústria 4.0: o caso da agropecuária no Brasil. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 62, n. 4, p. e274589, 2024.
- FILHO, A. A. O.; LIMA, L. A. S.; SILVA, D. P. A revolução sustentável no agronegócio: o papel das novas tecnologias. **Revista Alomorfia**, v. 9, n. 4, p. 579-601, 2025.
- FUNO, A. J.; RODRIGUES, A. Indústria 4.0: tecnologias implantadas no processo produtivo de uma indústria de máquinas agrícolas. **COLÓQUIO-Revista do Desenvolvimento Regional**, v. 22, n. 2, abr./jun., p. 258-276, 2025.
- KRUEGER, M. H.; ANDRADE, A. T.; SOARES, C. E. V. F. A indústria 4.0 e suas revoluções nos setores da biotecnologia e agricultura. **Revista interdisciplinar de ensino e educação**, v. 1, n. 2, p. 223-235, 2023.
- MASSRUHÁ, S. M. F. S.; LEITE, M. A. A. Agricultura digital. **Revista Eletrônica Competências Digitais para Agricultura Familiar**, v. 2, n. 1, p. 72-88, 2016.
- NOGUEIRA, M. L.; WANDER, A. E. Inovação nas cadeias produtivas do agronegócio brasileiro: Uma revisão sistemática da literatura. **Revista Organizações em Contexto**, v. 20, n. 40, p. 103-126, 2024.
- OLIVEIRA, A. L. A. Agricultura digital: uma análise da incorporação de tecnologias 4.0 pelo agronegócio de eucalipto, celulose e papel no estado de mato grosso do sul. **PEGADA-A Revista da Geografia do Trabalho**, v. 26, n. 1, 2025.

OLIVEIRA, V. L. C. *et al.* Estudo dos Agronegócios 4.0–Tecnologias, desafios e benefícios nos Agronegócios. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 13, p. e363111335379, 2022.

PINTO, M. R. *et al.* Domínios-chave para a maturidade digital no agronegócio brasileiro. **Navus-Revista de Gestão e Tecnologia**, v. 14, p. 1-18, 2024.

PISTORI, E. M. L.; NETO, M. M. Agricultura 4.0: transformação digital na cadeia produtiva para eficiência e sustentabilidade no setor agroindustrial. **ARACÊ**, v. 6, n. 4, p. 13579-13603, 2024.

SANTOS, E. A. G.; FERREIRA, G. B.; FERREIRA, M. Agricultura 4.0: estudo de caso sobre a eficiência da indústria 4.0 aplicada ao agronegócio. **Ciência & Tecnologia**, v. 15, n. 1, p. e1517, 2023.

SILVA, J. M. P.; CAVICHIOLI, F. A. O uso da agricultura 4.0 como perspectiva do aumento da produtividade no campo. **Revista Interface Tecnológica**, v. 17, n. 2, p. 616-629, 2020.

SILVA, P. A. S.; CAVICHIOLI, F. A. Uso das tecnologias agrícolas no Brasil. **Revista Interface Tecnológica**, v. 20, n. 2, p. 813-825, 2023.

SILVA, R. T.; LIMA, L. A. O.; SILVA, R. D. Transformação digital, desenvolvimento e desafios sociais no contexto da indústria 4.0. **Revista DCS**, v. 22, n. 83, p. e3555, 2025.

SORDI, V. F.; JUNIOR, P. E. V. Agtechs: estado da arte e perspectivas. **International Journal of Knowledge Engineering and Management**, v. 9, n. 24, p. 24-24, 2020.

SOUZA, M. P. R.; BIDARRA, Z. S. Política pública de apoio à agricultura digital. **Revista de Política Agrícola**, v. 31, n. 2, p. 18, 2022.

VACILIO, B. K. C.; LIMA, J. S. A Tendência da contabilidade automatizada em empresas do agronegócio. **Revista Mato-grossense de Gestão, Inovação e Comunicação**, v. 3, n. 1, p. 179-194, 2025.

VIOLA, E.; MENDES, V. Agricultura 4.0 e mudanças climáticas no Brasil. **Ambiente & Sociedade**, v. 25, p. e02462, 2022.



CAPÍTULO 2

SENSORIAMENTO REMOTO E INTERNET DAS COISAS: PILARES DA AGRICULTURA INTELIGENTE

Antônio Veimar da Silva
Airton Kleber Gomes Matos
Carla Michelle da Silva

1. Introdução

A agricultura inteligente tem se consolidado como um dos principais desdobramentos da transformação digital no campo, articulando tecnologias avançadas para tornar os sistemas produtivos mais eficientes, conectados e sustentáveis. Nesse contexto, o sensoriamento remoto e a Internet das Coisas (IoT) assumem papel central ao viabilizar o monitoramento contínuo das atividades agrícolas e a automação de processos produtivos, ampliando a capacidade de gestão e tomada de decisão no ambiente rural (Assis; Piantoni; Azevedo, 2024; Schlegel; Poletto, 2019).

O sensoriamento remoto, ao permitir a coleta de informações por meio de satélites, drones e sensores orbitais, possibilita o acompanhamento detalhado das condições das lavouras, do solo e do meio ambiente. Essa tecnologia tem sido amplamente utilizada no monitoramento agrícola e ambiental, contribuindo para a identificação precoce de estresses, falhas de cultivo e impactos climáticos, elementos essenciais para a agricultura

de precisão e para a sustentabilidade produtiva (Mendes *et al.*, 2025). Paralelamente, a Internet das Coisas tem ampliado as possibilidades de automação e conectividade no campo, ao integrar sensores, atuadores e sistemas digitais capazes de coletar e transmitir dados em tempo real. A aplicação da IoT na agricultura 4.0 permite maior controle sobre variáveis produtivas, como umidade do solo, temperatura, uso de água e desempenho de máquinas, favorecendo práticas agrícolas mais eficientes e inteligentes (Ferreira; Nascimento; Santos, 2023).

A integração entre sensoriamento remoto, IoT e inteligência artificial potencializa ainda mais a agricultura inteligente, ao transformar grandes volumes de dados em informações estratégicas. O uso de algoritmos de análise de imagens e aprendizado de máquina possibilita a detecção automática de doenças em plantas, a estimativa de produtividade e o suporte à tomada de decisão, ampliando a precisão e a agilidade das intervenções no campo (Silva *et al.*, 2025). O avanço dessas tecnologias está diretamente relacionado ao desenvolvimento da infraestrutura digital e à evolução das redes de comunicação, especialmente com a expansão das redes 5G. A melhoria da conectividade amplia a capacidade de transmissão de dados em tempo real, favorecendo a integração de sistemas inteligentes e a consolidação da agricultura conectada, embora ainda existam limitações significativas no acesso à conectividade em áreas rurais (Luza; Freitas, 2025; Santana *et al.*, 2024).

Além dos aspectos técnicos, a agricultura inteligente também se insere em debates mais amplos relacionados à economia digital, à sustentabilidade e aos modelos de desenvolvimento agrícola. A adoção dessas tecnologias influencia as dinâmicas territoriais, a organização produtiva e a participação da agricultura familiar na economia digital, evidenciando a necessidade de políticas públicas e estratégias de inclusão tecnológica no campo (Favareto; Toloka; Fonseca, 2024). Apesar de seu potencial transformador, a implementação do sensoriamento remoto e da IoT na agricultura enfrenta desafios técnicos, institucionais e sociais, como custos de adoção, capacitação dos produtores, segurança da informação e proteção de dados. Esses desafios reforçam a importância de abordagens integradas que considerem não apenas a eficiência produtiva, mas também os impactos sociais, territoriais e culturais associados à digitalização do campo (Souza *et al.*, 2024).

Assim, este capítulo tem como objetivo analisar o papel do sensoriamento remoto e da Internet das Coisas como pilares da agricultura inteligente, destacando suas

aplicações, potencialidades e desafios no contexto da agricultura digital, da sustentabilidade e da transformação tecnológica dos sistemas produtivos rurais.

2. Sensoriamento remoto aplicado à agricultura e ao meio ambiente

O sensoriamento remoto constitui uma das bases tecnológicas da agricultura inteligente, permitindo a obtenção de informações sobre a superfície terrestre sem contato direto com o objeto analisado. Por meio da captação da energia refletida ou emitida pelos alvos, essa tecnologia possibilita compreender padrões espaciais e temporais relacionados às atividades agrícolas e ambientais, tornando-se fundamental para o monitoramento e a gestão sustentável do território rural (Mendes *et al.*, 2025; Ullo; Sinha, 2021). Os fundamentos do sensoriamento remoto estão associados à interação entre a radiação eletromagnética e os elementos da superfície, como solo, vegetação e água. Cada alvo apresenta uma assinatura espectral específica, o que permite sua identificação e análise a partir de sensores instalados em plataformas orbitais ou aéreas. Essa característica viabiliza o acompanhamento detalhado das condições ambientais e produtivas em diferentes escalas espaciais (Schlegel; Poletto, 2019).

Na agricultura, o sensoriamento remoto passou a ser amplamente utilizado com o avanço da agricultura de precisão e digital. A capacidade de coletar dados de grandes áreas de forma contínua permite identificar variabilidades intra e interparcelas, auxiliando no planejamento agrícola e no manejo mais eficiente das culturas (Viana *et al.*, 2024). Os satélites desempenham papel central nesse processo, oferecendo imagens multiespectrais e hiperespectrais que possibilitam o monitoramento da vegetação, do solo e dos recursos hídricos ao longo do tempo. Essas imagens permitem avaliar índices de vegetação, crescimento das culturas e impactos de eventos climáticos, contribuindo para decisões estratégicas na produção agrícola e na conservação ambiental (López-Quílez *et al.*, 2025).

O uso de drones tem ampliado significativamente as aplicações do sensoriamento remoto no campo, especialmente por oferecer imagens de alta resolução espacial e maior flexibilidade operacional. Os veículos aéreos não tripulados permitem o monitoramento detalhado de áreas específicas, facilitando a identificação de falhas de plantio, pragas, doenças e estresses hídricos em estágios iniciais (Schmidt; Schmidt, 2024; Silva *et al.*, 2025). Além de satélites e drones, sensores instalados em máquinas agrícolas e estações meteorológicas complementam o sistema de sensoriamento remoto, fornecendo dados

contínuos sobre condições ambientais e operacionais. A integração desses sensores amplia a precisão das análises e fortalece a agricultura orientada por dados, característica central dos sistemas produtivos inteligentes (Ferreira; Nascimento; Santos, 2023; Ullo; Sinha, 2021).

No acompanhamento das lavouras, o sensoriamento remoto permite avaliar o vigor vegetativo, a produtividade potencial e a resposta das culturas às práticas de manejo. Essas informações possibilitam intervenções mais assertivas, reduzindo desperdícios de insumos e contribuindo para a sustentabilidade econômica e ambiental da produção agrícola (Assis; Piantoni; Azevedo, 2024; Santos; Ferreira; Ferreira, 2023). A análise do solo também se beneficia do uso do sensoriamento remoto, especialmente na identificação de áreas com degradação, compactação ou deficiência de nutrientes. Ao mapear essas variabilidades, o produtor pode adotar práticas de manejo localizado, promovendo a conservação do solo e a melhoria da produtividade a longo prazo (Viana *et al.*, 2024; Castro; Gonçalves; Castro, 2024).

No que se refere aos recursos naturais, o sensoriamento remoto tem papel estratégico no monitoramento de áreas de preservação, corpos hídricos e mudanças no uso e cobertura da terra. Essas aplicações são essenciais para o planejamento territorial, a conservação ambiental e o cumprimento de metas associadas ao desenvolvimento sustentável (Lucas *et al.*, 2019). A utilização dessas tecnologias também contribui para a mitigação e adaptação às mudanças climáticas, ao permitir a identificação de padrões de estresse ambiental e a antecipação de riscos produtivos. Dessa forma, o sensoriamento remoto fortalece a capacidade de resposta do setor agrícola frente às incertezas climáticas (Assis; Piantoni; Azevedo, 2024).

Apesar de seus avanços, a adoção do sensoriamento remoto ainda enfrenta desafios relacionados ao acesso às tecnologias, à interpretação dos dados e à capacitação técnica dos usuários. A efetividade dessa ferramenta depende não apenas da disponibilidade das imagens, mas também da capacidade de transformar dados em informações úteis para a gestão agrícola (Schlegel; Poletto, 2019). Assim, o sensoriamento remoto aplicado à agricultura e ao meio ambiente se consolida como um instrumento essencial da agricultura inteligente, ao integrar conhecimento técnico, inovação tecnológica e sustentabilidade. Sua utilização estratégica permite aprimorar o acompanhamento das lavouras, a conservação dos recursos naturais e a tomada de

decisão no campo, fortalecendo sistemas produtivos mais eficientes e resilientes (Mendes *et al.*, 2025; López-Quílez *et al.*, 2025).

3. Internet das Coisas (IoT) e automação no ambiente produtivo rural

A Internet das Coisas (IoT) tem se consolidado como um dos principais pilares da agricultura inteligente, ao possibilitar a conexão entre dispositivos físicos, sistemas digitais e plataformas de gestão no ambiente produtivo rural. A partir dessa integração, torna-se possível monitorar, controlar e automatizar processos agrícolas em tempo real, ampliando a eficiência operacional e a precisão das decisões no campo (Ferreira; Nascimento; Santos, 2023; Schlegel; Poletto, 2019). No contexto da agricultura 4.0, a IoT refere-se ao uso de sensores, atuadores e dispositivos conectados capazes de coletar dados sobre variáveis ambientais, produtivas e operacionais. Esses dados são transmitidos por redes de comunicação para sistemas de processamento e análise, permitindo o acompanhamento contínuo das atividades agrícolas e a automação de tarefas antes realizadas de forma manual (Silva *et al.*, 2024; Sousa; Torres; Araújo, 2023).

Os sensores IoT instalados no ambiente rural desempenham papel fundamental no monitoramento de fatores como umidade do solo, temperatura, radiação solar, qualidade do ar e níveis de nutrientes. Essas informações possibilitam o ajuste preciso das práticas de manejo, contribuindo para o uso racional de recursos naturais e para o aumento da produtividade agrícola (Assis; Piantoni; Azevedo, 2024; Ullo; Sinha, 2021). A automação no campo, viabilizada pela IoT, permite que sistemas agrícolas executem ações de forma autônoma ou semiautônoma, como acionamento de irrigação, controle de fertilização e regulação de equipamentos. Essa capacidade reduz a dependência de intervenções humanas constantes e aumenta a eficiência dos processos produtivos, especialmente em grandes áreas agrícolas (Ferreira; Nascimento; Santos, 2023; Santos; Ferreira; Ferreira, 2023).

A integração da IoT com máquinas e implementos agrícolas inteligentes amplia ainda mais o potencial da automação rural. Tratores, pulverizadores e colheitadeiras equipados com sensores e sistemas de comunicação conseguem ajustar seus parâmetros operacionais em tempo real, reduzindo desperdícios, minimizando impactos ambientais e melhorando a qualidade das operações no campo (Viana *et al.*, 2024). Além das lavouras, a IoT também tem sido aplicada em sistemas de produção animal, estufas agrícolas e unidades agroindustriais, permitindo o monitoramento contínuo das condições

ambientais e do desempenho produtivo. Essas aplicações reforçam o caráter sistêmico da agricultura inteligente, ao integrar diferentes etapas da cadeia produtiva por meio da conectividade digital (Silva *et al.*, 2024; Schlegel; Poletto, 2019).

O uso da IoT no ambiente produtivo rural contribui diretamente para a sustentabilidade agrícola, ao possibilitar a redução do consumo de água, energia e insumos químicos. A automação baseada em dados favorece práticas mais eficientes e ambientalmente responsáveis, alinhadas aos princípios do desenvolvimento sustentável e da economia circular (Lucas *et al.*, 2019). Entretanto, a adoção da IoT no campo enfrenta desafios relacionados à infraestrutura tecnológica, especialmente no que se refere à conectividade e à disponibilidade de redes de comunicação estáveis. A limitação do acesso à internet em áreas rurais compromete a transmissão de dados em tempo real e restringe o pleno funcionamento dos sistemas automatizados (Luza; Freitas, 2025; Santana *et al.*, 2024). Outro desafio relevante diz respeito à interoperabilidade entre dispositivos, plataformas e sistemas utilizados na agricultura inteligente. A diversidade de tecnologias e padrões pode dificultar a integração dos dados e a consolidação de sistemas unificados de gestão agrícola, exigindo soluções técnicas e normativas adequadas (Sousa; Torres; Araújo, 2023).

A segurança da informação também se destaca como um aspecto crítico no uso da IoT no ambiente rural. A coleta e transmissão contínua de dados produtivos levantam preocupações relacionadas à privacidade, à integridade das informações e à proteção contra ataques cibernéticos, tornando necessária a adoção de medidas preventivas e estratégias de cibersegurança (Souza *et al.*, 2024; Silva *et al.*, 2024). Além dos aspectos técnicos, a efetividade da IoT na agricultura depende da capacitação dos produtores e trabalhadores rurais para operar e interpretar os sistemas digitais. A falta de conhecimento técnico pode limitar o uso das tecnologias e comprometer seus benefícios, reforçando a importância de ações de formação e extensão rural voltadas à agricultura digital (Favareto; Tolocka; Fonseca, 2024; Ferreira; Nascimento; Santos, 2023). Assim, a Internet das Coisas e a automação no ambiente produtivo rural configuram-se como elementos centrais da agricultura inteligente, ao integrar conectividade, eficiência e sustentabilidade. Sua adoção estratégica permite transformar dados em decisões, otimizar processos produtivos e fortalecer a competitividade do setor agrícola, desde que acompanhada por infraestrutura adequada, governança tecnológica e inclusão digital no campo (Viana *et al.*, 2024).

4. Integração entre IoT, sensoriamento remoto e inteligência artificial

A integração entre Internet das Coisas (IoT), sensoriamento remoto e inteligência artificial representa um avanço significativo na consolidação da agricultura inteligente, ao articular diferentes tecnologias digitais em sistemas capazes de coletar, processar e interpretar dados em tempo real. Essa convergência amplia a capacidade de análise dos sistemas produtivos e fortalece a tomada de decisão baseada em informação qualificada no ambiente rural (Assis; Piantoni; Azevedo, 2024; López-Quílez et al., 2025). O sensoriamento remoto fornece dados espaciais e temporais essenciais sobre lavouras, solos e recursos naturais, enquanto a IoT viabiliza a coleta contínua de informações locais por meio de sensores distribuídos no campo. A inteligência artificial atua como elemento integrador, processando grandes volumes de dados e transformando-os em padrões, previsões e recomendações para o manejo agrícola (Mendes *et al.*, 2025; Ullo; Sinha, 2021).

A combinação dessas tecnologias permite a criação de sistemas agrícolas inteligentes capazes de identificar variações ambientais e produtivas com elevado nível de precisão. Algoritmos de aprendizado de máquina analisam imagens de satélite e drones associadas a dados de sensores, possibilitando diagnósticos mais rápidos e intervenções localizadas, reduzindo perdas e aumentando a eficiência produtiva (Silva *et al.*, 2025). No contexto da agricultura de precisão, a integração entre IoT e sensoriamento remoto orientada por inteligência artificial possibilita o manejo diferenciado das áreas produtivas. A análise automatizada de dados permite ajustar práticas como irrigação, fertilização e controle fitossanitário conforme as necessidades específicas de cada parcela da lavoura (Viana *et al.*, 2024; Santos).

A detecção precoce de pragas e doenças em plantas constitui uma das aplicações mais relevantes dessa integração tecnológica. O uso de inteligência artificial para análise de imagens agrícolas contribui para identificar padrões visuais associados a doenças, mesmo em estágios iniciais, favorecendo ações preventivas e reduzindo o uso excessivo de defensivos agrícolas (Silva *et al.*, 2025). Além do manejo das culturas, a integração entre essas tecnologias também tem sido aplicada ao monitoramento ambiental e à gestão de recursos naturais. A análise conjunta de dados espaciais e sensores locais permite acompanhar alterações no uso do solo, na disponibilidade hídrica e na qualidade ambiental, contribuindo para práticas agrícolas mais sustentáveis (Mendes *et al.*, 2025; Lucas *et al.*, 2019).

Os sistemas de apoio à decisão baseados em inteligência artificial ampliam a capacidade de planejamento agrícola, ao possibilitar a simulação de cenários produtivos e climáticos. Essas ferramentas auxiliam produtores e gestores na escolha de estratégias mais adequadas, considerando riscos, custos e impactos ambientais associados às decisões tomadas (Assis; Piantoni; Azevedo, 2024). A integração tecnológica também favorece a automação avançada no campo, permitindo que sistemas inteligentes executem ações de forma autônoma a partir da análise dos dados coletados. Essa automação reduz a necessidade de intervenções humanas constantes e aumenta a eficiência operacional dos sistemas produtivos (Ferreira; Nascimento; Santos, 2023). Entretanto, a efetividade dessa integração depende da qualidade dos dados coletados e da interoperabilidade entre diferentes dispositivos e plataformas. A diversidade de tecnologias utilizadas no campo pode dificultar a consolidação de sistemas integrados, exigindo padrões técnicos e soluções compatíveis entre sensores, softwares e algoritmos (Sousa; Torres; Araújo, 2023).

Outro aspecto crítico refere-se à infraestrutura digital necessária para suportar a integração entre IoT, sensoriamento remoto e inteligência artificial. A conectividade limitada em áreas rurais compromete a transmissão de dados em tempo real e restringe o pleno funcionamento dos sistemas inteligentes (Luza; Freitas, 2025; Santana *et al.*, 2024). Além dos desafios técnicos, a adoção de sistemas integrados exige capacitação dos produtores e profissionais do setor agrícola. A compreensão dos resultados gerados pelos algoritmos e a confiança nas recomendações automatizadas são fatores determinantes para a efetiva incorporação dessas tecnologias na rotina produtiva (Schlegel; Poletto, 2019). Assim, a integração entre IoT, sensoriamento remoto e inteligência artificial configura-se como um dos pilares mais avançados da agricultura inteligente, ao promover maior precisão, eficiência e sustentabilidade nos sistemas produtivos. Seu potencial transformador depende da superação de desafios técnicos, institucionais e formativos, consolidando-se como elemento estratégico para o futuro da agricultura digital (López-Quílez *et al.*, 2025).

5. Conectividade, redes digitais e infraestrutura tecnológica

A conectividade digital constitui um elemento estruturante da agricultura inteligente, pois viabiliza a comunicação entre sensores, máquinas, plataformas digitais e sistemas de apoio à decisão. Sem infraestrutura adequada de redes e transmissão de

dados, tecnologias como sensoriamento remoto, IoT e inteligência artificial tornam-se limitadas, comprometendo o funcionamento integrado dos sistemas produtivos rurais (Luza; Freitas, 2025; Ferreira; Nascimento; Santos, 2023). O avanço das redes de comunicação tem sido determinante para a consolidação da agricultura digital, especialmente com a evolução das tecnologias móveis e sem fio. A ampliação da capacidade de transmissão de dados, associada à redução da latência, possibilita o uso de aplicações em tempo real, fundamentais para o monitoramento agrícola e a automação no campo (Santana *et al.*, 2024; Sousa; Torres; Araújo, 2023).

A tecnologia 5G representa um marco nesse processo, ao oferecer maior velocidade, estabilidade e densidade de conexão em comparação às gerações anteriores. Seu potencial impacto na agricultura inteligente está relacionado à capacidade de suportar grande volume de dispositivos conectados simultaneamente, condição essencial para ambientes produtivos altamente digitalizados (Luza; Freitas, 2025; Santana *et al.*, 2024). No contexto rural, entretanto, a implantação das redes 5G enfrenta desafios significativos, como limitações geográficas, custos de infraestrutura e baixa atratividade econômica para provedores de serviço. Essas barreiras reforçam desigualdades territoriais no acesso à conectividade e impactam diretamente a adoção das tecnologias digitais no campo (Andrade; Kölling; Câmara, 2023).

Além das redes móveis, a infraestrutura tecnológica da agricultura inteligente envolve o uso de redes locais, sistemas de comunicação via rádio, satélite e plataformas híbridas. Essas soluções buscam contornar as limitações da conectividade terrestre, permitindo a transmissão de dados em regiões remotas e ampliando o alcance das tecnologias digitais no meio rural (Ullo; Sinha, 2021). A conectividade eficiente é fundamental para a integração entre dispositivos IoT e sistemas de supervisão e controle utilizados na agricultura 4.0. Modelos de sistemas supervisórios permitem acompanhar operações agrícolas em tempo real, identificar falhas e otimizar processos produtivos, desde que sustentados por redes de comunicação estáveis e seguras (Sousa; Torres; Araújo, 2023; Silva *et al.*, 2024).

A infraestrutura digital também desempenha papel relevante na convergência entre agricultura inteligente e outros sistemas tecnológicos, como smart cities e territórios digitais. A interligação entre ambientes urbanos e rurais amplia as possibilidades de gestão integrada dos recursos, logística e cadeias produtivas, contribuindo para estratégias de desenvolvimento sustentável (Meira; Pires; Neto, 2024;

Espíndola; Sampaio; Medeiros, 2024). Entretanto, a expansão da conectividade no campo não se limita a aspectos técnicos, envolvendo também dimensões sociais, econômicas e institucionais. A ausência de políticas públicas consistentes e investimentos estruturantes pode comprometer a universalização do acesso às redes digitais e limitar os benefícios da agricultura inteligente para pequenos produtores e agricultura familiar (Favareto; Tolocka; Fonseca, 2024;).

A qualificação da infraestrutura tecnológica deve ser acompanhada por estratégias de capacitação e apoio técnico, garantindo que produtores e trabalhadores rurais consigam utilizar de forma efetiva as ferramentas digitais disponíveis. A conectividade, isoladamente, não assegura a transformação produtiva, sendo necessário integrá-la a processos de formação e extensão rural (Schlegel; Poletto, 2019; Ferreira; Nascimento; Santos, 2023). Outro aspecto relevante refere-se à segurança e à confiabilidade das redes digitais utilizadas na agricultura inteligente. A transmissão contínua de dados produtivos exige mecanismos de proteção contra falhas, perdas de informação e acessos não autorizados, reforçando a importância da cibersegurança no ambiente rural conectado (Souza *et al.*, 2024; Sousa; Torres; Araújo, 2023).

Apesar das limitações existentes, observa-se um avanço gradual na ampliação da infraestrutura digital rural, impulsionado por iniciativas públicas e privadas voltadas à inclusão tecnológica. Esses esforços indicam um cenário de transição, no qual a conectividade tende a se consolidar como um direito estratégico para o desenvolvimento agrícola e territorial (Luza; Freitas, 2025). Assim, a conectividade, as redes digitais e a infraestrutura tecnológica configuram-se como fundamentos indispensáveis da agricultura inteligente. A consolidação desses elementos é condição essencial para a integração plena das tecnologias digitais no campo, permitindo sistemas produtivos mais eficientes, sustentáveis e alinhados às demandas da economia digital contemporânea (Assis; Piantoni; Azevedo, 2024; Santana *et al.*, 2024).

6. Sustentabilidade, inclusão produtiva e desafios da agricultura inteligente

A agricultura inteligente tem sido amplamente associada à promoção da sustentabilidade, ao integrar tecnologias digitais capazes de otimizar o uso de recursos naturais e reduzir impactos ambientais. O emprego de sistemas baseados em dados contribui para práticas produtivas mais eficientes, alinhadas aos princípios do desenvolvimento sustentável e da economia digital aplicada ao campo (Lucas *et al.*, 2019).

O uso racional da água, do solo e dos insumos agrícolas constitui um dos principais benefícios ambientais da agricultura inteligente. Tecnologias como sensoriamento remoto, IoT e sistemas automatizados permitem monitorar variáveis ambientais em tempo real, favorecendo intervenções precisas e reduzindo desperdícios, o que fortalece a sustentabilidade dos sistemas produtivos (Mendes *et al.*, 2025; Ferreira; Nascimento; Santos, 2023).

A agricultura inteligente também contribui para a mitigação dos impactos das mudanças ambientais e climáticas, ao possibilitar a identificação precoce de estresses hídricos, degradação do solo e alterações no uso da terra. Essas informações ampliam a capacidade de adaptação dos sistemas agrícolas frente às incertezas ambientais contemporâneas (Assis; Piantoni; Azevedo, 2024; Schmidt; Schmidt, 2024). No âmbito econômico, a sustentabilidade promovida pelas tecnologias digitais está associada ao aumento da eficiência produtiva e à redução de custos operacionais. A otimização do uso de insumos e a melhoria da produtividade fortalecem a viabilidade econômica das propriedades rurais, contribuindo para a permanência dos produtores no campo (Viana *et al.*, 2024). Entretanto, os benefícios da agricultura inteligente não se distribuem de forma homogênea entre os diferentes segmentos do setor agrícola. A inclusão produtiva de pequenos produtores e da agricultura familiar depende de condições territoriais, acesso à conectividade e políticas públicas capazes de reduzir as desigualdades no acesso às tecnologias digitais (Andrade; Kölling; Câmara, 2023).

A participação da agricultura familiar na economia digital ainda enfrenta barreiras estruturais, como limitações de infraestrutura, custos de adoção tecnológica e carência de assistência técnica especializada. Esses fatores podem restringir o potencial transformador da agricultura inteligente, reforçando desigualdades sociais e territoriais no meio rural (Favareto; Tolocka; Fonseca, 2024; Schlegel; Poletto, 2019). A inclusão produtiva no contexto da agricultura inteligente requer estratégias que articulem inovação tecnológica e políticas de desenvolvimento territorial. A adoção de tecnologias apropriadas, compatíveis com a realidade dos pequenos produtores, é fundamental para ampliar o acesso aos benefícios da digitalização do campo (Assis; Piantoni; Azevedo, 2024).

Outro desafio relevante refere-se à capacitação técnica e à formação dos atores envolvidos na agricultura inteligente. A utilização efetiva das tecnologias digitais exige conhecimentos específicos para interpretar dados, operar sistemas e tomar decisões

baseadas em informações digitais, demandando ações contínuas de formação e extensão rural (Schlegel; Poletto, 2019; Silva *et al.*, 2024). Além das questões formativas, a agricultura inteligente impõe desafios institucionais relacionados à governança dos sistemas digitais e à regulação do uso das tecnologias. A ausência de marcos normativos claros pode dificultar a difusão das inovações e comprometer a segurança jurídica dos produtores e demais agentes do setor agrícola (Sousa; Torres; Araújo, 2023).

A segurança da informação constitui outro aspecto crítico da agricultura inteligente, especialmente diante da intensificação da coleta e do armazenamento de dados produtivos. A proteção dessas informações é fundamental para garantir a confiança dos produtores e evitar usos indevidos que possam comprometer a sustentabilidade econômica e social das atividades agrícolas (Souza *et al.*, 2024). Os desafios técnicos também envolvem a interoperabilidade entre sistemas, plataformas e dispositivos utilizados na agricultura inteligente. A diversidade de tecnologias disponíveis pode dificultar a integração dos dados e limitar a construção de sistemas unificados de gestão agrícola, exigindo soluções técnicas e padrões compatíveis (Sousa; Torres; Araújo, 2023). A sustentabilidade da agricultura inteligente deve ser analisada de forma ampliada, considerando não apenas os ganhos produtivos, mas também os impactos sobre os modos de vida, o trabalho rural e as relações sociais no campo. A introdução de tecnologias digitais pode alterar práticas tradicionais, exigindo adaptações culturais e sociais por parte dos produtores (Scopinho; Valencio; Lourenço, 2015).

Apesar dos desafios, observa-se que a agricultura inteligente apresenta elevado potencial para contribuir com os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável, ao integrar eficiência produtiva, inovação tecnológica e responsabilidade socioambiental. O uso estratégico das tecnologias digitais pode fortalecer sistemas agrícolas mais resilientes e inclusivos (Meira; Pires; Neto, 2024).

Dessa forma, a sustentabilidade e a inclusão produtiva no contexto da agricultura inteligente dependem de abordagens integradas que articulem tecnologia, políticas públicas, capacitação e governança. A superação dos desafios técnicos, sociais e institucionais é condição essencial para que a agricultura inteligente se consolide como um instrumento efetivo de desenvolvimento sustentável no meio rural (Assis; Piantoni; Azevedo, 2024; Favareto; Tolocka; Fonseca, 2024).

7. Conclusão

O sensoriamento remoto e a Internet das Coisas consolidam-se como tecnologias estruturantes da agricultura inteligente, ao possibilitar a integração entre monitoramento, automação e análise de dados no ambiente produtivo rural. Ao longo deste capítulo, evidenciou-se que essas ferramentas ampliam significativamente a capacidade de gestão dos sistemas agrícolas, permitindo decisões mais precisas e orientadas por informações em tempo real.

A aplicação do sensoriamento remoto na agricultura e no meio ambiente demonstra seu potencial para o acompanhamento contínuo das lavouras, do solo e dos recursos naturais, contribuindo para práticas produtivas mais eficientes e sustentáveis. O uso de satélites, drones e sensores fortalece o manejo localizado, reduz desperdícios e amplia a capacidade de resposta frente a variabilidades climáticas e ambientais.

A Internet das Coisas, por sua vez, amplia as possibilidades de automação e conectividade no campo, ao integrar sensores, máquinas e plataformas digitais em sistemas inteligentes. Essa conectividade permite o controle mais eficiente das operações agrícolas, favorecendo o uso racional de insumos e a otimização dos processos produtivos. A integração entre IoT, sensoriamento remoto e inteligência artificial representa um avanço decisivo para a agricultura de precisão e orientada por dados. A convergência dessas tecnologias potencializa a análise de grandes volumes de informações, viabilizando sistemas de apoio à decisão mais robustos e adaptáveis às diferentes realidades produtivas.

Entretanto, o capítulo também evidenciou que a consolidação da agricultura inteligente depende da superação de desafios técnicos, sociais e institucionais. Limitações de infraestrutura, conectividade, capacitação técnica e segurança da informação ainda representam obstáculos relevantes, especialmente para pequenos produtores e agricultura familiar. Nesse sentido, a expansão da agricultura inteligente exige políticas públicas, investimentos estruturantes e estratégias de inclusão produtiva capazes de democratizar o acesso às tecnologias digitais no campo. A articulação entre inovação tecnológica, formação humana e governança é fundamental para garantir que os benefícios da digitalização sejam distribuídos de forma mais equitativa.

Por fim, o sensoriamento remoto e a Internet das Coisas se afirmam como pilares essenciais para a construção de sistemas agrícolas mais eficientes, sustentáveis e

resilientes. Sua incorporação estratégica fortalece o papel da agricultura inteligente como instrumento de desenvolvimento rural, alinhado às demandas contemporâneas por produtividade, sustentabilidade e responsabilidade socioambiental.

Referências Bibliográficas

- ANDRADE, G. S.; KÖLLING, G. J.; CÂMARA, M. A. A. Agroecologia e economia digital: sob as perspectivas política e ecojurídica. **Revista Jurídica Lusobrasileira**, v. 7, p. 1013-1045.
- ASSIS, K. C. C.; PIANTONI, J.; AZEVEDO, R. F. Tecnologias em agricultura inteligente: Eficiência e sustentabilidade. **Research, Society and Development**, v. 13, n. 4, p. e7013445072, 2024.
- CASTRO, A. C. O.; GONÇALVES, M. D.; CASTRO, J. A. C. Agricultura de precisão e digital: adoção de tecnologias e percepção dos principais stakeholders no Brasil. **Multidisciplinary Journal**, v. 12, n. 2, p. 1-11, 2024.
- ESPÍNDOLA, C. J.; SAMPAIO, F. S.; MEDEIROS, M. C. Desenvolvimento agrícola e tecnologias 5.0 no âmbito da nova economia do projeto na China. **Princípios**, v. 43, n. 171, p. 31-53, 2024.
- FAVARETO, A. S.; TOLOCKA, J. V.; FONSECA, A. S. A. As condições territoriais de participação da agricultura familiar na economia digital. **Redes**, n. 29, 2024.
- FERREIRA, A. M.; NASCIMENTO, G. C.; SANTOS, L. C. Tecnologia da internet das coisas na agricultura 4.0: uma revisão sistemática. **Advances in Global Innovation & Technology**, v. 1, n. 2, p. 50-57, 2023.
- LÓPEZ-QUÍLEZ, A. *et al.* AI, IoT and Remote Sensing in Precision Agriculture. **Applied Sciences**, v. 15, n. 6, 2025.
- LUCAS, M. R. *et al.* Desenvolvimento sustentável, economia circular e educação empreendedora. **Pesquisa em inovação: múltiplos olhares rumo a uma convergência formativa**, p. 13-30, 2019.
- LUZA, L. F.; FREITAS, L. P. S. A evolução das redes 5G e seus impactos na conectividade global. **Revista Delos**, v. 18, n. 74, p. e7715, 2025.
- MATULOVIC, M. *et al.* Desenvolvimento de uma smart house no curso de engenharia de biosistemas. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, v. 14, n. 1, p. 48-61, 2020.
- MEIRA, L. C. R.; PIRES, D. F.; NETO, S. C. Smart cities e o desenvolvimento sustentável: contribuições práticas da tecnologia para alcançar os ODS. **Revista Eletrônica de Sistemas de Informação e Gestão Tecnológica**, v. 14, n. 1, 2024.
- MENDES, W. R. *et al.* Sensoriamento Remoto Aplicado ao Monitoramento Agrícola e Ambiental. **Revista de Gestão e Secretariado**, v. 16, n. 6, p. e4874, 2025.
- SANTANA, W. L. *et al.* Historicidade da rede 5G (quinta geração): aplicações e desafios. **Scientia: Revista Científica Multidisciplinar**, v. 9, n. 3, p. 76-103, 2024.

SANTOS, E. A. G.; FERREIRA, G. B.; FERREIRA, M. Agricultura 4.0: estudo de caso sobre a eficiência da indústria 4.0 aplicada ao agronegócio. **Ciência & Tecnologia**, v. 15, n. 1, p. e1517, 2023.

SCHLEGEL, G. A.; POLETTTO, A. S. R. S. Smart agriculture: estudo exploratório sobre a agricultura orientada pela tecnologia da informação e comunicação. **Revista Intelecto**, v. 2596, p. 0806, 2019.

SCHMIDT, V.; SCHMIDT, J. K. Uso da tecnologia drone na agricultura no Brasil e a relação com os objetivos do Desenvolvimento Sustentável. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 15, n. 3, p. 154-164, 2024.

SCOPINHO, R. A.; VALENCIO, N. F. L. S.; LOURENÇO, L. F. Memória, cotidiano e trabalho: notas sobre modos de vida e subjetividades na Serra do Açor, Portugal. **Novos Cadernos NAEA**, v. 18, n. 2, p. 135-148, 2015.

SILVA, E. C. *et al.* Adoção da Internet das Coisas (IoT) na agropecuária: uma revisão sistemática sobre as possibilidades de adoção no ambiente produtivo rural. **Interações: Estudos em Comunicação, Política e Economia da Saúde**, v. 25, n. 4, p. e2544024, 2024.

SILVA, G. V. J. *et al.* Uso da inteligência artificial para a detecção de doenças em plantas por meio de imagens: uma análise de soluções acessíveis para pequenas e médias propriedades agrícolas. **Revista Foco**, v. 18, n. 11, p. e10401, 2025.

SOUSA, F. J. D. M.; TORRES, L. P.; ARAÚJO, T. M. A. Modelos de Sistemas de Supervisão na Indústria 4.0. **Revista Interdisciplinar de Pesquisa em Engenharia**, v. 9, n. 1, p. 27-48, 2023.

SOUZA, A. L. O. *et al.* Cibersegurança na Agricultura de Precisão: Exploração à Aplicação de Medidas Preventivas. **Advances in Global Innovation & Technology**, v. 2, n. 2, p. 61-73, 2024.

ULLO, S. L.; SINHA, G. R. Advances in IoT and Smart Sensors for Remote Sensing and Agriculture Applications. **Remote Sensing**, v. 13, n. 2585, p. 1-14, 2021.

VIANA, N. C. R. T. *et al.* Inovação na indústria agrícola brasileira: tecnologias de agricultura de precisão. **International Journal of Scientific Management and Tourism**, v. 10, n. 6, p. e1197, 2024.



CAPÍTULO 3

DRONES E IMAGENS MULTIESPECTRAIS NA AGRICULTURA DE PRECISÃO

Carla Michelle da Silva

Airton Kleber Gomes Matos

Antônio Veimar da Silva

1. Introdução

O uso de drones na agricultura de precisão tem se consolidado como uma das inovações mais relevantes do agronegócio contemporâneo, ao ampliar a capacidade de monitoramento, diagnóstico e intervenção nos sistemas produtivos. Os veículos aéreos não tripulados possibilitam a coleta rápida e detalhada de informações espaciais, contribuindo para decisões mais precisas e orientadas por dados no manejo agrícola (Oliveira *et al.*, 2020; Júnior; Nuñez, 2024). A evolução tecnológica dos drones, associada à agricultura 4.0, tem permitido sua aplicação em diferentes culturas e contextos produtivos. Esses equipamentos apresentam vantagens operacionais como flexibilidade, alta resolução espacial e redução de custos quando comparados a métodos tradicionais de monitoramento, tornando-se ferramentas estratégicas para a agricultura moderna (Gonçalves; Cavichioli, 2021).

As imagens multiespectrais obtidas por drones representam um avanço significativo em relação às imagens convencionais, pois capturam informações em diferentes bandas do espectro eletromagnético. Essa característica permite analisar o estado fisiológico das plantas, identificar variações no vigor vegetativo e detectar estresses bióticos e abióticos de forma antecipada (Hoss *et al.*, 2020;). A utilização de índices de vegetação, como NDVI e NDRE, derivados de imagens multiespectrais, tem se destacado no monitoramento agrícola por possibilitar avaliações quantitativas da biomassa, da sanidade das culturas e da produtividade potencial. Esses índices ampliam a capacidade de diagnóstico e favorecem o manejo localizado, reduzindo desperdícios de insumos (Santos; Padolfi; Ramaldes, 2018; Souza *et al.*, 2023).

No manejo agrícola, os drones têm sido amplamente utilizados para detecção de pragas, doenças e plantas daninhas, bem como para o acompanhamento do desenvolvimento das culturas ao longo do ciclo produtivo. Estudos demonstram que essas aplicações contribuem para intervenções mais rápidas e eficientes, fortalecendo a sustentabilidade produtiva e ambiental (Barão; Cavichioli, 2024; Resende *et al.*, 2020). A integração entre drones, inteligência artificial e sistemas de suporte à decisão amplia ainda mais o potencial da agricultura de precisão. O uso de algoritmos de aprendizado de máquina e deep learning permite automatizar a análise de imagens, aprimorar a predição de rendimento agrícola e apoiar o planejamento estratégico das atividades no campo (Balabenute; Filho, 2024).

Apesar de seus benefícios, a adoção de drones na agricultura enfrenta desafios técnicos, econômicos e regulatórios, incluindo custos de aquisição, necessidade de capacitação especializada e adequação às legislações vigentes. Esses fatores influenciam a velocidade e a abrangência da incorporação dessa tecnologia, especialmente entre pequenos e médios produtores (Moraes *et al.*, 2024; Cavalcanti *et al.*, 2025). Nesse sentido, o objetivo deste capítulo é analisar o uso de drones e de imagens multiespectrais na agricultura de precisão, destacando seus fundamentos, principais aplicações, integração com inteligência artificial e sistemas de suporte à decisão, bem como os benefícios, desafios e perspectivas dessa tecnologia para o manejo agrícola sustentável.

2. Fundamentos do uso de drones na agricultura de precisão

Os drones, também conhecidos como veículos aéreos não tripulados ou aeronaves remotamente pilotadas, têm se consolidado como ferramentas estratégicas na agricultura

de precisão, ao possibilitar a coleta de dados espaciais com alta resolução e elevada frequência temporal. Sua aplicação no campo amplia a capacidade de monitoramento agrícola, oferecendo informações detalhadas que subsidiam o manejo mais eficiente das culturas (Ribatski; Santos; Neto, 2018; Pessi *et al.*, 2020). O avanço tecnológico dos drones está diretamente associado ao desenvolvimento de sensores embarcados, sistemas de navegação e plataformas de processamento de dados. Esses equipamentos evoluíram de aplicações recreativas e militares para usos científicos e produtivos, tornando-se instrumentos acessíveis e adaptáveis às demandas do agronegócio moderno (Cavalcante *et al.*, 2022).

Na agricultura de precisão, os drones são utilizados como plataformas aéreas para aquisição de imagens e dados georreferenciados, permitindo análises espaciais detalhadas das áreas cultivadas. A possibilidade de sobrevoos programados e repetitivos favorece o acompanhamento do desenvolvimento das culturas ao longo do ciclo produtivo, aspecto fundamental para o planejamento agrícola (Oliveira *et al.*, 2020; Assaiante; Cavichioli, 2020). Um dos fundamentos do uso de drones no campo reside na sua capacidade de operar em baixa altitude, o que resulta em imagens com resolução espacial superior àquelas obtidas por satélites. Essa característica permite identificar variações intra-parcela e pequenas anomalias nas lavouras, contribuindo para intervenções mais localizadas e precisas (Hoss *et al.*, 2020; Damasceno; Martins, 2025).

Os drones também se destacam pela flexibilidade operacional, podendo ser utilizados em diferentes tipos de culturas, topografias e condições ambientais. Essa versatilidade amplia seu potencial de aplicação em sistemas agrícolas diversificados, desde grandes áreas de monocultura até propriedades de menor escala (Reips; Gubert, 2019). Outro fundamento relevante refere-se à integração dos drones com sistemas de posicionamento global e softwares de planejamento de voo. Esses recursos garantem a padronização da coleta de dados, a repetibilidade das operações e a precisão geográfica das informações obtidas, aspectos essenciais para análises comparativas e tomadas de decisão baseadas em dados (Pessi *et al.*, 2020). O uso de drones na agricultura de precisão também está associado à redução de custos operacionais quando comparado a métodos tradicionais de monitoramento, como levantamentos de campo extensivos ou imagens aéreas tripuladas. Essa redução de custos contribui para a viabilidade econômica da tecnologia e para sua adoção crescente no setor agrícola (Oliveira *et al.*, 2020; Jesus; Peres, 2023).

Além dos aspectos econômicos, os drones oferecem ganhos significativos em termos de agilidade e segurança. A realização de levantamentos aéreos minimiza a necessidade de deslocamento de pessoas em áreas extensas ou de difícil acesso, reduzindo riscos operacionais e aumentando a eficiência do monitoramento agrícola (Ribatski; Santos; Neto, 2018; Cavalcante *et al.*, 2022). Os fundamentos do uso de drones também envolvem a capacidade de integração com outras tecnologias da agricultura digital, como sensoriamento remoto, inteligência artificial e sistemas de suporte à decisão. Essa integração amplia o valor das informações coletadas e fortalece a agricultura orientada por dados, característica central da agricultura de precisão (Balabenute; Filho, 2024; Chagas; Zamberlan, 2025).

No contexto da agricultura 4.0, os drones passam a desempenhar papel estratégico como fontes primárias de dados para sistemas inteligentes. As informações obtidas a partir de sobrevoos alimentam plataformas digitais que analisam padrões produtivos, ambientais e climáticos, apoiando o planejamento e a gestão agrícola (Júnior; Nuñez, 2024; Mendes *et al.*, 2025). Apesar de suas potencialidades, o uso de drones na agricultura exige conhecimento técnico específico para operação, processamento e interpretação dos dados coletados. A falta de capacitação adequada pode comprometer a qualidade das análises e limitar os benefícios da tecnologia, reforçando a importância da formação profissional no uso dessas ferramentas (Moraes *et al.*, 2024; Gonçalves; Cavichioli, 2021). Assim, os fundamentos do uso de drones na agricultura de precisão evidenciam que essa tecnologia vai além da simples coleta de imagens, constituindo um componente estratégico dos sistemas agrícolas modernos. Sua aplicação integrada contribui para o monitoramento eficiente das lavouras, a otimização do manejo e o fortalecimento de práticas produtivas mais sustentáveis e orientadas por dados (Oliveira *et al.*, 2020; Balabenute; Filho, 2024).

3. Imagens multiespectrais e índices de vegetação aplicados à agricultura

As imagens multiespectrais constituem um dos principais avanços tecnológicos associados ao uso de drones na agricultura de precisão, pois possibilitam a captação de informações em diferentes bandas do espectro eletromagnético. Diferentemente das imagens RGB convencionais, essas imagens permitem análises mais detalhadas do estado fisiológico das plantas, tornando-se fundamentais para o monitoramento agrícola moderno (Barbosa *et al.*, 2024). O princípio das imagens multiespectrais baseia-se na

resposta espectral da vegetação à radiação eletromagnética, especialmente nas regiões do visível e do infravermelho próximo. As plantas refletem e absorvem a radiação de maneira distinta conforme seu estado nutricional, hídrico e sanitário, o que possibilita identificar variações no vigor vegetativo por meio da análise espectral (Santos; Padolfi; Ramaldes, 2018).

Na agricultura de precisão, os sensores multiespectrais acoplados a drones têm ampliado significativamente a resolução espacial das análises agrícolas. Essa característica permite identificar heterogeneidades intra-parcela que dificilmente seriam percebidas por métodos tradicionais, favorecendo o manejo localizado e mais eficiente das culturas (Oliveira *et al.*, 2020). Entre as principais aplicações das imagens multiespectrais destaca-se o cálculo de índices de vegetação, que consistem em combinações matemáticas das bandas espectrais com o objetivo de representar o estado da vegetação. Esses índices transformam dados espectrais complexos em informações de fácil interpretação para o planejamento agrícola (Serrano; Moral, 2025).

O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) é um dos mais utilizados na agricultura de precisão, por sua capacidade de indicar o vigor vegetativo e a densidade da cobertura vegetal. Estudos demonstram que o NDVI é eficaz no acompanhamento do crescimento das culturas, na identificação de estresses e na estimativa da produtividade agrícola (Santos; Padolfi; Ramaldes, 2018; Souza *et al.*, 2023). Outro índice amplamente empregado é o NDRE, que utiliza a banda do red edge e apresenta maior sensibilidade em estágios mais avançados de desenvolvimento das culturas. Esse índice tem se mostrado especialmente útil para avaliações nutricionais e para o monitoramento de culturas em fases de alta biomassa (Barbosa *et al.*, 2024).

A escolha do sensor multiespectral influencia diretamente a qualidade e a aplicabilidade dos índices de vegetação gerados. Diferentes sensores apresentam variações quanto à resolução espectral, espacial e radiométrica, o que impacta os resultados obtidos e deve ser considerado no planejamento das operações com drones (Hoss *et al.*, 2020). As imagens multiespectrais também têm sido utilizadas na avaliação do desempenho de culturas específicas, como milho, soja, cana-de-açúcar e pastagens. Pesquisas indicam forte correlação entre índices espectrais e parâmetros agrônômicos, como biomassa, índice de área foliar e produtividade, reforçando o potencial dessas imagens para o manejo agrícola (Silva *et al.*, 2025).

No manejo de pastagens, os índices de vegetação derivados de imagens multiespectrais permitem avaliar a produtividade e a qualidade forrageira, auxiliando na tomada de decisão sobre pastejo, adubação e recuperação de áreas degradadas. Essas aplicações ampliam o uso da agricultura de precisão para além das culturas anuais (Silva *et al.*, 2025). As imagens multiespectrais obtidas por drones também contribuem para a detecção precoce de pragas e doenças, ao identificar alterações espectrais associadas a estresses bióticos. Essa detecção antecipada favorece intervenções localizadas, reduzindo perdas produtivas e o uso excessivo de defensivos agrícolas (Resende *et al.*, 2020; Barão; Cavichioli, 2024). A integração dos índices de vegetação com sistemas de informação geográfica e plataformas de agricultura digital potencializa o uso das imagens multiespectrais. Essa integração permite a geração de mapas temáticos, históricos produtivos e análises espaciais que apoiam o planejamento estratégico das propriedades rurais (Chagas; Zamberlan, 2025).

Apesar de suas vantagens, a utilização de imagens multiespectrais exige cuidados metodológicos relacionados à calibração dos sensores, às condições de iluminação e ao processamento dos dados. A ausência desses cuidados pode comprometer a confiabilidade dos índices de vegetação e das análises derivadas (Barbosa *et al.*, 2024). Outro desafio refere-se à interpretação dos índices de vegetação, que deve considerar o contexto agrônomo, o estágio fenológico das culturas e as condições ambientais. A leitura isolada dos índices pode levar a interpretações equivocadas, reforçando a importância do conhecimento técnico na agricultura de precisão (Souza *et al.*, 2023). Assim, as imagens multiespectrais e os índices de vegetação configuram-se como ferramentas centrais da agricultura de precisão, ao possibilitar análises detalhadas do estado das culturas e do ambiente produtivo. Seu uso estratégico contribui para o manejo mais eficiente, sustentável e orientado por dados, fortalecendo a tomada de decisão no agronegócio contemporâneo (Oliveira *et al.*, 2020; Serrano; Moral, 2025).

4. Aplicações práticas dos drones no manejo agrícola

Os drones têm ampliado de forma significativa as possibilidades de aplicação prática na agricultura de precisão, ao oferecerem dados detalhados e atualizados sobre as condições das lavouras. Sua utilização permite o monitoramento sistemático das áreas cultivadas, contribuindo para decisões mais rápidas e assertivas no manejo agrícola (Gonçalves; Cavichioli, 2021). Uma das principais aplicações dos drones no manejo

agrícola é o acompanhamento do desenvolvimento das culturas ao longo do ciclo produtivo. As imagens aéreas possibilitam avaliar o crescimento das plantas, identificar falhas de plantio e monitorar a uniformidade das lavouras, fornecendo subsídios para ajustes no manejo agrônomo (Damasceno; Martins, 2025; Assaiante; Cavichioli, 2020).

No monitoramento do vigor vegetativo, os drones se destacam pelo uso de imagens multiespectrais e índices de vegetação, que permitem identificar áreas com estresse hídrico, nutricional ou fisiológico. Essas informações favorecem intervenções localizadas, reduzindo desperdícios de insumos e aumentando a eficiência produtiva (Santos; Padolfi; Ramaldes, 2018). A detecção de pragas e doenças é outra aplicação relevante dos drones na agricultura de precisão. Alterações espectrais identificadas nas imagens aéreas permitem localizar focos iniciais de infestação, possibilitando o controle direcionado e reduzindo perdas produtivas e impactos ambientais associados ao uso excessivo de defensivos (Resende et al., 2020).

Os drones também têm sido utilizados para a identificação e o mapeamento de plantas daninhas, especialmente quando associados a técnicas de inteligência artificial. A detecção automatizada dessas plantas contribui para o manejo localizado e para a redução do uso de herbicidas, promovendo práticas agrícolas mais sustentáveis (Neto; Rosa; Nuñez, 2024; Balabenute; Filho, 2024). No contexto do monitoramento climático, os drones auxiliam na avaliação dos impactos de eventos extremos, como estiagens, geadas e chuvas intensas. As imagens obtidas permitem identificar rapidamente áreas afetadas, apoiando ações corretivas e estratégias de mitigação de danos na produção agrícola (Mendes *et al.*, 2025). Outra aplicação prática relevante é o uso de drones no georreferenciamento rural e no mapeamento de propriedades agrícolas. A obtenção de imagens de alta resolução espacial contribui para a delimitação precisa de áreas produtivas, apoio à regularização fundiária e planejamento territorial no meio rural (Pessi *et al.*, 2020).

Na avaliação da produtividade agrícola, os drones permitem estimar o rendimento das culturas a partir da análise espectral e da modelagem de dados espaciais. Essas estimativas auxiliam no planejamento da colheita, na logística e na tomada de decisão relacionada à comercialização da produção (Hoss *et al.*, 2020; Chagas; Zamberlan, 2025). Os drones também têm sido aplicados no manejo de culturas específicas, como cana-de-açúcar, soja, milho e pastagens, apresentando resultados positivos no monitoramento do desenvolvimento vegetal e na identificação de áreas com necessidade de intervenção.

Esses estudos reforçam a versatilidade da tecnologia em diferentes sistemas produtivos (Assaiante; Cavichioli, 2020).

No manejo ambiental, os drones contribuem para o monitoramento de áreas de preservação permanente, nascentes e recursos naturais, auxiliando na identificação de processos de degradação e no planejamento de ações de recuperação ambiental. Essa aplicação amplia o papel dos drones para além da produção agrícola (Sousa *et al.*, 2024; Mendes *et al.*, 2025). A utilização de drones como ferramenta de apoio à agricultura familiar também tem ganhado destaque, ao possibilitar o acesso a informações estratégicas de forma mais ágil e com menor custo operacional. Essa aplicação contribui para a democratização da agricultura de precisão, especialmente em regiões com limitações estruturais (Reips; Gubert, 2019; Jesus; Peres, 2023).

Apesar das inúmeras aplicações, a efetividade do uso de drones no manejo agrícola depende da integração entre coleta de dados, processamento das imagens e interpretação agrônômica. A ausência de articulação entre essas etapas pode limitar o aproveitamento das informações geradas pelos sobrevoos (Moraes *et al.*, 2024). Outro aspecto relevante refere-se à necessidade de planejamento adequado das operações com drones, incluindo definição de altitude, sobreposição de imagens e condições climáticas. Esses fatores influenciam diretamente a qualidade dos dados coletados e a confiabilidade das análises realizadas (Cavalcante *et al.*, 2022). Assim, as aplicações práticas dos drones no manejo agrícola evidenciam seu papel estratégico na agricultura de precisão, ao contribuir para o monitoramento eficiente, a otimização do uso de insumos e a sustentabilidade dos sistemas produtivos. O uso integrado dessa tecnologia fortalece a tomada de decisão no campo e amplia as possibilidades de inovação no agronegócio (Júnior; Nuñez, 2024).

5. Integração de drones, inteligência artificial e sistemas de suporte à decisão

A integração entre drones, inteligência artificial e sistemas de suporte à decisão representa um avanço significativo na consolidação da agricultura de precisão, ao articular coleta de dados, processamento automatizado e apoio estratégico ao manejo agrícola. Essa convergência tecnológica permite transformar grandes volumes de dados espaciais em informações úteis para a tomada de decisão no campo (Chagas; Zamberlan, 2025). Os drones atuam como plataformas eficientes de aquisição de dados, fornecendo imagens aéreas de alta resolução espacial e temporal. Quando integradas a sistemas computacionais avançados, essas imagens alimentam modelos analíticos capazes de

interpretar padrões produtivos e ambientais, ampliando a capacidade de diagnóstico das lavouras (Mendes *et al.*, 2025).

A inteligência artificial desempenha papel central nesse processo ao permitir a análise automatizada de imagens e dados coletados por drones. Técnicas de aprendizado de máquina e deep learning possibilitam a identificação de padrões complexos associados ao desenvolvimento das culturas, à ocorrência de pragas e doenças e às variações ambientais (Neto; Rosa; Nuñez, 2024). No contexto da agricultura de precisão, a aplicação da inteligência artificial contribui para a detecção precoce de anomalias nas lavouras. Algoritmos treinados a partir de bases de dados espectrais conseguem reconhecer alterações sutis no vigor vegetativo, favorecendo intervenções antecipadas e mais eficientes no manejo agrícola (Silva *et al.*, 2025).

Os sistemas de suporte à decisão utilizam os resultados gerados pela inteligência artificial para auxiliar produtores e gestores na escolha das melhores estratégias de manejo. Esses sistemas integram dados históricos, informações climáticas e análises espaciais, fornecendo recomendações fundamentadas para irrigação, adubação e controle fitossanitário (Chagas; Zamberlan, 2025; Santos; Ferreira; Ferreira, 2023). A integração entre drones e sistemas de suporte à decisão também contribui para o planejamento agrícola em diferentes escalas temporais. A análise contínua das imagens permite acompanhar a evolução das culturas ao longo do ciclo produtivo, apoiar o planejamento da colheita e otimizar a logística agrícola (Damasceno; Martins, 2025).

No manejo de pragas e plantas daninhas, a associação entre drones e inteligência artificial tem possibilitado o desenvolvimento de sistemas de identificação automática e mapeamento de áreas infestadas. Essa abordagem favorece o controle localizado, reduzindo o uso indiscriminado de defensivos e promovendo práticas agrícolas mais sustentáveis (Barão; Cavichioli, 2024; Neto; Rosa; Nuñez, 2024). A integração tecnológica também amplia a capacidade de avaliação da produtividade agrícola, ao utilizar modelos preditivos baseados em dados espectrais e históricos de produção. Essas estimativas contribuem para decisões relacionadas à comercialização, ao armazenamento e à gestão econômica das propriedades rurais (Hoss *et al.*, 2020).

Outro aspecto relevante refere-se à automação dos processos de monitoramento agrícola. Sistemas integrados permitem que a coleta, o processamento e a análise dos dados ocorram de forma contínua e com mínima intervenção humana, aumentando a eficiência operacional e a confiabilidade das informações geradas (Balabenute; Filho,

2024; Júnior; Nuñez, 2024). Entretanto, a efetividade dessa integração depende da qualidade dos dados coletados e da robustez dos modelos de inteligência artificial utilizados. Dados inconsistentes, imagens mal calibradas ou algoritmos inadequados podem comprometer as análises e gerar recomendações imprecisas (Barbosa *et al.*, 2024; Oliveira *et al.*, 2020).

A interoperabilidade entre plataformas, softwares e sistemas de suporte à decisão constitui outro desafio importante. A diversidade de soluções tecnológicas disponíveis no mercado pode dificultar a integração dos dados e limitar a construção de sistemas unificados de gestão agrícola (Cavalcanti *et al.*, 2025; Moraes *et al.*, 2024). Além dos desafios técnicos, a adoção de sistemas integrados exige capacitação dos usuários para interpretar os resultados gerados pela inteligência artificial e confiar nas recomendações dos sistemas de suporte à decisão. A formação técnica adequada é fundamental para garantir o uso efetivo dessas tecnologias no manejo agrícola (Gonçalves; Cavichioli, 2021; Jesus; Peres, 2023).

Os aspectos legais e éticos relacionados ao uso de inteligência artificial e à gestão de dados agrícolas também merecem atenção. A definição de responsabilidades, a proteção das informações e a transparência dos sistemas são elementos essenciais para a consolidação dessas tecnologias no setor agrícola (Cavalcanti *et al.*, 2025). Dessa forma, a integração entre drones, inteligência artificial e sistemas de suporte à decisão configura-se como um dos pilares mais avançados da agricultura de precisão. Ao articular tecnologia, análise de dados e planejamento estratégico, essa convergência fortalece a eficiência produtiva, a sustentabilidade e a inovação no manejo agrícola contemporâneo (Balabenute; Filho, 2024).

6. Benefícios, desafios e aspectos legais do uso de drones no campo

O uso de drones na agricultura de precisão tem proporcionado benefícios expressivos ao manejo agrícola, sobretudo pela ampliação da capacidade de monitoramento e diagnóstico das lavouras. A obtenção de imagens aéreas de alta resolução permite intervenções mais rápidas e localizadas, contribuindo para maior eficiência produtiva e redução de perdas (Gonçalves; Cavichioli, 2021). Entre os principais benefícios produtivos, destaca-se a otimização do uso de insumos agrícolas. A identificação precisa de áreas com estresse ou baixa produtividade possibilita a aplicação localizada de fertilizantes, defensivos e água, reduzindo custos operacionais e impactos

ambientais associados ao manejo convencional (Assaiante; Cavichioli, 2020; Barão; Cavichioli, 2024).

Os drones também contribuem para a sustentabilidade ambiental ao favorecer práticas agrícolas mais racionais. A redução do uso indiscriminado de agroquímicos e a minimização de intervenções desnecessárias no campo alinham o uso dessa tecnologia aos princípios da agricultura sustentável e da produção responsável (Balabenute; Filho, 2024). Outro benefício relevante refere-se à agilidade na tomada de decisão. A rapidez na coleta e no processamento dos dados permite respostas quase imediatas a problemas identificados nas lavouras, fortalecendo a capacidade de gestão do produtor frente a eventos inesperados, como surtos de pragas ou estresses climáticos (Mendes *et al.*, 2025). Do ponto de vista econômico, a utilização de drones pode representar uma alternativa viável aos métodos tradicionais de monitoramento, especialmente em grandes áreas agrícolas. A redução de custos com mão de obra, deslocamento e levantamentos extensivos contribui para a viabilidade financeira da tecnologia no médio e longo prazo (Jesus; Peres, 2023).

Apesar dos benefícios, a adoção de drones no campo enfrenta desafios técnicos importantes. A operação adequada dos equipamentos exige conhecimento específico relacionado ao planejamento de voo, calibração de sensores e processamento das imagens, o que pode limitar o uso da tecnologia por produtores sem capacitação técnica (Moraes *et al.*, 2024; Cavalcante *et al.*, 2022). Outro desafio refere-se aos custos iniciais de aquisição dos drones, sensores e softwares necessários para análise dos dados. Esses investimentos podem representar barreiras significativas, especialmente para pequenos produtores e agricultores familiares, restringindo o acesso à agricultura de precisão (Reips; Gubert, 2019). As condições climáticas também influenciam diretamente a eficiência do uso de drones no campo. Ventos fortes, chuvas e variações na luminosidade podem comprometer a qualidade das imagens e limitar a realização de voos, exigindo planejamento criterioso das operações (Hoss *et al.*, 2020; Damasceno; Martins, 2025).

No que se refere aos aspectos legais, o uso de drones na agricultura está sujeito a regulamentações específicas relacionadas à segurança do espaço aéreo, ao registro das aeronaves e à habilitação dos operadores. O cumprimento dessas normas é essencial para garantir a legalidade das operações e evitar sanções administrativas (Cavalcanti *et al.*, 2025). A legislação também estabelece limites operacionais, como altura máxima de voo, distância visual do operador e restrições em áreas próximas a zonas urbanas ou sensíveis.

Essas exigências podem impactar a flexibilidade do uso dos drones, especialmente em propriedades localizadas próximas a áreas regulamentadas (Pessi *et al.*, 2020). Além das normas de voo, aspectos relacionados à proteção de dados e à privacidade ganham relevância com a intensificação do uso de drones no campo. A coleta de imagens e informações georreferenciadas exige cuidados quanto ao armazenamento, ao compartilhamento e ao uso ético dos dados agrícolas (Moraes *et al.*, 2024; Oliveira; Fernandes; Júnior, 2025).

A aceitação social do uso de drones também constitui um desafio, especialmente em regiões onde há desconhecimento sobre a tecnologia ou receios relacionados à vigilância e ao uso indevido das imagens. A transparência no uso da tecnologia e a comunicação adequada com as comunidades rurais são fundamentais para ampliar sua aceitação (Jesus; Peres, 2023). Apesar dos desafios, observa-se um avanço gradual na regulamentação e na disseminação do uso de drones no agronegócio brasileiro. O aumento da oferta de serviços especializados e o desenvolvimento de soluções mais acessíveis tendem a ampliar a adoção dessa tecnologia nos próximos anos (Júnior; Nuñez, 2024). Assim, os benefícios, desafios e aspectos legais do uso de drones no campo evidenciam que essa tecnologia apresenta elevado potencial para transformar o manejo agrícola, desde que sua adoção seja acompanhada por capacitação técnica, planejamento operacional e respeito às normas vigentes. A consolidação do uso de drones na agricultura de precisão depende da articulação entre inovação tecnológica, sustentabilidade e segurança jurídica no meio rural (Moraes *et al.*, 2024).

7. Conclusão

Os drones e as imagens multiespectrais consolidam-se como ferramentas estratégicas da agricultura de precisão, ao ampliarem significativamente a capacidade de monitoramento, diagnóstico e intervenção nos sistemas produtivos agrícolas. Ao longo deste capítulo, evidenciou-se que o uso dessas tecnologias possibilita uma compreensão mais detalhada das variabilidades espaciais e temporais das lavouras, favorecendo decisões técnicas mais precisas e orientadas por dados. A análise dos fundamentos do uso de drones destacou sua evolução tecnológica, flexibilidade operacional e potencial para aquisição de dados em alta resolução espacial. Essas características tornam os drones instrumentos eficientes para o acompanhamento contínuo das culturas, superando

limitações dos métodos tradicionais de monitoramento e fortalecendo práticas agrícolas mais eficientes.

As imagens multiespectrais e os índices de vegetação demonstraram-se essenciais para a avaliação do vigor vegetativo, da sanidade das culturas e da produtividade potencial. A capacidade de transformar informações espectrais em indicadores agrônômicos objetivos reforça o papel dessas ferramentas no manejo localizado e na otimização do uso de insumos agrícolas. As aplicações práticas dos drones no manejo agrícola evidenciaram sua versatilidade em diferentes culturas e sistemas produtivos, abrangendo desde o monitoramento do desenvolvimento vegetal até a detecção de pragas, doenças e plantas daninhas. Essas aplicações contribuem para intervenções mais rápidas, redução de perdas produtivas e maior sustentabilidade ambiental.

A integração entre drones, inteligência artificial e sistemas de suporte à decisão representa um avanço relevante para a agricultura de precisão, ao permitir a automatização das análises e a geração de recomendações técnicas fundamentadas. Essa convergência tecnológica amplia a eficiência da gestão agrícola e fortalece a agricultura orientada por dados. Entretanto, o capítulo também evidenciou que a adoção de drones no campo envolve desafios técnicos, econômicos e legais. Custos de aquisição, necessidade de capacitação especializada, limitações operacionais e exigências regulatórias ainda constituem barreiras à ampla disseminação dessa tecnologia, especialmente entre pequenos produtores.

Diante desse cenário, a consolidação do uso de drones e imagens multiespectrais na agricultura de precisão depende de estratégias integradas que articulem inovação tecnológica, formação profissional, políticas públicas e segurança jurídica. Quando incorporadas de forma planejada e responsável, essas tecnologias apresentam elevado potencial para fortalecer a eficiência produtiva, a sustentabilidade e a competitividade do agronegócio contemporâneo.

Referências Bibliográficas

- ASSAIANTE, B. A. S.; CAVICHIOLI, F. A. A utilização de veículos aéreos não tripulados (VANT) na cultura da cana-de-açúcar. **Revista Interface Tecnológica**, v. 17, n. 1, p. 444-455, 2020.
- BALABENUTE, B.; FILHO, J. L. IA e drones na agricultura: inovação e sustentabilidade no agronegócio. **Revista Interface Tecnológica**, v. 21, n. 2, p. 236-247, 2024.
- BARÃO, J. A.; CAVICHIOLI, F. A. Como os drones estão revolucionando o manejo de pragas na agricultura. **Revista Interface Tecnológica**, v. 21, n. 2, p. 484-495, 2024.
- BARBOSA, W. *et al.* Comparação de três diferentes sensores espectrais na produção de NDVI e NDRE para agricultura de precisão. **Revista Ciência Agrícola**, v. 22, n. especial, 2024.
- CAVALCANTE, W. S. S. *et al.* Tecnologias e inovações no uso de drones na agricultura. **Brazilian Journal of Development**, v. 8, n. 1, p. 7108-7117, 2022.
- CAVALCANTI, R. C. *et al.* Drones no georreferenciamento rural: tendências atuais e perspectivas futuras. **Revista de Gestão e Secretariado**, v. 16, n. 3, p. e4603-e4603, 2025.
- CHAGAS, E. S.; ZAMBERLAN, M. F. Modelos de sistemas de suporte à decisão para agricultura de precisão: aplicações no monitoramento climático e predição de rendimento agrícola. **ARACÊ**, v. 7, n. 11, p. e10310, 2025.
- DAMASCENO, C. E.; MARTINS, A. P. Viabilidade do uso de drones no monitoramento de cultivos de soja: estudo comparativo em Jataí-GO. **Sociedade & Natureza**, v. 37, p. e76004, 2025.
- GONÇALVES, V. P.; CAVICHIOLI, F. A. Estudo das funcionalidades dos drones na agricultura. **Revista Interface Tecnológica**, v. 18, n. 1, p. 321-331, 2021.
- HOSS, D. F. *et al.* Imagens aéreas multiespectrais para avaliação da cultura do milho. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 44, p. e004920, 2020.
- JESUS, L. C.; PERES, W. L. R. Os impactos da utilização de drones na Agricultura. **Revista Contemporânea**, v. 3, n. 11, p. 22713-22736, 2023.
- JÚNIOR, J. C. A.; NUÑEZ, D. N. C. O uso de drones na agricultura 4.0. **Brazilian Journal of Science**, v. 3, n. 1, p. 1-13, 2024.
- MENDES, W. R. *et al.* Sensoriamento Remoto Aplicado ao Monitoramento Agrícola e Ambiental. **Revista de Gestão e Secretariado**, v. 16, n. 6, p. e4874, 2025.
- MORAES, L. R. *et al.* Benefícios, desafios e legislações para utilização de drones na produção agrícola: uma revisão da literatura. **Revista Multidisciplinar do Nordeste Mineiro**, v. 3, n. 3, 2024.

NETO, A. R. F.; ROSA, M. C.; NUÑEZ, D. N. C. Uso de inteligência artificial na detecção de plantas daninhas. **Brazilian Journal of Science**, v. 3, n. 1, p. 14-27, 2024.

OLIVEIRA, A. J. *et al.* Potencialidades da utilização de drones na agricultura de precisão. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 9, p. 64140-64149, 2020.

OLIVEIRA, E. B.; FERNANDES, V. O.; JÚNIOR, M. J. A. Deep learning: uma revisão sistemática integrativa de suas aplicações em mapeamento utilizando imagens de RPA. **Rev. Bras. Cartogr**, v. 77, 2025.

PESSI, D. D. *et al.* Aeronaves remotamente pilotadas e suas aplicações no manejo agrícola e ambiental. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, v. 37, n. 2, p. e26605, 2020.

REIPS, L.; GUBERT, L. C. Drones como ferramenta de apoio para agricultores do Rio Grande do Sul. **Revista UFG**, v. 19, 2019.

RESENDE, D. B. *et al.* Uso de imagens tomadas por aeronaves remotamente pilotadas para detecção da cultura do milho infestada por *Spodoptera frugiperda*. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 1, p. 156-166, 2020.

RIBATSKI, E. O.; SANTOS, F. S.; NETO, F. N. Review of uses of RPAs in the agricultural scenario. **Brazilian Journal of Technology**, v. 1, n. 2, p. 313-333, 2018.

SANTOS, O. L.; PADOLFI, A. S.; RAMALDES, G. P. Análise de índice de vegetação através de imagens obtidas por VANT. **Revista Científica FAESA**, v. 14, n. 1, p. 145-165, 2018.

SERRANO, J.; MORAL, F. J. Índice global de produtividade e qualidade das pastagens: Avaliação de sensores na perspectiva da Agricultura de Precisão. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 48, n. 2-3, p. 67-78, 2025.

SILVA, H. F. *et al.* Estimativa de parâmetros biofísicos de capim-sudão (*Sorghum sudanense* L.) por análise espectral a partir de imagens de drone. **Journal of Media Critiques**, v. 11, n. 27, p. e217-e217, 2025.

SOUSA, M. P. *et al.* Avanços e aplicações de drones na gestão de recursos naturais e monitoramento ambiental no semiárido brasileiro. **Revista de Gestão e Secretariado**, v. 15, n. 7, p. e4030, 2024.

SOUZA, L. S. B. *et al.* Análise comparativa entre o NDVI obtido por imagens multiespectrais e visíveis (RGB) em câmera acoplada em drone em área de videira. **Journal of Hyperspectral Remote Sensing**, v. 13, n. 6, p. 741-751, 2023.



CAPÍTULO 4

GEOTECNOLOGIAS E NDVI: ANÁLISE DE PERFORMANCE E PRODUTIVIDADE AGRÍCOLA

Antônio Veimar da Silva

Lucas Santos Campos

Carla Michelle da Silva

1. Introdução

As geotecnologias têm assumido papel central no monitoramento e na gestão dos sistemas agrícolas, ao possibilitar a análise espacial e temporal da vegetação, do uso do solo e dos recursos naturais. O avanço do sensoriamento remoto, aliado ao geoprocessamento e às plataformas digitais, tem ampliado a capacidade de avaliação do desempenho agrícola, contribuindo para uma agricultura mais eficiente e orientada por dados (Botteon, 2016; Silva; Cavichioli, 2023). Nesse contexto, os índices de vegetação destacam-se como ferramentas essenciais para a interpretação das informações espectrais obtidas por sensores orbitais e aerotransportados. Esses índices permitem sintetizar dados complexos em indicadores capazes de representar o estado fisiológico da vegetação, sendo amplamente utilizados na análise de desempenho e produtividade agrícola (Souza; Filho, 2021; Trentin *et al.*, 2021).

O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) é um dos mais difundidos e utilizados na agricultura de precisão, em razão de sua simplicidade, robustez e aplicabilidade em diferentes escalas espaciais e temporais. O NDVI baseia-se na relação entre a reflectância no vermelho e no infravermelho próximo, permitindo inferir o vigor vegetativo e a densidade da cobertura vegetal (Rêgo *et al.*, 2012). A aplicação do NDVI tem se mostrado eficaz no monitoramento do ciclo fenológico das culturas, na avaliação da qualidade de pastagens e na análise da dinâmica da vegetação ao longo do tempo. Estudos evidenciam sua utilidade tanto em ambientes agrícolas quanto em ecossistemas naturais, reforçando seu papel como indicador-chave de performance vegetal (Andrade *et al.*, 2023).

Além do monitoramento, o NDVI tem sido amplamente empregado na estimativa de produtividade agrícola, especialmente quando integrado a modelos agrometeorológicos e a dados multitemporais. Essa abordagem permite correlacionar padrões espectrais com rendimento das culturas, contribuindo para o planejamento agrícola e a tomada de decisão estratégica (Andrade *et al.*, 2014). O avanço das plataformas de processamento em nuvem e o acesso a imagens multissensores, como Landsat, Sentinel e MODIS, ampliaram significativamente o uso do NDVI em estudos agrícolas. Ferramentas como o Google Earth Engine possibilitam análises em larga escala, integração de séries temporais e aplicação de geotecnologias tanto em grandes propriedades quanto na agricultura familiar (Brexó; Mattos; Suszek, 2023; Martini; Teixeira, 2024).

Apesar de suas potencialidades, o uso do NDVI apresenta limitações relacionadas à influência do solo exposto, à saturação do índice em áreas com alta biomassa e às condições atmosféricas. Esses fatores exigem cautela na interpretação dos resultados e, em muitos casos, a comparação com outros índices de vegetação ou a integração com dados complementares (Bezerra *et al.*, 2022; Mussama; Rodovalho; Albieri, 2025). Assim, o objetivo do presente capítulo é analisar o uso das geotecnologias e do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) na avaliação da performance e da produtividade agrícola, destacando seus fundamentos, aplicações, potencialidades e limitações no contexto da agricultura de precisão e do monitoramento ambiental.

2. Geotecnologias aplicadas à agricultura e ao monitoramento ambiental

As geotecnologias compreendem um conjunto de técnicas e ferramentas voltadas à coleta, processamento, análise e representação de informações espaciais, desempenhando papel estratégico na agricultura moderna. A integração entre sensoriamento remoto, sistemas de informação geográfica e bases de dados espaciais tem ampliado a capacidade de monitoramento e planejamento das atividades agrícolas e ambientais (Botteon, 2016; Silva; Cavichioli, 2023). No contexto agrícola, as geotecnologias possibilitam a análise detalhada do uso e ocupação do solo, do comportamento da vegetação e das dinâmicas ambientais ao longo do tempo. Essa abordagem favorece a compreensão das variabilidades espaciais e temporais que influenciam diretamente a performance produtiva das culturas (Mussama; Rodovalho; Albieri, 2025).

O sensoriamento remoto constitui a base técnica das geotecnologias aplicadas à agricultura, ao permitir a obtenção de informações sobre a superfície terrestre por meio de sensores orbitais e aerotransportados. Imagens de satélite e de aeronaves remotamente pilotadas fornecem dados multiespectrais que subsidiam análises agrícolas em diferentes escalas espaciais (Batista; Pegoraro, 2019). Os sistemas de informação geográfica (SIG) complementam o sensoriamento remoto ao possibilitar a organização, o cruzamento e a análise espacial dos dados coletados. A utilização de SIG permite integrar informações ambientais, climáticas e produtivas, apoiando o planejamento agrícola, a gestão territorial e a tomada de decisão no campo (Leonardo *et al.*, 2021).

Plataformas digitais de acesso livre, como ambientes de processamento em nuvem, têm ampliado significativamente o uso das geotecnologias na agricultura. Ferramentas como o Google Earth Engine possibilitam análises multitemporais e multissensores, reduzindo barreiras técnicas e ampliando o acesso às informações geoespaciais (Brexó; Mattos; Suszek, 2023; Martini; Teixeira, 2024). A aplicação das geotecnologias no monitoramento ambiental permite acompanhar alterações na cobertura vegetal, identificar processos de degradação e avaliar impactos antrópicos sobre os ecossistemas. Essas análises são fundamentais para a gestão sustentável dos recursos naturais e para o cumprimento de políticas ambientais (Moura *et al.*, 2024; Mussama; Rodovalho; Albieri, 2025).

No âmbito da agricultura de precisão, as geotecnologias favorecem o manejo localizado ao identificar áreas com diferentes padrões de produtividade e condição

ambiental. Essa abordagem contribui para a otimização do uso de insumos, redução de custos e mitigação de impactos ambientais associados às práticas agrícolas convencionais (Sousa; Giongo, 2022; Silva; Cavichioli, 2023). As geotecnologias também desempenham papel relevante no monitoramento de sistemas pecuários e pastagens, permitindo avaliar a qualidade da cobertura vegetal e a dinâmica da biomassa ao longo do tempo. O uso de imagens multitemporais contribui para o planejamento do manejo forrageiro e a sustentabilidade dos sistemas de produção animal (Conceição *et al.*, 2021; Andrade *et al.*, 2023).

Em regiões semiáridas, a aplicação das geotecnologias assume importância ainda maior, devido à variabilidade climática e à sensibilidade dos ecossistemas. O uso de dados orbitais permite acompanhar a resposta da vegetação às condições climáticas adversas e apoiar estratégias de adaptação e mitigação (Bezerra *et al.*, 2022; Leonardo *et al.*, 2021). Além das aplicações produtivas, as geotecnologias têm sido utilizadas em estudos e perícias ambientais, auxiliando na identificação de áreas degradadas, no acompanhamento de processos de recuperação e na análise de conformidade ambiental. Essas aplicações reforçam o caráter interdisciplinar das geotecnologias no contexto agrícola e ambiental (Botteon, 2016; Moura *et al.*, 2024). A integração de diferentes sensores e plataformas amplia a confiabilidade das análises geotecnológicas, ao permitir a comparação e a validação cruzada dos dados obtidos. A utilização conjunta de imagens Landsat, Sentinel e MODIS, por exemplo, possibilita análises mais robustas da dinâmica da vegetação e do desempenho agrícola (Bezerra *et al.*, 2022; Trentin *et al.*, 2021).

Apesar de seus avanços, o uso das geotecnologias na agricultura enfrenta desafios relacionados à capacitação técnica, à qualidade dos dados e à interpretação adequada das informações espaciais. A efetividade dessas ferramentas depende da articulação entre conhecimento técnico, planejamento metodológico e compreensão do contexto agrônomo (Martini; Teixeira, 2024; Sousa; Giongo, 2022). Assim, as geotecnologias aplicadas à agricultura e ao monitoramento ambiental configuram-se como instrumentos fundamentais para a análise da performance agrícola e a gestão sustentável dos recursos naturais. Seu uso estratégico fortalece a agricultura orientada por dados, contribuindo para sistemas produtivos mais eficientes, resilientes e ambientalmente responsáveis (Silva; Cavichioli, 2023;).

3. Índices de vegetação e fundamentos do NDVI

Os índices de vegetação constituem ferramentas fundamentais no âmbito do sensoriamento remoto aplicado à agricultura, pois permitem quantificar e interpretar o comportamento espectral da vegetação a partir de dados obtidos por sensores orbitais e aerotransportados. Esses índices sintetizam informações complexas em parâmetros numéricos que representam o vigor, a densidade e o estado fisiológico das plantas (Trentin *et al.*, 2021). O princípio dos índices de vegetação baseia-se na interação da radiação eletromagnética com a vegetação, especialmente nas bandas do vermelho e do infravermelho próximo. Plantas saudáveis absorvem fortemente a radiação no vermelho para a fotossíntese e refletem intensamente no infravermelho próximo, comportamento que sustenta a formulação matemática desses índices (Rêgo *et al.*, 2012; Ribeiro; Silva; Silva, 2016).

Entre os diversos índices existentes, o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) destaca-se como o mais amplamente utilizado em estudos agrícolas e ambientais. Sua simplicidade de cálculo, robustez e ampla disponibilidade de dados o tornam um indicador eficiente para análises em diferentes escalas espaciais e temporais (Rêgo *et al.*, 2012; Trentin *et al.*, 2021). O NDVI é calculado a partir da razão normalizada entre a reflectância do infravermelho próximo e do vermelho, resultando em valores que variam entre -1 e +1. Valores mais elevados indicam maior vigor vegetativo, enquanto valores baixos ou negativos estão associados a solos expostos, corpos d'água ou vegetação degradada (Souza; Filho, 2021).

Na agricultura de precisão, o NDVI tem sido amplamente empregado para avaliar o estado das culturas ao longo do ciclo fenológico. A análise temporal desse índice permite acompanhar o crescimento das plantas, identificar estágios de desenvolvimento e detectar alterações no desempenho vegetativo associadas a estresses ambientais ou de manejo (Araujo *et al.*, 2025). O uso do NDVI também se destaca no monitoramento de pastagens e sistemas pecuários, permitindo avaliar a qualidade da cobertura vegetal, a disponibilidade de biomassa e a dinâmica sazonal da vegetação. Essas informações são essenciais para o planejamento do manejo forrageiro e para a sustentabilidade dos sistemas de produção animal (Conceição *et al.*, 2021; Andrade *et al.*, 2023). Apesar de sua ampla aplicabilidade, o NDVI apresenta limitações que devem ser consideradas na interpretação dos resultados. A influência do solo exposto, especialmente em áreas com

baixa cobertura vegetal, pode interferir nos valores do índice, reduzindo sua sensibilidade em determinadas condições (Ribeiro; Silva; Silva, 2016).

Outro desafio refere-se à saturação do NDVI em áreas com alta densidade de biomassa, onde o índice tende a perder sensibilidade para discriminar variações no vigor vegetativo. Essa limitação tem motivado o desenvolvimento e a utilização de índices alternativos ou complementares em determinadas situações (Ribeiro; Silva; Silva, 2016; Souza; Filho, 2021). Nesse contexto, índices como o SAVI e o IVAS foram propostos para minimizar a influência do solo e melhorar a interpretação em áreas com cobertura vegetal esparsa. A comparação entre diferentes índices permite análises mais robustas e adequadas às características específicas das áreas agrícolas monitoradas (Rêgo *et al.*, 2012). A escolha do sensor e da resolução espacial também influencia diretamente a qualidade das análises baseadas em NDVI. Sensores como Landsat, Sentinel e MODIS apresentam diferentes resoluções e frequências temporais, o que impacta a aplicação do índice em estudos locais ou regionais (Bezerra *et al.*, 2022; Trentin *et al.*, 2021).

A utilização de séries temporais de NDVI tem se mostrado uma abordagem eficiente para analisar a dinâmica da vegetação ao longo do tempo. Essa estratégia permite identificar tendências, padrões sazonais e mudanças no uso e cobertura do solo, contribuindo para o monitoramento contínuo da performance agrícola (Brexó; Mattos; Suszek, 2023). Em regiões semiáridas, o NDVI assume papel estratégico no acompanhamento da resposta da vegetação às variações climáticas, especialmente à disponibilidade hídrica. A análise espectral nessas áreas contribui para a identificação de processos de degradação e para o planejamento de ações de manejo sustentável (Bezerra *et al.*, 2022; Mussama; Rodovalho; Albieri, 2025). Assim, os índices de vegetação, com destaque para o NDVI, configuram-se como ferramentas essenciais na análise da performance agrícola e da dinâmica da vegetação. Seu uso integrado a outras geotecnologias amplia a capacidade de monitoramento, planejamento e tomada de decisão no contexto da agricultura de precisão e da gestão ambiental sustentável (Souza; Filho, 2021).

4. NDVI na análise de performance agrícola e dinâmica da vegetação

O NDVI tem sido amplamente utilizado como indicador de performance agrícola por permitir a avaliação indireta do vigor vegetativo e da biomassa das culturas ao longo do tempo. A variação espacial e temporal desse índice reflete diferenças no

desenvolvimento das plantas, tornando-se uma ferramenta eficaz para monitorar a dinâmica da vegetação em sistemas agrícolas (Andrade *et al.*, 2023). Na análise de performance agrícola, o NDVI possibilita identificar áreas com desempenho diferenciado dentro de uma mesma lavoura. Essas variações podem estar associadas a fatores como fertilidade do solo, disponibilidade hídrica, práticas de manejo e incidência de estresses bióticos ou abióticos, fornecendo subsídios para o manejo localizado (Souza; Filho, 2021; Rêgo *et al.*, 2012).

O acompanhamento temporal do NDVI ao longo do ciclo fenológico das culturas permite compreender a dinâmica do crescimento vegetal e identificar períodos críticos de desenvolvimento. Essa abordagem favorece a avaliação da resposta das culturas às condições climáticas e às intervenções agronômicas, contribuindo para o planejamento produtivo (Araujo *et al.*, 2025). Em sistemas agrícolas intensivos, o NDVI tem sido empregado para monitorar a evolução da cobertura vegetal e a eficiência das práticas de manejo adotadas. A comparação de séries temporais possibilita avaliar impactos de diferentes estratégias produtivas sobre o desempenho das culturas (Leda; Golçalves; Lima, 2019). O uso do NDVI também se destaca na análise da dinâmica da vegetação em sistemas pecuários e pastagens. A variação do índice ao longo do tempo reflete mudanças na disponibilidade de forragem e na qualidade da cobertura vegetal, auxiliando no planejamento do manejo animal e na sustentabilidade dos sistemas de produção (Conceição *et al.*, 2021).

Em ambientes naturais e agrícolas, o NDVI permite acompanhar processos de degradação e recuperação da vegetação. A redução persistente dos valores do índice pode indicar degradação do solo ou estresse ambiental, enquanto o aumento gradual sugere processos de regeneração vegetal, contribuindo para a gestão ambiental (Mussama; Rodovalho; Albieri, 2025; Sousa; Giongo, 2022). A análise multitemporal do NDVI tem sido facilitada pelo acesso a plataformas de processamento em nuvem, que permitem integrar dados de diferentes sensores e períodos. Essa integração amplia a capacidade de análise da dinâmica da vegetação em escalas regionais e locais, fortalecendo o monitoramento agrícola contínuo (Brexó; Mattos; Suszek, 2023; Manoel; Queiroz; Rosa, 2025).

O NDVI também tem sido aplicado na caracterização da vegetação de diferentes biomas, permitindo comparar padrões de desempenho vegetal em distintos contextos ambientais. Estudos indicam que o índice é sensível às variações sazonais e climáticas, refletindo a dinâmica ecológica de cada bioma monitorado (Trentin *et al.*, 2021; Bezerra

et al., 2022). No contexto do semiárido, o NDVI assume relevância especial para a análise da resposta da vegetação às variações na disponibilidade hídrica. A sensibilidade do índice às mudanças climáticas contribui para o acompanhamento de períodos de seca e para o planejamento de estratégias de adaptação agrícola (Bezerra *et al.*, 2022; Leonardo *et al.*, 2021).

A interpretação do NDVI na análise de performance agrícola deve considerar fatores externos que influenciam os valores do índice, como cobertura do solo, estágio fenológico das culturas e condições atmosféricas. A análise isolada do índice pode levar a interpretações equivocadas, reforçando a importância de abordagens integradas (Souza; Filho, 2021). A integração do NDVI com outras informações agronômicas, como dados climáticos e de solo, amplia a confiabilidade da análise de performance agrícola. Essa abordagem integrada favorece diagnósticos mais precisos e decisões mais eficazes no manejo das culturas (Fuzzo, 2018; Andrade *et al.*, 2014). Assim, o NDVI se consolida como uma ferramenta central na análise da performance agrícola e da dinâmica da vegetação, ao permitir o acompanhamento contínuo do desenvolvimento das culturas e dos sistemas vegetais. Seu uso estratégico contribui para o manejo mais eficiente, sustentável e orientado por dados, fortalecendo a agricultura de precisão e a gestão ambiental (Andrade *et al.*, 2023).

5. NDVI e estimativa de produtividade agrícola

A estimativa de produtividade agrícola a partir do NDVI tem se consolidado como uma abordagem eficiente para antecipar o desempenho das culturas e apoiar o planejamento produtivo. A relação entre o vigor vegetativo, representado pelo índice, e o rendimento das culturas permite estabelecer modelos que auxiliam na previsão de safras e na tomada de decisão no contexto da agricultura de precisão (Andrade *et al.*, 2014; Leda; Golçalves; Lima, 2019). O uso do NDVI na estimativa de produtividade baseia-se na correlação entre a reflectância da vegetação e parâmetros biofísicos, como biomassa, índice de área foliar e taxa fotossintética. Esses parâmetros estão diretamente associados ao potencial produtivo das culturas, tornando o índice um indicador indireto do rendimento agrícola (Ribeiro; Silva; Silva, 2016).

Em culturas como cana-de-açúcar, o NDVI tem sido amplamente utilizado para estimar produtividade e monitorar o desenvolvimento vegetativo ao longo do ciclo produtivo. Estudos demonstram que séries temporais do índice apresentam forte

correlação com dados de produção, especialmente quando integradas a modelos agrometeorológicos (Andrade *et al.*, 2014). Na cultura da soja, o NDVI tem sido empregado no acompanhamento do ciclo fenológico e na previsão de rendimento agrícola. A análise multitemporal do índice permite identificar períodos críticos de desenvolvimento e avaliar o impacto de variáveis climáticas sobre a produtividade final (Araujo *et al.*, 2025; Fuzzo, 2018). O uso de dados NDVI derivados de sensores orbitais, como Landsat, Sentinel e MODIS, amplia a possibilidade de estimativas de produtividade em escalas regionais e nacionais. A disponibilidade contínua dessas imagens favorece análises comparativas e o monitoramento sistemático das culturas ao longo de diferentes safras (Trentin *et al.*, 2021).

Em sistemas pecuários, o NDVI também tem sido utilizado para estimar a produtividade de pastagens e a disponibilidade de forragem. A correlação entre valores do índice e a biomassa vegetal permite planejar o manejo animal e avaliar a sustentabilidade dos sistemas de produção (Andrade *et al.*, 2023). A integração do NDVI com modelos agrometeorológicos aprimora a estimativa de produtividade agrícola, ao incorporar variáveis climáticas como temperatura, precipitação e radiação solar. Essa abordagem integrada reduz incertezas e aumenta a precisão das previsões, especialmente em ambientes com alta variabilidade climática (Fuzzo, 2018; Andrade *et al.*, 2014). O avanço das geotecnologias e das plataformas de processamento em nuvem tem facilitado a aplicação do NDVI na modelagem de produtividade agrícola. Ferramentas como o Google Earth Engine permitem o processamento de grandes volumes de dados espectrais e a construção de modelos preditivos em diferentes escalas espaciais (Brexó; Mattos; Suszek, 2023; Manoel; Queiroz; Rosa, 2025).

A incorporação de técnicas de inteligência artificial aos modelos baseados em NDVI tem ampliado o potencial de previsão de produtividade. Algoritmos de aprendizado de máquina conseguem identificar padrões complexos entre dados espectrais e rendimento agrícola, contribuindo para previsões mais robustas (Barros; Freitas, 2023; Manoel; Queiroz; Rosa, 2025). Apesar de suas vantagens, a estimativa de produtividade agrícola a partir do NDVI apresenta limitações relacionadas à saturação do índice em áreas com alta biomassa e à influência do solo exposto em estágios iniciais das culturas. Essas limitações exigem ajustes metodológicos e, em alguns casos, a combinação com outros índices de vegetação (Ribeiro; Silva; Silva, 2016; Rêgo *et al.*, 2012). A escala espacial e temporal dos dados utilizados também influencia a precisão das estimativas de produtividade. Sensores

com diferentes resoluções podem apresentar resultados distintos, sendo necessário adequar a escolha do sensor aos objetivos da análise e às características da área monitorada (Bezerra *et al.*, 2022).

A validação dos modelos de estimativa de produtividade baseados em NDVI é etapa fundamental para garantir a confiabilidade dos resultados. A comparação entre estimativas espectrais e dados de campo permite ajustar os modelos e aumentar sua aplicabilidade prática no planejamento agrícola (Andrade *et al.*, 2014). Assim, o NDVI se afirma como uma ferramenta estratégica para a estimativa de produtividade agrícola, ao possibilitar análises antecipadas do desempenho das culturas e apoiar decisões técnicas e econômicas no campo. Seu uso integrado a dados climáticos, geotecnologias e modelos analíticos fortalece a agricultura de precisão e contribui para sistemas produtivos mais eficientes e sustentáveis (Souza; Filho, 2021; Andrade *et al.*, 2023).

6. Limitações, desafios e perspectivas do uso de NDVI na agricultura

Apesar de sua ampla utilização, o NDVI apresenta limitações que devem ser consideradas para evitar interpretações equivocadas na análise da performance e da produtividade agrícola. Uma das principais restrições do índice está relacionada à influência do solo exposto, especialmente em áreas com baixa cobertura vegetal, o que pode reduzir a sensibilidade do indicador nos estágios iniciais das culturas (Rêgo *et al.*, 2012; Ribeiro; Silva; Silva, 2016). A saturação do NDVI em áreas com alta densidade de biomassa constitui outro desafio relevante. Em lavouras bem desenvolvidas ou em florestas densas, o índice tende a atingir valores máximos e perde capacidade de discriminar variações no vigor vegetativo, limitando sua eficiência para análises mais detalhadas nesses contextos (Trentin *et al.*, 2021). As condições atmosféricas também influenciam os valores do NDVI, uma vez que a presença de nuvens, aerossóis e variações na iluminação pode comprometer a qualidade das imagens utilizadas no cálculo do índice. Esses fatores exigem procedimentos de correção atmosférica e seleção criteriosa das imagens para garantir a confiabilidade das análises (Souza; Filho, 2021).

Outro desafio refere-se à dependência da resolução espacial e temporal dos sensores utilizados. Sensores com baixa resolução espacial podem não captar variações intra-parcela, enquanto aqueles com menor frequência temporal pode limitar o acompanhamento contínuo do ciclo das culturas (Bezerra *et al.*, 2022). A interpretação do NDVI também demanda conhecimento agronômico específico, uma vez que valores

semelhantes do índice podem representar condições distintas dependendo do estágio fenológico, da espécie cultivada e do sistema de manejo adotado. A análise isolada do índice pode levar a conclusões simplificadas sobre o desempenho agrícola (Souza; Filho, 2021; Andrade *et al.*, 2023).

A variabilidade espectral entre diferentes culturas e biomas constitui outro fator limitante para a aplicação generalizada do NDVI. O comportamento espectral da vegetação varia conforme as características fisiológicas das plantas e as condições ambientais, exigindo ajustes metodológicos para cada contexto analisado (Trentin *et al.*, 2021; Mussama; Rodovalho; Albieri, 2025). Do ponto de vista operacional, o uso do NDVI pode enfrentar desafios relacionados ao acesso a dados de qualidade e à infraestrutura tecnológica necessária para o processamento das imagens. Em regiões com limitações técnicas ou de conectividade, essas barreiras podem restringir o uso contínuo das geotecnologias na agricultura (Martini; Teixeira, 2024; Silva; Cavichioli, 2023). A validação dos resultados obtidos por meio do NDVI representa outro desafio importante, uma vez que a confiabilidade das análises depende da comparação com dados de campo. A ausência de medições *in situ* pode comprometer a precisão das estimativas e reduzir a aplicabilidade prática dos modelos baseados no índice (Leda; Golçalves; Lima, 2019).

Diante dessas limitações, a utilização do NDVI tem evoluído para abordagens integradas, que combinam diferentes índices de vegetação, dados climáticos e informações de solo. Essa integração amplia a robustez das análises e contribui para diagnósticos mais precisos da performance agrícola (Rêgo *et al.*, 2012). As perspectivas futuras para o uso do NDVI na agricultura estão associadas ao avanço das plataformas de processamento em nuvem e à integração com modelos analíticos mais sofisticados. O acesso facilitado a grandes volumes de dados espectrais tende a ampliar o uso do índice em análises regionais e nacionais (Brexó; Mattos; Suszek, 2023).

A incorporação de inteligência artificial aos estudos baseados em NDVI representa uma tendência promissora, ao permitir a identificação de padrões complexos e a melhoria das previsões de desempenho e produtividade agrícola. Essas abordagens ampliam o potencial do índice como ferramenta de apoio à decisão (Barros; Freitas, 2023). No contexto da agricultura familiar e sustentável, o uso de geotecnologias de acesso livre associadas ao NDVI apresenta grande potencial de democratização da agricultura de precisão. A disponibilidade de dados gratuitos e ferramentas abertas pode ampliar o acesso às análises espectrais, fortalecendo práticas produtivas mais eficientes e inclusivas

(Martini; Teixeira, 2024; Sousa; Giongo, 2022). Assim, embora o NDVI apresente limitações técnicas e metodológicas, suas perspectivas de uso na agricultura permanecem amplas e promissoras. A integração com outras geotecnologias, índices complementares e modelos analíticos avançados tende a fortalecer seu papel na análise de performance e produtividade agrícola, contribuindo para uma agricultura cada vez mais orientada por dados e sustentável (Souza; Filho, 2021).

7. Conclusão

As geotecnologias consolidam-se como instrumentos essenciais para a análise da performance e da produtividade agrícola, ao possibilitar o monitoramento contínuo da vegetação, do uso do solo e das dinâmicas ambientais em diferentes escalas espaciais e temporais. Ao longo deste capítulo, evidenciou-se que a integração entre sensoriamento remoto, geoprocessamento e plataformas digitais amplia significativamente a capacidade de planejamento e gestão dos sistemas produtivos.

O NDVI destacou-se como um dos principais indicadores espectrais utilizados na agricultura de precisão, devido à sua simplicidade, robustez e ampla aplicabilidade. Sua utilização permite avaliar o vigor vegetativo, acompanhar o ciclo fenológico das culturas e analisar a dinâmica da vegetação, contribuindo para diagnósticos mais precisos sobre o desempenho agrícola. A aplicação do NDVI na estimativa de produtividade demonstrou-se especialmente relevante para o planejamento agrícola e a tomada de decisão antecipada. A correlação entre o índice e parâmetros biofísicos das culturas possibilita previsões de rendimento mais eficientes, sobretudo quando o NDVI é integrado a dados climáticos, séries temporais e modelos analíticos.

Entretanto, o capítulo também evidenciou que o uso do NDVI apresenta limitações técnicas e metodológicas que exigem cautela na interpretação dos resultados. Fatores como influência do solo, saturação do índice, condições atmosféricas e resolução dos sensores podem afetar a confiabilidade das análises, reforçando a necessidade de abordagens integradas e validação com dados de campo.

As perspectivas futuras para o uso do NDVI na agricultura apontam para a ampliação de sua integração com outras geotecnologias, índices complementares e técnicas de inteligência artificial. Essas tendências indicam um avanço contínuo rumo a sistemas agrícolas cada vez mais orientados por dados, capazes de promover maior eficiência produtiva, sustentabilidade ambiental e inclusão tecnológica. Dessa forma, as

geotecnologias e o NDVI afirmam-se como ferramentas estratégicas para a agricultura contemporânea, ao apoiar a análise da performance e da produtividade agrícola de maneira integrada e sistêmica. Quando utilizadas de forma planejada e articulada, essas tecnologias contribuem para o fortalecimento da agricultura de precisão e para a construção de sistemas produtivos mais resilientes e sustentáveis.

Referências Bibliográficas

- ANDRADE, R. G. *et al.* Estimativa da produtividade da cana-de-açúcar utilizando o Sebal e imagens Landsat. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 29, p. 433-442, 2014.
- ANDRADE, R. G. *et al.* Monitoramento e avaliação qualitativa de pastagens a partir de dados NDVI/MODIS. **Revista Contemporânea**, v. 3, n. 11, p. 23441-23460, 2023.
- ANDRADE, R. G. *et al.* Uso de aeronave remotamente pilotada (arp) na estimativa de altura, cobertura e massa de forragem de *Urochloa Ruziziensis*. **Revista Ciência Agrícola**, v. 22, p. e16236, 2024.
- ARAUJO, R. W. O. *et al.* Utilização de imageamento multiespectral por satélite para monitoramento de ciclo fenológico da cultura da soja. **Boletim de Conjuntura**, v. 23, n. 67, p. 197-224, 2025.
- BARROS, P. H. B.; FREITAS, A. M. Combinando Inteligência Artificial e imagens de satélite para a previsão de sinistros agrícolas: Uma nota. **Revista Brasileira de Economia**, v. 77, p. e012023, 2023.
- BATISTA, F. L.; PEGORARO, A. J. Utilização de sistemas de aeronaves remotamente pilotadas na agricultura de precisão. **Revista Geonorte**, v. 10, n. 34, p. 129-152, 2019.
- BEZERRA, A. C. *et al.* Como os Produtos MODIS têm sido Utilizados para Análise dos Parâmetros Biofísicos em Regiões Semiáridas? Uma Revisão Bibliométrica e de Literatura. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 74, 2022.
- BOTTEON, V. W. Aplicabilidade de ferramentas de geotecnologia para estudos e perícias ambientais. **Revista brasileira de criminalística**, v. 5, n. 1, p. 7-13, 2016.
- BREXÓ, E. A.; MATTOS, L. M.; SUSZEK, G. Caracterização de uso e ocupação do solo na região do vale do Ivinhema-MS utilizando a plataforma Google Earth Engine. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, v. 6, n. 1, p. 251-263, 2023.
- CONCEIÇÃO, M. P. C. *et al.* Avaliação temporal de sistemas pecuários usando o índice de vegetação ndvi derivado de imagens landsat. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, v. 4, n. 1, p. 1451-1463, 2021.
- DAMASCENO, C. E.; MARTINS, A. P. Viabilidade do uso de drones no monitoramento de cultivos de soja: estudo comparativo em Jataí-GO. **Sociedade & Natureza**, v. 37, p. e76004, 2025.
- FUZZO, D. F. S. Modelagem agrometeorológica espectral adaptada por meio do método do triângulo simplificado para cultura da soja no estado do Paraná-Brasil. **Ra'e Ga**, n. 44, p. 154-169, 2018.
- LEDA, V. C.; GOLÇALVES, A. K.; LIMA, N. S. Sensoriamento remoto aplicado a modelagem de produtividade da cultura da cana-de-açúcar. **Energia na Agricultura**, v. 34, n. 2, p. 263-270, 2019.

- LEONARDO, H. R. A. L. *et al.* Geotecnologia aplicada no monitoramento da Bacia Hidrográfica GI4 no submédio do rio São Francisco. **Journal of Hyperspectral Remote Sensing**, v. 11, n. 5, p. 271, 2021.
- MANOEL, M. C.; QUEIROZ, A. P.; ROSA, M. R. Integração de imagens multitemporais e multissensores para mapeamento de café com google earth engine. **Revista da ANPEGE**, v. 21, n. 44, 2025.
- MARTINI, L. C. P.; TEIXEIRA, M. S. Geotecnologias de acesso livre aplicáveis à agricultura familiar de precisão. **Revista Brasileira de Geomática**, v. 12, n. 2, p. 197-218, 2024.
- MOURA, A. G. A. F. *et al.* Identificação de Infraestruturas de Exploração Florestal em Uma Área de Manejo Sustentável por Meio de Imagens OLI/Landsat 8 e MSI/Sentinel-2. **Revista Cereus**, v. 16, n. 2, p. 381-406, 2024.
- MUSSAMA, I. T.; RODOVALHO, S. A.; ALBIERI, L. Aplicação de geotecnologias à detecção de mudanças na cobertura vegetal no distrito de Gilé, província da Zambézia, Moçambique. **Cadernos de Ensino, Ciências & Tecnologia**, v. 6, n. 1, 2025.
- RÊGO, S. C. A. *et al.* Análise comparativa dos índices de vegetação NDVI e SAVI no município de São Domingos do Cariri-PB. **Revista geonorte**, v. 3, n. 5, p. 1217-1229, 2012.
- RIBEIRO, G. A.; SILVA, J. N. C.; SILVA, J. B. Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (IVAS): estado da arte e suas potencialidades. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 9, n. 06, p. 2054-2074, 2016.
- SILVA, P. A. S.; CAVICHIOLI, F. A. Uso das tecnologias agrícolas no Brasil. **Revista Interface Tecnológica**, v. 20, n. 2, p. 813-825, 2023.
- SOUSA, L. F. A.; GIONGO, P. R. Revisão de literatura: Uso do geoprocessamento na avaliação da degradação de pastagens. **Revista Sapiência: sociedade, saberes e práticas educacionais**, v. 11, n. 1, p. 1-16, 2022.
- SOUZA, S. M.; FILHO, A. C. P. Índices de vegetação aplicados á identificação de tipos de cultura. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação**, 2021.
- TRENTIN, C. B. *et al.* Características da Vegetação dos Biomas Pampa e Cerrado Monitorados por NDVI. **Revista Geoaraguaia**, v. 11, n. 1, p. 69-84, 2021.



CAPÍTULO 5

FERRAMENTAS DIGITAIS E BIOTECNOLÓGICAS NA GESTÃO DA SAÚDE DO SOLO

Carla Michelle da Silva

Airton Kleber Gomes Matos

Antônio Veimar da Silva

1. Introdução

A saúde do solo é um dos pilares da sustentabilidade agrícola, pois influencia diretamente a produtividade, a eficiência do uso de insumos e a resiliência dos sistemas produtivos frente às mudanças ambientais. O manejo inadequado pode comprometer atributos físicos, químicos e biológicos do solo, tornando essencial o uso de estratégias baseadas em monitoramento contínuo e tomada de decisão qualificada (Camilo-Cotrim *et al.*, 2022; Viola; Mendes, 2022). Nas últimas décadas, a agricultura tem passado por uma profunda transformação impulsionada pela digitalização e pela incorporação de tecnologias avançadas. Ferramentas digitais, associadas à agricultura 4.0, ampliam a capacidade de coleta, análise e interpretação de dados, permitindo diagnósticos mais precisos das condições do solo e apoiando práticas de manejo mais sustentáveis (Massruhá; Leite, 2016; Araujo; Junior; Santana, 2024).

O uso de geotecnologias, softwares de apoio à decisão e métodos multivariados tem se destacado no diagnóstico de áreas agrícolas sob diferentes usos e manejos. Essas ferramentas possibilitam integrar múltiplos indicadores de qualidade do solo, oferecendo uma visão sistêmica dos impactos das práticas agrícolas sobre a saúde edáfica (Alves *et al.*, 2020; Alves; Demattê; Barros, 2015). Paralelamente ao avanço das ferramentas digitais, as biotecnologias têm assumido papel estratégico na gestão da saúde do solo. O uso de bioinsumos, biofertilizantes e microrganismos benéficos contribui para a melhoria da fertilidade, da estrutura do solo e da ciclagem de nutrientes, reduzindo a dependência de insumos químicos convencionais (Sousa *et al.*, 2025; Sausen *et al.*, 2021).

A biotecnologia ambiental também se destaca na recuperação de solos degradados ou contaminados, por meio de processos de biorremediação e práticas sustentáveis de manejo. Essas abordagens reforçam o papel do solo como componente central dos serviços ecossistêmicos e da mitigação de impactos ambientais associados à atividade agrícola (Cavinatto *et al.*, 2025; Soares *et al.*, 2025). A integração entre ferramentas digitais e biotecnológicas favorece uma gestão mais inteligente e adaptativa do solo, alinhada aos princípios da agricultura sustentável. Sistemas automatizados, plataformas digitais e soluções desenvolvidas por AgTechs ampliam o acesso a tecnologias inovadoras, transformando a dinâmica produtiva e os processos de tomada de decisão no campo (Bambini; Bonacelli, 2024; Júnior; Sordi, 2019).

Apesar dos avanços, a adoção dessas tecnologias enfrenta desafios relacionados à capacitação técnica, aos custos de implementação e à adaptação às diferentes realidades produtivas. A superação dessas barreiras é fundamental para que os benefícios das ferramentas digitais e biotecnológicas alcancem tanto grandes propriedades quanto a agricultura familiar (Schlegel; Poletto, 2019; Júnior *et al.*, 2024). Assim, o objetivo do presente capítulo é analisar o papel das ferramentas digitais e biotecnológicas na gestão da saúde do solo, destacando suas aplicações no diagnóstico, monitoramento, recuperação e manejo sustentável dos sistemas agrícolas, bem como os desafios e perspectivas associados à sua adoção no contexto da agricultura contemporânea.

2. Saúde do solo e indicadores de qualidade em sistemas agrícolas

A saúde do solo pode ser compreendida como a capacidade contínua desse recurso em desempenhar suas funções ecológicas, produtivas e ambientais, sustentando a produtividade agrícola e a qualidade dos ecossistemas. Solos saudáveis favorecem o

desenvolvimento das culturas, a ciclagem de nutrientes e a regulação hídrica, constituindo a base para sistemas agrícolas sustentáveis (Camilo-Cotrim *et al.*, 2022; Sausen *et al.*, 2021). O conceito de saúde do solo vai além da fertilidade química, incorporando atributos físicos, biológicos e ecológicos que interagem de forma integrada. A degradação de qualquer um desses componentes compromete o funcionamento do solo como sistema vivo, impactando negativamente a produtividade e a resiliência dos agroecossistemas (Matos, 2011; Sousa *et al.*, 2025).

Os indicadores de qualidade do solo são ferramentas essenciais para avaliar seu estado e orientar práticas de manejo adequadas. Esses indicadores permitem diagnosticar alterações causadas pelo uso intensivo, pela mecanização inadequada e pela aplicação excessiva de insumos, subsidiando estratégias de recuperação e conservação (Camilo-Cotrim *et al.*, 2022; Alves *et al.*, 2020). Os indicadores físicos do solo incluem atributos como densidade, porosidade, estrutura e capacidade de retenção de água. Esses parâmetros influenciam diretamente o crescimento radicular, a infiltração da água e a aeração do solo, sendo fortemente afetados pelas práticas de preparo e manejo adotadas nos sistemas agrícolas (Alves *et al.*, 2020; Alves; Demattê; Barros, 2015).

Os indicadores químicos estão relacionados à disponibilidade de nutrientes, ao pH, à matéria orgânica e à capacidade de troca catiônica do solo. Esses atributos condicionam a nutrição das plantas e a eficiência do uso de fertilizantes, sendo fundamentais para a manutenção da produtividade agrícola a longo prazo (Camilo-Cotrim *et al.*, 2022; Reis *et al.*, 2025). Os indicadores biológicos, por sua vez, avaliam a atividade e a diversidade dos organismos do solo, como microrganismos, fungos e fauna edáfica. Esses organismos desempenham papel central na decomposição da matéria orgânica, na ciclagem de nutrientes e na melhoria da estrutura do solo, refletindo diretamente sua saúde e funcionalidade (Sousa *et al.*, 2025; Sausen *et al.*, 2021).

A integração de múltiplos indicadores é fundamental para uma avaliação mais completa da qualidade do solo. Análises isoladas podem não captar a complexidade dos processos edáficos, enquanto abordagens integradas permitem identificar interações entre atributos físicos, químicos e biológicos. Ferramentas multivariadas têm sido amplamente utilizadas para interpretar conjuntos complexos de indicadores de qualidade do solo. Essas abordagens estatísticas possibilitam identificar padrões, agrupar áreas com características semelhantes e avaliar o impacto de diferentes usos e manejos sobre a saúde do solo (Alves; Demattê; Barros, 2015). O monitoramento contínuo da qualidade do

solo é essencial para acompanhar a evolução dos sistemas agrícolas ao longo do tempo. Avaliações periódicas permitem identificar tendências de degradação ou recuperação, orientando ajustes nas práticas de manejo e contribuindo para a sustentabilidade produtiva (Júnior *et al.*, 2024).

A saúde do solo também está diretamente relacionada à mitigação dos impactos das mudanças climáticas. Solos com maior teor de matéria orgânica apresentam maior capacidade de sequestro de carbono e maior resiliência a eventos climáticos extremos, como secas e chuvas intensas (Viola; Mendes, 2022; Soares *et al.*, 2025). Em sistemas agrícolas tropicais, a avaliação da saúde do solo assume relevância ainda maior devido à elevada intensidade de uso e à vulnerabilidade desses ambientes à degradação. A adoção de indicadores adequados às condições locais é fundamental para o manejo sustentável dos solos tropicais (Alves; Demattê; Barros, 2015; Reis *et al.*, 2025). Assim, a utilização de indicadores de qualidade do solo configura-se como estratégia indispensável para a gestão sustentável dos sistemas agrícolas. Ao fornecer informações integradas sobre o estado físico, químico e biológico do solo, esses indicadores subsidiam decisões mais eficientes, promovendo a conservação do solo, a produtividade agrícola e a sustentabilidade ambiental (Sausen *et al.*, 2021).

3. Ferramentas digitais aplicadas ao diagnóstico e mapeamento do solo

As ferramentas digitais têm ampliado de forma significativa as possibilidades de diagnóstico e mapeamento do solo, ao integrar dados espaciais, análises estatísticas e plataformas computacionais avançadas. Essas soluções permitem compreender a variabilidade dos atributos do solo em diferentes escalas, contribuindo para práticas de manejo mais eficientes e sustentáveis (Araujo; Junior; Santana, 2024). O mapeamento digital de solos destaca-se como uma das principais aplicações das ferramentas digitais na agricultura contemporânea. Essa abordagem utiliza modelos matemáticos e estatísticos para estimar propriedades do solo a partir da integração de dados ambientais, topográficos e espectrais, ampliando a precisão das análises edáficas (Alves; Demattê; Barros, 2015; Alves *et al.*, 2020).

A utilização de sensoriamento remoto e geotecnologias tem sido fundamental para o diagnóstico de áreas agrícolas sob diferentes usos e manejos. Imagens de satélite e dados espaciais permitem identificar padrões de degradação, compactação e variações na fertilidade do solo, apoiando o planejamento agrícola e ambiental (Silva; Cavichioli, 2023).

Ferramentas de análise multivariada têm sido amplamente empregadas para interpretar conjuntos complexos de dados do solo. Essas técnicas permitem identificar relações entre variáveis físicas, químicas e biológicas, contribuindo para diagnósticos mais robustos e para a definição de zonas de manejo específicas (Alves; Demattê; Barros, 2015). O avanço das plataformas digitais de processamento e visualização de dados tem facilitado o acesso às informações de solo por produtores e técnicos. Softwares e sistemas de apoio à decisão permitem integrar dados de campo e informações geoespaciais, tornando o diagnóstico do solo mais ágil e acessível (Gonçalves; Schlindwein, 2025; Schlegel; Poletto, 2019).

A agricultura digital e a agricultura 4.0 impulsionaram o desenvolvimento de soluções automatizadas para o monitoramento do solo. Sensores, sistemas de coleta de dados e plataformas inteligentes ampliam a capacidade de acompanhar alterações nos atributos do solo em tempo quase real (Brusadin; Alves; Cavichioli, 2023; Bolignani; Filho, 2024). As ferramentas digitais também têm sido utilizadas para mapear a adoção tecnológica no agronegócio, evidenciando a disseminação de soluções digitais voltadas à gestão do solo. Esses estudos permitem compreender os padrões de uso das tecnologias e identificar fatores que influenciam sua adoção nos sistemas produtivos (Barros; Neto, 2024). No contexto da agricultura familiar, o acesso a ferramentas digitais de baixo custo e plataformas abertas tem ampliado as possibilidades de diagnóstico do solo. Soluções digitais acessíveis contribuem para a democratização da agricultura de precisão e para a inclusão produtiva de pequenos agricultores (Massruhá; Leite, 2016; Sausen *et al.*, 2021).

A integração entre ferramentas digitais e bancos de dados ambientais possibilita análises históricas do uso e da ocupação do solo. Essa abordagem favorece a identificação de tendências de degradação ou recuperação, auxiliando no planejamento de práticas conservacionistas e no uso sustentável do recurso solo (Viola; Mendes, 2022). O desenvolvimento de softwares específicos para a tomada de decisão no setor agropecuário tem ampliado a eficiência da gestão do solo. Essas ferramentas utilizam dados integrados para gerar recomendações técnicas, apoiando o manejo adequado e a conservação dos atributos edáficos (Gonçalves; Schlindwein, 2025).

Apesar dos avanços, o uso de ferramentas digitais no diagnóstico do solo enfrenta desafios relacionados à qualidade dos dados, à interoperabilidade entre sistemas e à capacitação dos usuários. A interpretação inadequada das informações pode comprometer as decisões de manejo, reforçando a importância da formação técnica (Brusadin; Alves; Cavichioli, 2023; Bolignani; Filho, 2024). Assim, as ferramentas digitais

aplicadas ao diagnóstico e mapeamento do solo configuram-se como componentes centrais da gestão moderna da saúde do solo. Quando utilizadas de forma integrada e planejada, essas tecnologias contribuem para diagnósticos mais precisos, manejo eficiente e sustentabilidade dos sistemas agrícolas (Araujo; Junior; Santana, 2024; Bambini; Bonacelli, 2024).

4. Agricultura 4.0, automação e gestão inteligente do solo

A Agricultura 4.0 representa a incorporação integrada de tecnologias digitais avançadas aos sistemas produtivos, promovendo maior automação, conectividade e inteligência na gestão agrícola. No contexto do solo, essa abordagem amplia a capacidade de monitoramento contínuo, diagnóstico preciso e tomada de decisão baseada em dados, fortalecendo práticas sustentáveis (Júnior *et al.*, 2024). A automação agrícola constitui um dos pilares da Agricultura 4.0, ao integrar sensores, máquinas e plataformas digitais capazes de coletar e processar informações em tempo real. Essa automação permite acompanhar variações nos atributos do solo, como umidade e compactação, favorecendo ajustes dinâmicos no manejo (Brusadin; Alves; Cavichioli, 2023).

A gestão inteligente do solo depende da integração entre diferentes fontes de dados, incluindo informações de campo, sensoriamento remoto e análises laboratoriais. Sistemas digitais consolidam esses dados em plataformas únicas, permitindo diagnósticos mais completos sobre a saúde edáfica e orientando práticas de manejo mais eficientes (Alves; Demattê; Barros, 2015). O uso de softwares de apoio à decisão tem se destacado na Agricultura 4.0 por transformar dados complexos em recomendações técnicas aplicáveis ao manejo do solo. Esses sistemas auxiliam produtores e técnicos na escolha de práticas conservacionistas, no uso racional de insumos e na prevenção de processos de degradação (Gonçalves; Schlindwein, 2025; Schlegel; Poletto, 2019).

A conectividade e a integração em rede são elementos essenciais para a gestão inteligente do solo. A comunicação entre dispositivos automatizados e plataformas digitais possibilita respostas rápidas às variações ambientais, contribuindo para maior eficiência operacional e redução de impactos negativos sobre o solo (Bambini; Bonacelli, 2024). No cenário da Agricultura 4.0, as AgTechs desempenham papel estratégico ao desenvolver soluções inovadoras para o monitoramento e a gestão do solo. Essas empresas introduzem ferramentas digitais acessíveis e adaptáveis, ampliando a oferta de tecnologias voltadas à sustentabilidade e à produtividade agrícola (Júnior; Sordi, 2019;

Costa *et al.*, 2024). A automação aplicada à gestão do solo também contribui para a padronização das operações agrícolas, reduzindo erros humanos e aumentando a precisão das intervenções. Máquinas e sistemas inteligentes executam práticas de manejo com base em dados atualizados, promovendo maior eficiência no uso dos recursos naturais (Bolignani; Filho, 2024; Araujo; Junior; Santana, 2024).

A Agricultura 4.0 favorece ainda a integração entre gestão do solo e outros componentes do sistema produtivo, como água, nutrientes e culturas. Essa visão sistêmica permite otimizar processos e reduzir desperdícios, fortalecendo a sustentabilidade dos agroecossistemas (Domingues *et al.*, 2020; Júnior *et al.*, 2024). Entretanto, a adoção da automação e da gestão inteligente do solo enfrenta desafios relacionados à infraestrutura tecnológica e à capacitação técnica. A falta de conectividade e de formação adequada pode limitar o uso pleno das ferramentas digitais, especialmente em regiões rurais mais vulneráveis (Schlegel; Poletto, 2019). Outro desafio refere-se aos custos de implementação das tecnologias da Agricultura 4.0, que podem restringir o acesso de pequenos produtores. A democratização dessas ferramentas depende de políticas públicas, modelos de negócio inclusivos e soluções tecnológicas de menor custo (Sausen *et al.*, 2021).

A gestão inteligente do solo também exige atenção à segurança e à confiabilidade dos dados coletados. A integridade das informações é fundamental para garantir decisões adequadas e evitar riscos associados a falhas nos sistemas automatizados (Gonçalves; Schlindwein, 2025). Apesar dos desafios, a Agricultura 4.0 apresenta elevado potencial para transformar a gestão do solo, ao promover maior eficiência, precisão e sustentabilidade. A automação e o uso inteligente dos dados contribuem para a conservação dos atributos edáficos e para a resiliência dos sistemas agrícolas (Viola; Mendes, 2022).

A integração entre Agricultura 4.0 e práticas conservacionistas do solo favorece a adoção de estratégias de manejo mais adaptativas, capazes de responder às mudanças climáticas e às pressões ambientais. Essa integração fortalece o papel do solo como recurso estratégico para a produção sustentável (Viola; Mendes, 2022). Assim, a Agricultura 4.0 e a automação configuram-se como componentes centrais da gestão inteligente do solo, ao articular tecnologia, dados e conhecimento técnico. Quando adotadas de forma planejada e inclusiva, essas abordagens contribuem para a melhoria

da saúde do solo, a eficiência produtiva e a sustentabilidade dos sistemas agrícolas contemporâneos (Araujo; Junior; Santana, 2024).

5. Biotecnologias aplicadas à melhoria e recuperação da saúde do solo

As biotecnologias têm assumido papel estratégico na gestão sustentável da saúde do solo, ao oferecerem soluções baseadas em processos biológicos capazes de melhorar a fertilidade, a estrutura e a funcionalidade edáfica. Essas abordagens contribuem para sistemas agrícolas mais resilientes, reduzindo a dependência de insumos químicos e promovendo o equilíbrio ecológico do solo (Matos, 2011; Sousa et al., 2025).

A aplicação de bioinsumos, como biofertilizantes e inoculantes microbianos, destaca-se entre as principais estratégias biotecnológicas voltadas à melhoria da saúde do solo. Esses produtos atuam na ciclagem de nutrientes, na solubilização de elementos minerais e no estímulo ao crescimento vegetal, favorecendo o desempenho das culturas (Sausen et al., 2021; Reis et al., 2025).

Os microrganismos do solo desempenham funções essenciais na manutenção da qualidade edáfica, sendo responsáveis por processos como decomposição da matéria orgânica e disponibilização de nutrientes. A biotecnologia aplicada busca potencializar esses processos por meio da introdução e do manejo de comunidades microbianas benéficas (Camilo-Cotrim et al., 2022).

A produção e o uso de biofertilizantes sustentáveis têm se destacado como alternativa viável para a melhoria da fertilidade do solo e para a redução de impactos ambientais. Esses insumos contribuem para o aumento do teor de matéria orgânica e para a melhoria da estrutura do solo, fortalecendo sua capacidade produtiva (Soares et al., 2025).

A biorremediação representa uma aplicação relevante da biotecnologia na recuperação de solos contaminados por agrotóxicos e outros poluentes. Por meio do uso de microrganismos capazes de degradar substâncias tóxicas, essa técnica contribui para a restauração da qualidade do solo e para a mitigação de riscos ambientais (Cavinatto et al., 2025).

Além da recuperação química, as biotecnologias também atuam na melhoria das propriedades físicas do solo. A atividade biológica estimula a agregação das partículas do solo, aumentando a porosidade, a infiltração de água e a resistência à erosão, fatores essenciais para a sustentabilidade dos sistemas agrícolas (Camilo-Cotrim et al., 2022).

A biotecnologia ambiental aplicada ao solo também contribui para o sequestro de carbono, fortalecendo o papel do solo como reservatório de carbono orgânico. O aumento da matéria orgânica no solo auxilia na mitigação das mudanças climáticas e na melhoria da resiliência dos agroecossistemas (Viola; Mendes, 2022).

O uso de bioinsumos produzidos on farm tem ganhado destaque como estratégia de manejo biotecnológico do solo. Essa prática permite reduzir custos de produção, valorizar recursos locais e fortalecer a autonomia dos produtores, especialmente em sistemas agrícolas sustentáveis (Spagnol et al., 2023).

A integração entre biotecnologias e ferramentas digitais potencializa a gestão da saúde do solo, ao permitir o monitoramento dos efeitos das práticas biológicas ao longo do tempo. Sistemas digitais auxiliam na avaliação da resposta do solo às intervenções biotecnológicas, favorecendo ajustes no manejo (Alves et al., 2020).

Entretanto, a adoção de biotecnologias no manejo do solo enfrenta desafios relacionados à variabilidade dos ambientes edáficos e à adaptação dos microrganismos às condições locais. A eficácia dessas tecnologias depende de fatores como clima, tipo de solo e práticas de manejo, exigindo abordagens contextualizadas (Sousa et al., 2025; Reis et al., 2025).

Outro desafio refere-se à necessidade de capacitação técnica para o uso adequado das biotecnologias. A compreensão dos processos biológicos envolvidos é fundamental para garantir a eficiência das práticas adotadas e evitar resultados inconsistentes (Sausen et al., 2021; Schlegel; Poletto, 2019).

Apesar desses desafios, observa-se um avanço significativo na pesquisa e no desenvolvimento de soluções biotecnológicas voltadas à saúde do solo. A atuação de AgTechs e centros de pesquisa tem ampliado a oferta de produtos e técnicas inovadoras para o manejo biológico do solo (Costa *et al.*, 2024).

A integração das biotecnologias com práticas conservacionistas e sistemas de produção sustentável fortalece a gestão integrada do solo. Essa abordagem contribui para a manutenção da produtividade agrícola a longo prazo e para a conservação dos recursos naturais (Sausen *et al.*, 2021). Assim, as biotecnologias aplicadas à melhoria e recuperação da saúde do solo configuram-se como instrumentos essenciais para a agricultura contemporânea. Ao promoverem processos biológicos naturais e sustentáveis, essas tecnologias contribuem para a construção de sistemas agrícolas mais eficientes, resilientes e ambientalmente responsáveis (Sousa *et al.*, 2025).

6. Desafios, sustentabilidade e perspectivas futuras na gestão da saúde do solo

A gestão da saúde do solo no contexto da agricultura contemporânea enfrenta desafios complexos, decorrentes da intensificação produtiva, das mudanças climáticas e da pressão crescente sobre os recursos naturais. A degradação do solo compromete sua funcionalidade e exige abordagens integradas que conciliem produtividade agrícola e sustentabilidade ambiental (Camilo-Cotrim *et al.*, 2022). Um dos principais desafios está relacionado ao uso inadequado do solo, caracterizado por práticas de manejo intensivas e pouco conservacionistas. A compactação, a perda de matéria orgânica e a redução da biodiversidade edáfica são consequências recorrentes desses sistemas, demandando estratégias de manejo mais sustentáveis (Matos, 2011; Sausen *et al.*, 2021).

A adoção de ferramentas digitais e biotecnológicas apresenta-se como alternativa promissora para enfrentar esses desafios, ao possibilitar monitoramento contínuo e intervenções mais precisas. Entretanto, a incorporação dessas tecnologias ainda ocorre de forma desigual, refletindo limitações estruturais e socioeconômicas no meio rural (Massruhá; Leite, 2016; Júnior *et al.*, 2024). A sustentabilidade da gestão do solo depende da integração entre práticas agrícolas conservacionistas e o uso inteligente das tecnologias disponíveis. Sistemas que combinam monitoramento digital, automação e biotecnologias favorecem a manutenção dos atributos físicos, químicos e biológicos do solo ao longo do tempo (Sausen *et al.*, 2021). As mudanças climáticas intensificam os desafios associados à saúde do solo, ao aumentar a frequência de eventos extremos, como secas e chuvas intensas. Solos degradados apresentam menor capacidade de adaptação a essas condições, reforçando a necessidade de estratégias que promovam maior resiliência dos sistemas produtivos (Viola; Mendes, 2022).

Outro desafio relevante refere-se à capacitação técnica dos produtores e profissionais envolvidos na gestão do solo. O uso efetivo de ferramentas digitais e biotecnológicas exige conhecimentos específicos para interpretação de dados e aplicação adequada das tecnologias, destacando a importância da formação continuada (Schlegel; Poletto, 2019; Sausen *et al.*, 2021). A sustentabilidade econômica também influencia a adoção dessas tecnologias, especialmente entre pequenos produtores e agricultura familiar. Custos de implementação, acesso à infraestrutura digital e disponibilidade de assistência técnica são fatores determinantes para a democratização da gestão inteligente do solo (Massruhá; Leite, 2016; Júnior *et al.*, 2024). Nesse contexto, políticas públicas e iniciativas institucionais desempenham papel fundamental na promoção da

sustentabilidade do solo. Programas de incentivo à agricultura digital e ao uso de biotecnologias podem reduzir barreiras de acesso e ampliar os benefícios dessas ferramentas para diferentes segmentos do setor agrícola (Bambini; Bonacelli, 2024).

As perspectivas futuras para a gestão da saúde do solo apontam para o avanço da integração entre dados digitais, automação e biotecnologia. A convergência dessas áreas tende a fortalecer sistemas agrícolas mais inteligentes, capazes de responder de forma adaptativa às variações ambientais e produtivas (Araujo; Junior; Santana, 2024). A atuação das AgTechs e de startups voltadas à inovação agrícola contribui para o desenvolvimento de soluções mais acessíveis e adaptáveis à realidade do campo. Essas iniciativas ampliam o portfólio de ferramentas digitais e biotecnológicas disponíveis para a gestão sustentável do solo (Júnior; Sordi, 2019; Costa *et al.*, 2024).

A pesquisa científica continuará desempenhando papel central na superação dos desafios relacionados à saúde do solo. Estudos voltados à avaliação de indicadores, à eficiência das biotecnologias e à integração com ferramentas digitais são fundamentais para aprimorar as práticas de manejo (Alves *et al.*, 2020; Sousa *et al.*, 2025). A adoção de abordagens sistêmicas e interdisciplinares representa uma perspectiva importante para o futuro da gestão do solo. A integração entre conhecimento agrônomo, ambiental e tecnológico favorece soluções mais abrangentes e eficazes para a sustentabilidade dos agroecossistemas (Camilo-Cotrim *et al.*, 2022; Sausen *et al.*, 2021).

Além dos aspectos técnicos, a sustentabilidade da gestão do solo envolve dimensões sociais e territoriais. A valorização do conhecimento local, aliada às inovações tecnológicas, pode fortalecer práticas de manejo adaptadas às realidades regionais e culturais (Schlegel; Poletto, 2019; Massruhá; Leite, 2016). Assim, os desafios e as perspectivas futuras na gestão da saúde do solo indicam a necessidade de estratégias integradas que articulem tecnologia, biotecnologia, capacitação e políticas públicas. A construção de sistemas agrícolas sustentáveis depende da adoção consciente e planejada dessas ferramentas, assegurando a conservação do solo, a produtividade agrícola e a resiliência ambiental a longo prazo (Viola; Mendes, 2022; Bambini; Bonacelli, 2024).

7. Conclusão

A gestão da saúde do solo assume papel estratégico na agricultura contemporânea, especialmente diante dos desafios impostos pela intensificação produtiva, pelas mudanças climáticas e pela necessidade de sistemas agrícolas mais sustentáveis. Ao longo

deste capítulo, evidenciou-se que a conservação e a melhoria dos atributos do solo são fundamentais para garantir produtividade, estabilidade dos agroecossistemas e segurança alimentar. As ferramentas digitais mostraram-se essenciais para o diagnóstico, o monitoramento e o planejamento do manejo do solo, ao possibilitar análises integradas e baseadas em dados espaciais, ambientais e produtivos. O uso de plataformas digitais, softwares de apoio à decisão e sistemas automatizados amplia a capacidade de compreender a variabilidade do solo e de adotar práticas de manejo mais precisas e eficientes.

A Agricultura 4.0 e a automação agrícola reforçam essa transformação ao promover uma gestão inteligente do solo, orientada por dados em tempo real e pela integração entre diferentes tecnologias. Essa abordagem contribui para a otimização do uso de insumos, a redução de impactos ambientais e a padronização de práticas conservacionistas, fortalecendo a sustentabilidade dos sistemas produtivos. As biotecnologias, por sua vez, destacaram-se como aliadas fundamentais na melhoria e na recuperação da saúde do solo. O uso de bioinsumos, biofertilizantes e técnicas de biorremediação evidencia o potencial dos processos biológicos naturais para restaurar a fertilidade, a estrutura e a funcionalidade edáfica, reduzindo a dependência de insumos químicos e promovendo o equilíbrio ecológico.

A integração entre ferramentas digitais e biotecnológicas mostrou-se especialmente promissora, ao permitir o monitoramento contínuo dos efeitos das práticas de manejo e o ajuste dinâmico das estratégias adotadas. Essa convergência tecnológica fortalece uma visão sistêmica do solo como recurso vivo e estratégico para a sustentabilidade agrícola. Entretanto, o capítulo também evidenciou que a adoção dessas tecnologias envolve desafios técnicos, econômicos e formativos, especialmente relacionados à capacitação dos usuários, ao acesso à infraestrutura digital e à adaptação às diferentes realidades produtivas. A superação dessas barreiras é condição essencial para ampliar os benefícios das inovações tecnológicas a todos os segmentos do setor agrícola.

Dessa forma, as ferramentas digitais e biotecnológicas configuram-se como pilares da gestão moderna da saúde do solo, ao promover práticas agrícolas mais eficientes, resilientes e ambientalmente responsáveis. Quando integradas de maneira planejada, inclusiva e orientada pela sustentabilidade, essas tecnologias contribuem decisivamente

para a conservação do solo, a produtividade agrícola e o futuro dos sistemas agroalimentares.

Referências Bibliográficas

- ALVES, M. H. D. *et al.* Diagnóstico de áreas agrícolas sob diferentes usos e manejos com o auxílio de ferramentas multivariadas. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 11, n. 6, p. 13-22, 2020.
- ALVES, M. R.; DEMATTÊ, J. A. M.; BARROS, P. P. S. Múltiplas Ferramentas Tecnológicas no Mapeamento Digital em Solos Tropicais. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, v. 39, n. 5, p. 1261-1274, 2015.
- ARAÚJO, F. B. F.; JUNIOR, O. R. A.; SANTANA, G. G. Tecnologias na agricultura 4.0. **Facit Business and Technology Journal**, v. 1, n. 53, 2024.
- BAMBINI, M. D.; BONACELLI, M. B. M. Revolução digital no setor agropecuário e transformação da dinâmica inovativa: novos atores e relacionamentos. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, p. e27359-e27359, 2024.
- BARROS, L. O.; NETO, M. M. Mapeamento da adoção de ferramentas digitais no agronegócio utilizando a análise de redes sociais. **International Journal of Scientific Management and Tourism**, v. 10, n. 5, p. e1163, 2024.
- BOLIGNANI, E. A.; FILHO, J. L. Integração de tecnologias de automação na agricultura: desafios e oportunidades. **Revista Interface Tecnológica**, v. 21, n. 1, p. 150-159, 2024.
- BRUSADIN, I. E.; ALVES, M. R.; CAVICHIOLI, F. A. O uso da agricultura 4.0. **Revista Interface Tecnológica**, v. 20, n. 1, p. 518-529, 2023.
- CAMILO-COTRIM, C. F. *et al.* Qualidade do solo: relevância e uso de indicadores para o monitoramento. **Revista Agrotecnologia-Agrotec**, v. 13, n. 2, p. 46-65, 2022.
- CAVINATTO, M. *et al.* Biorremediação em Solos Contaminados com Agrotóxicos. **Revista de Gestão e Secretariado**, v. 16, n. 10, p. e5296, 2025.
- COSTA, L. A. *et al.* Startups do pit: tendências tecnológicas e econômicas na região de São José dos Campos-SP. **Revista Técnica Ciências Ambientais**, v. 1, n. 8, p. 1-20, 2024.
- DOMINGUES, A. M. *et al.* Tecnologias da indústria 4.0 como ferramentas disruptivas para auxiliar no reúso da água nas indústrias. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, v. 3, n. 3, p. 1621-1635, 2020.
- GONÇALVES, C. B. Q.; SCHLINDWEIN, M. M. Desenvolvimento de software para a tomada de decisão no setor agropecuário: uma revisão sistemática da literatura. **Multitemas**, 2025.
- JÚNIOR, A. H. S. *et al.* Agricultura digital e a sustentabilidade no campo: status atual e tendências. **International Journal of Agrarian Sciences-PDVAGRO**, v. 4, n. 1, 2024.
- JÚNIOR, P. E. V.; SORDI, V. F. AGTECHS: Tecnologias e focos de negócios. **Encontro Internacional de Gestão, Desenvolvimento e Inovação (EIGEDIN)**, v. 3, n. 1, 2019.

KRUEGER, M. H.; ANDRADE, A. T.; SOARES, C. E. V. F. A indústria 4.0 e suas revoluções nos setores da biotecnologia e agricultura. **Revista OWL-Revista Interdisciplinar de Ensino e Educação**, v. 1, n. 2, p. 223-235, 2023.

MASSRUHÁ, S. M. F. S.; LEITE, M. A. A. Agricultura digital. **Revista Eletrônica Competências Digitais para Agricultura Familiar**, v. 2, n. 1, p. 72-88, 2016.

MATOS, A. K. V. Revolução verde, biotecnologia e tecnologias alternativas. **Cadernos da FUCAMP**, v. 10, n. 12, p. 1-17, 2011.

REIS, A. N. *et al.* Inovações tecnológicas na produção de soja: impactos na produtividade e sustentabilidade. **Revista Novos Desafios**, v. 5, n. 2, p. 01-13, 2025.

SAUSEN, D. *et al.* Tecnologias que auxiliam a produção sustentável de alimentos. **Revista Eletrônica Competências Digitais para Agricultura Familiar**, v. 7, n. 1, p. 16-42, 2021.

SCHLEGEL, G. A.; POLETTTO, A. S. R. S. Smart Agriculture: Estudo Exploratório Sobre A Agricultura Orientada Pela Tecnologia Da Informação E Comunicação. **Revista INTELLECTO**, v. 2596, p. 0806, 2019.

SOARES, Z. T. *et al.* Biotecnologia ambiental aplicada em arecáceas via biofertilizante sustentável, uma alternativa para ao sequestro de carbono. **ARACÊ**, v. 7, n. 4, p. 16339-16362, 2025.

SOUSA, N. K. R. *et al.* Biotecnologia na agricultura: Uma revisão narrativa. **Research, Society and Development**, v. 14, n. 9, p. e5014949446, 2025.

SPAGNOL, F. *et al.* Relação entre índice de vegetação da cultura da soja a partir da produção de bioinsumos on farm manejados com pó de rocha basáltica. **Tecnologia e gestão da inovação em sistemas de produção sustentáveis**, p. 36-52, 2023.

VIOLA, E.; MENDES, V. Agricultura 4.0 e mudanças climáticas no Brasil. **Ambiente & Sociedade**, v. 25, p. e02462, 2022.



CAPÍTULO 6

BIOINDICADORES E DEGRADAÇÃO DO SOLO: DIAGNÓSTICO E MANEJO SUSTENTÁVEL

Antônio Veimar da Silva

Airton Kleber Gomes Matos

Carla Michelle da Silva

1. Introdução

A degradação do solo configura-se como um dos principais desafios ambientais e produtivos da agricultura contemporânea, resultante do uso intensivo da terra, da mecanização inadequada e da substituição de práticas conservacionistas por sistemas exploratórios. Esse processo compromete a funcionalidade do solo, afetando sua capacidade produtiva e os serviços ecossistêmicos associados (Souza, 2020; Oliveira *et al.*, 2023).

A perda da qualidade do solo impacta diretamente a produtividade agrícola, a biodiversidade edáfica e o equilíbrio ambiental, refletindo-se em problemas como erosão, compactação, redução da matéria orgânica e diminuição da atividade biológica. Tais impactos tornam indispensável o desenvolvimento de métodos eficientes de diagnóstico capazes de identificar precocemente os processos de degradação (Silva *et al.*, 2021). Nesse contexto, os bioindicadores emergem como ferramentas fundamentais para a avaliação da

qualidade do solo, por refletirem alterações físicas, químicas e, sobretudo, biológicas do ambiente edáfico. Diferentemente de indicadores puramente laboratoriais, os bioindicadores respondem de forma integrada às mudanças no uso e manejo do solo (Araújo; Monteiro, 2007).

Os organismos edáficos, como microrganismos, mesofauna e macrofauna, apresentam elevada sensibilidade às condições ambientais, sendo amplamente utilizados como indicadores da saúde do solo. Alterações na diversidade, abundância e atividade desses organismos fornecem informações valiosas sobre o grau de degradação ou recuperação dos ambientes agrícolas (Andréa, 2010). Além da fauna do solo, atributos biológicos como respiração edáfica, atividade microbiana e biomarcadores enzimáticos têm sido empregados no diagnóstico ambiental. Esses parâmetros permitem avaliar o funcionamento biológico do solo e identificar impactos decorrentes de práticas agrícolas inadequadas ou de processos de contaminação (Alencar; Sandes; Silva, 2018).

Os bioindicadores também desempenham papel relevante no monitoramento de áreas degradadas e em processos de recuperação ambiental. Sua aplicação em diferentes sistemas de uso da terra, como pastagens, monocultivos e sistemas agroflorestais, contribui para a avaliação da sustentabilidade e da eficácia das práticas de manejo adotadas (Rovedder *et al.*, 2009; Junqueira *et al.*, 2013).

O uso de bioindicadores no manejo sustentável do solo está alinhado aos princípios da agroecologia e da conservação ambiental, ao favorecer práticas que promovem a biodiversidade edáfica e a resiliência dos sistemas produtivos. Essa abordagem reforça a importância do solo como recurso vivo e estratégico para a sustentabilidade agrícola (Trindade-Santos; Castro, 2021). Portanto, o objetivo deste capítulo é analisar o papel dos bioindicadores no diagnóstico da degradação do solo e no apoio ao manejo sustentável, destacando sua aplicação na avaliação da qualidade edáfica, na identificação de impactos ambientais e no monitoramento de processos de recuperação em diferentes sistemas de uso da terra.

2. Degradação do solo: conceitos, causas e impactos ambientais

A degradação do solo pode ser definida como o conjunto de processos físicos, químicos e biológicos que reduzem a capacidade do solo de desempenhar suas funções produtivas, ecológicas e ambientais. Esse fenômeno compromete a sustentabilidade dos sistemas agrícolas e representa uma das principais ameaças aos recursos naturais em

áreas rurais e periurbanas (Souza, 2020). Entre os principais processos associados à degradação do solo destacam-se a erosão, a compactação, a salinização, a acidificação e a perda de matéria orgânica. Esses processos atuam de forma isolada ou combinada, alterando a estrutura, a fertilidade e a atividade biológica do solo, com impactos diretos sobre a produtividade agrícola (Silva *et al.*, 2021; Valentini; Abreu; Faria, 2015).

A agricultura intensiva figura como uma das principais causas da degradação do solo, especialmente quando associada ao uso excessivo de insumos químicos, à mecanização inadequada e à ausência de práticas conservacionistas. Esses fatores aceleram a perda de nutrientes e a redução da biodiversidade edáfica, tornando o solo mais suscetível à degradação (Souza, 2020; Oliveira *et al.*, 2023). O manejo inadequado de pastagens também contribui significativamente para a degradação do solo, sobretudo em áreas submetidas ao superpastejo e à ausência de rotação de culturas. A compactação e a exposição do solo aumentam a erosão e reduzem sua capacidade de infiltração de água, comprometendo o equilíbrio do sistema (Martins *et al.*, 2023; Simões *et al.*, 2018). A degradação do solo não se restringe aos sistemas agrícolas, estendendo-se às bacias hidrográficas e aos ecossistemas aquáticos. A erosão e o transporte de sedimentos afetam a qualidade da água e intensificam processos de assoreamento, impactando negativamente os recursos hídricos (Gaspar *et al.*, 2016; Moraes *et al.*, 2019).

Os impactos ambientais da degradação do solo incluem a redução da biodiversidade, a perda de serviços ecossistêmicos e o comprometimento da regulação do ciclo hidrológico. Solos degradados apresentam menor capacidade de retenção de água e de sequestro de carbono, intensificando os efeitos das mudanças climáticas (Silva *et al.*, 2021). Do ponto de vista produtivo, a degradação do solo resulta em queda de produtividade e aumento dos custos de produção, uma vez que solos degradados demandam maior uso de corretivos e fertilizantes para manter níveis mínimos de rendimento agrícola (Souza, 2020; Camilo-Cotrim *et al.*, 2022). A degradação edáfica também possui implicações sociais e econômicas, afetando a segurança alimentar e a renda de produtores rurais. Em regiões dependentes da agricultura, a perda da qualidade do solo pode intensificar processos de vulnerabilidade socioeconômica e êxodo rural (Oliveira *et al.*, 2023).

Em áreas de agricultura intensiva, como o setor sucroenergético, os impactos da degradação do solo tornam-se ainda mais evidentes. A repetição de ciclos produtivos sem manejo adequado compromete a estrutura do solo e reduz sua capacidade de regeneração

natural (Oliveira *et al.*, 2023; Silva *et al.*, 2021). A identificação precoce da degradação do solo é fundamental para a adoção de medidas corretivas e preventivas. Métodos de diagnóstico que considerem indicadores físicos, químicos e biológicos permitem compreender a intensidade e a extensão dos processos degradativos (Araújo; Monteiro, 2007).

Nesse contexto, a utilização de bioindicadores tem se mostrado uma estratégia eficaz para avaliar a degradação do solo, uma vez que organismos edáficos e processos biológicos respondem rapidamente às alterações ambientais. Esses indicadores complementam análises tradicionais e oferecem uma visão integrada da qualidade do solo (Back *et al.*, 2025). Nesse sentido, compreender os conceitos, as causas e os impactos da degradação do solo é essencial para o desenvolvimento de estratégias de manejo sustentável. A adoção de práticas conservacionistas e o uso de ferramentas de diagnóstico adequadas são fundamentais para reverter processos degradativos e garantir a sustentabilidade dos sistemas agrícolas e ambientais (Souza, 2020; Trindade-Santos; Castro, 2021).

3. Bioindicadores de qualidade do solo: fundamentos teóricos

Os bioindicadores de qualidade do solo constituem ferramentas fundamentais para a compreensão do funcionamento dos ecossistemas edáficos, pois refletem de forma integrada as condições físicas, químicas e biológicas do ambiente. Diferentemente de indicadores pontuais, os bioindicadores respondem às alterações no uso e manejo do solo, permitindo avaliações mais sensíveis e dinâmicas da qualidade edáfica (Araújo; Monteiro, 2007; Mendes; Sousa; Junior, 2015).

Do ponto de vista conceitual, os bioindicadores podem ser definidos como organismos, comunidades biológicas ou processos biológicos cuja presença, ausência ou variação expressa o estado ambiental do solo. Esses indicadores traduzem os efeitos cumulativos das práticas agrícolas e dos impactos antrópicos sobre o sistema edáfico (Silva *et al.*, 2021). A base teórica do uso de bioindicadores está relacionada à compreensão do solo como um sistema vivo e dinâmico, no qual os organismos edáficos desempenham funções essenciais. A atividade biológica influencia diretamente processos como ciclagem de nutrientes, decomposição da matéria orgânica e manutenção da estrutura do solo (Mendes; Sousa; Junior, 2015).

Os bioindicadores de qualidade do solo podem ser classificados de acordo com diferentes níveis de organização biológica, incluindo microrganismos, mesofauna e macrofauna. Cada grupo apresenta respostas específicas às alterações ambientais, possibilitando diagnósticos mais detalhados quando analisados de forma integrada (Andréa, 2010; Back *et al.*, 2025). Os microrganismos do solo, como bactérias e fungos, são amplamente utilizados como bioindicadores devido à sua elevada sensibilidade às mudanças no ambiente edáfico. A atividade microbiana e a biomassa microbiana refletem rapidamente alterações no manejo do solo, sendo consideradas indicadores precoces de degradação ou recuperação (Pimentel *et al.*, 2006).

A mesofauna edáfica, composta por organismos como ácaros e colêmbolos, também desempenha papel relevante como bioindicadora. Esses organismos estão diretamente relacionados à decomposição da matéria orgânica e à regulação das populações microbianas, respondendo de forma sensível às mudanças no uso do solo (Oliveira; Souto, 2011; Silva *et al.*, 2021). A macrofauna do solo, especialmente minhocas, tem sido amplamente estudada como bioindicadora de qualidade edáfica. A presença e a diversidade desses organismos estão associadas à melhoria da estrutura do solo, à formação de agregados e ao aumento da porosidade, refletindo condições favoráveis ao manejo sustentável (Andréa, 2010; Rovedder *et al.*, 2009). Além dos organismos edáficos, processos biológicos como respiração do solo, atividade enzimática e mineralização de nutrientes são utilizados como bioindicadores funcionais. Esses parâmetros permitem avaliar o nível de atividade biológica e a eficiência dos processos ecológicos no solo (Valentini; Abreu; Faria, 2015; Alencar; Sandes; Silva, 2018).

Os bioindicadores apresentam vantagens significativas em relação aos indicadores exclusivamente físicos ou químicos, pois integram os efeitos das variáveis ambientais ao longo do tempo. Essa característica permite diagnósticos mais realistas sobre a sustentabilidade dos sistemas de uso da terra (Araújo; Monteiro, 2007). Entretanto, a interpretação dos bioindicadores exige cautela, uma vez que fatores como clima, tipo de solo e histórico de uso podem influenciar os resultados. A variabilidade natural dos sistemas edáficos reforça a necessidade de contextualização dos dados e da combinação de múltiplos indicadores (Mendes; Sousa; Junior, 2015; Silva *et al.*, 2021).

A utilização integrada de bioindicadores físicos, químicos e biológicos tem sido recomendada para avaliações mais completas da qualidade do solo. Essa abordagem permite compreender as interações entre os diferentes componentes do sistema edáfico

e identificar processos de degradação ou recuperação com maior precisão (Camilo-Cotrim *et al.*, 2022). Os fundamentos teóricos dos bioindicadores de qualidade do solo evidenciam sua relevância como ferramentas estratégicas para o diagnóstico ambiental. Ao refletirem de forma sensível e integrada as alterações no uso e manejo do solo, os bioindicadores contribuem para a avaliação da sustentabilidade e para o desenvolvimento de práticas agrícolas mais conservacionistas (Trindade-Santos; Castro, 2021).

4. Organismos edáficos como bioindicadores da qualidade do solo

Os organismos edáficos desempenham funções essenciais no funcionamento dos ecossistemas do solo, sendo amplamente utilizados como bioindicadores da qualidade edáfica. Sua presença, diversidade e atividade refletem as condições ambientais e o impacto das práticas de uso e manejo do solo, oferecendo informações integradas sobre sua saúde e sustentabilidade (Araújo; Monteiro, 2007). A biota do solo é composta por uma grande diversidade de organismos distribuídos em diferentes níveis tróficos, incluindo microrganismos, mesofauna e macrofauna. Esses grupos interagem entre si e com o ambiente físico-químico, influenciando processos como decomposição da matéria orgânica, ciclagem de nutrientes e formação da estrutura do solo (Back *et al.*, 2025).

Os microrganismos do solo, especialmente bactérias e fungos, são considerados bioindicadores sensíveis devido à rápida resposta às alterações ambientais. Mudanças no manejo agrícola, no aporte de resíduos orgânicos e no uso de agroquímicos refletem-se diretamente na atividade e na diversidade microbiana (Pimentel *et al.*, 2006; 2025). A atividade microbiana do solo tem sido amplamente utilizada como indicador funcional da qualidade edáfica. Parâmetros como respiração do solo e biomassa microbiana permitem avaliar a intensidade dos processos biológicos e a eficiência da ciclagem de nutrientes em diferentes sistemas de uso da terra (Valentini; Abreu; Faria, 2015; Silva *et al.*, 2021).

A mesofauna edáfica, composta por organismos como ácaros e colêmbolos, exerce papel intermediário na cadeia trófica do solo. Esses organismos participam da fragmentação da matéria orgânica e do controle das populações microbianas, sendo sensíveis às alterações no ambiente edáfico e às práticas de manejo (Oliveira; Souto, 2011). Alterações na abundância e diversidade da mesofauna são frequentemente associadas a processos de degradação do solo. Sistemas agrícolas intensivos tendem a reduzir a diversidade desses organismos, enquanto práticas conservacionistas favorecem sua recuperação e estabilidade (Back *et al.*, 2025). A macrofauna do solo, que inclui

organismos como minhocas, cupins e formigas, é amplamente reconhecida como bioindicadora da qualidade edáfica. Esses organismos influenciam diretamente a estrutura do solo, promovendo a formação de agregados, a bioturbação e o aumento da porosidade (Andréa, 2010; Rovedder *et al.*, 2009).

As minhocas, em particular, têm sido utilizadas como bioindicadores clássicos da qualidade do solo, devido à sua sensibilidade à contaminação e às mudanças no manejo. A presença e a diversidade desses organismos estão associadas a solos com maior teor de matéria orgânica e melhor estrutura física (Andréa, 2010; Silva *et al.*, 2021). Em áreas degradadas, a redução da macrofauna edáfica é um indicativo de comprometimento da funcionalidade do solo. Por outro lado, o retorno desses organismos ao longo do tempo pode sinalizar processos de recuperação ambiental e melhoria das condições edáficas (Simões *et al.*, 2018). Os organismos edáficos também têm sido utilizados para avaliar a sustentabilidade de diferentes sistemas de uso da terra, como monocultivos, pastagens e sistemas agroflorestais. A maior diversidade biológica observada em sistemas mais complexos reflete práticas de manejo mais favoráveis à conservação do solo (Junqueira *et al.*, 2013).

Apesar de sua relevância, o uso de organismos edáficos como bioindicadores exige padronização metodológica e interpretação contextualizada. Fatores climáticos, edáficos e históricos de uso influenciam a biota do solo, tornando necessária a análise integrada de múltiplos indicadores (Mendes; Sousa; Junior, 2015; Camilo-Cotrim *et al.*, 2022). Neste contexto, os organismos edáficos configuram-se como bioindicadores eficientes da qualidade do solo, ao refletirem de forma sensível e integrada os impactos das práticas agrícolas e dos processos de degradação. Sua utilização contribui para diagnósticos mais precisos e para o desenvolvimento de estratégias de manejo sustentável voltadas à conservação dos recursos edáficos (Araújo; Monteiro, 2007).

5. Aplicações dos bioindicadores no diagnóstico da degradação do solo

Os bioindicadores têm sido amplamente aplicados no diagnóstico da degradação do solo por sua capacidade de refletir, de forma integrada, as alterações ambientais decorrentes do uso e manejo da terra. Diferentemente de análises pontuais, esses indicadores permitem avaliar processos cumulativos de degradação, oferecendo subsídios mais consistentes para a tomada de decisão (Araújo; Monteiro, 2007). Em áreas agrícolas, a aplicação de bioindicadores possibilita identificar impactos associados à

intensificação produtiva, como redução da biodiversidade edáfica e diminuição da atividade biológica. A resposta rápida dos organismos do solo a mudanças no manejo torna esses indicadores especialmente úteis para diagnósticos precoces de degradação (Silva *et al.*, 2021).

Pastagens degradadas constituem um dos principais alvos de estudos baseados em bioindicadores, devido à recorrência de processos como compactação, erosão e perda de matéria orgânica. A análise da fauna do solo e da atividade biológica tem sido utilizada para caracterizar o grau de degradação e orientar práticas de recuperação dessas áreas (Martins *et al.*, 2023; Simões *et al.*, 2018). A mesofauna e a macrofauna edáfica são frequentemente empregadas no diagnóstico de áreas degradadas, pois apresentam sensibilidade a alterações na cobertura vegetal e no manejo do solo. A redução na diversidade desses organismos indica comprometimento da funcionalidade do solo e perda de serviços ecossistêmicos (Oliveira; Souto, 2011).

A atividade microbiana do solo também é amplamente utilizada como bioindicador no diagnóstico da degradação. Parâmetros como respiração edáfica e biomassa microbiana refletem a intensidade dos processos biológicos e a disponibilidade de substratos orgânicos, sendo sensíveis à degradação ambiental (Valentini; Abreu; Faria, 2015; Pereira *et al.*, 2025).

Em sistemas agrícolas intensivos, como monocultivos e áreas do setor sucroenergético, os bioindicadores têm sido utilizados para avaliar os impactos ambientais das práticas produtivas. Esses estudos permitem identificar alterações na qualidade do solo associadas ao uso contínuo da terra e à aplicação de insumos químicos (Oliveira *et al.*, 2023; Silva *et al.*, 2021). Os bioindicadores também são aplicados no diagnóstico de degradações associadas a bacias hidrográficas, uma vez que o solo exerce influência direta sobre a qualidade da água. A análise de organismos bentônicos e edáficos contribui para compreender a relação entre degradação do solo e impactos nos ecossistemas aquáticos (Gaspar *et al.*, 2016; Moraes *et al.*, 2019).

Em áreas em processo de recuperação ambiental, os bioindicadores são utilizados para monitorar a eficácia das práticas adotadas. O aumento gradual da diversidade biológica e da atividade do solo indica a retomada de processos ecológicos e a melhoria da qualidade edáfica (Rovedder *et al.*, 2009). Sistemas agroflorestais têm sido amplamente avaliados por meio de bioindicadores, devido ao seu potencial de recuperação da qualidade do solo. A maior diversidade de organismos edáficos nesses

sistemas reflete práticas de manejo mais favoráveis à conservação e à sustentabilidade ambiental (Junqueira *et al.*, 2013; Pereira *et al.*, 2025). Indicadores biológicos também têm sido associados a indicadores visuais e qualitativos do solo, ampliando a compreensão dos processos de degradação. Essa abordagem integrada permite avaliações mais acessíveis e aplicáveis em contextos de agricultura familiar e assentamentos rurais (Silva *et al.*, 2023; Camilo-Cotrim *et al.*, 2022).

Apesar de suas vantagens, a aplicação dos bioindicadores no diagnóstico da degradação do solo exige padronização metodológica e interpretação cuidadosa. A variabilidade natural dos ecossistemas edáficos pode influenciar os resultados, reforçando a necessidade de análises comparativas e de longo prazo (Mendes; Sousa; Junior, 2015; Back *et al.*, 2025). Assim, as aplicações dos bioindicadores no diagnóstico da degradação do solo demonstram seu elevado potencial como ferramentas de avaliação ambiental. Ao refletirem de forma sensível as alterações nos sistemas de uso da terra, esses indicadores contribuem para diagnósticos mais precisos e para o desenvolvimento de estratégias eficazes de manejo sustentável e recuperação dos solos degradados (Araújo; Monteiro, 2007).

6. Manejo sustentável do solo e recuperação de áreas degradadas

O manejo sustentável do solo constitui estratégia central para a reversão de processos de degradação e para a manutenção da produtividade agrícola a longo prazo. Esse manejo baseia-se na adoção de práticas que preservem os atributos físicos, químicos e biológicos do solo, garantindo sua funcionalidade ecológica e produtiva (Trindade-Santos; Castro, 2021). A recuperação de áreas degradadas exige diagnóstico adequado das condições edáficas, permitindo identificar o grau de degradação e as estratégias mais adequadas para cada situação. O uso de bioindicadores nesse contexto contribui para avaliar o estado do solo antes, durante e após a adoção das práticas de manejo sustentável (Mendes; Sousa; Junior, 2015). Práticas conservacionistas, como a manutenção da cobertura vegetal e o uso de sistemas diversificados de produção, têm demonstrado eficácia na recuperação da qualidade do solo. Essas estratégias favorecem o aumento da matéria orgânica, a proteção contra a erosão e a recuperação da biodiversidade edáfica (Souza, 2020; Junqueira *et al.*, 2013).

Os sistemas agroflorestais destacam-se como alternativa sustentável para a recuperação de solos degradados, ao integrarem espécies arbóreas, agrícolas e, em alguns

casos, pecuárias. A maior complexidade desses sistemas favorece a atividade biológica do solo e contribui para a restauração de seus atributos (Pereira *et al.*, 2025). A adição de resíduos orgânicos e o manejo adequado da matéria orgânica são práticas fundamentais para a recuperação da saúde do solo. O aporte de matéria orgânica estimula a atividade microbiana, melhora a estrutura do solo e aumenta sua capacidade de retenção de água e nutrientes (Pimentel *et al.*, 2006; Valentini; Abreu; Faria, 2015). O manejo ecológico do solo, fundamentado nos princípios da agroecologia, prioriza a redução do uso de insumos químicos e a valorização dos processos biológicos naturais. Essa abordagem contribui para a sustentabilidade dos sistemas produtivos e para a recuperação gradual de áreas degradadas (Castro, 2021; Silva *et al.*, 2021).

Os bioindicadores desempenham papel relevante no monitoramento da eficácia das práticas de manejo sustentável. A resposta positiva da fauna e da microbiota do solo ao longo do tempo indica a recuperação dos processos ecológicos e a melhoria da qualidade edáfica (Rovedder *et al.*, 2009; Simões *et al.*, 2018). A recuperação de pastagens degradadas, por exemplo, tem sido avaliada por meio de indicadores biológicos associados à atividade do solo e ao acúmulo de fitomassa. Esses indicadores auxiliam na definição de estratégias de manejo mais eficientes e adaptadas às condições locais (Simões *et al.*, 2018; Martins *et al.*, 2023). Além dos aspectos ambientais, o manejo sustentável do solo apresenta impactos positivos de ordem econômica e social. A recuperação da produtividade reduz custos com insumos e fortalece a segurança alimentar, contribuindo para a estabilidade econômica dos sistemas agrícolas (Souza, 2020; Oliveira *et al.*, 2023).

A adoção de práticas sustentáveis de manejo do solo depende, entretanto, de capacitação técnica e de políticas públicas que incentivem a conservação dos recursos naturais. A disseminação do conhecimento sobre bioindicadores e manejo ecológico é fundamental para ampliar a adoção dessas práticas (Mendes; Sousa; Junior, 2015; Silva *et al.*, 2023). O acompanhamento contínuo das áreas em recuperação é essencial para garantir a eficácia das intervenções realizadas. O uso integrado de bioindicadores, indicadores visuais e análises complementares permite ajustes no manejo e maior eficiência nos processos de recuperação (Camilo-Cotrim *et al.*, 2022; Back *et al.*, 2025). Assim, o manejo sustentável do solo, aliado ao uso de bioindicadores, configura-se como estratégia indispensável para a recuperação de áreas degradadas. Essa abordagem contribui para a conservação dos recursos edáficos, a sustentabilidade dos sistemas

produtivos e a promoção de uma agricultura ambientalmente responsável e socialmente justa (Trindade-Santos; Castro, 2021; Silva *et al.*, 2021).

7. Conclusão

A degradação do solo representa um dos principais entraves à sustentabilidade dos sistemas agrícolas e à conservação dos recursos naturais, exigindo abordagens de diagnóstico e manejo cada vez mais integradas. Ao longo deste capítulo, evidenciou-se que a perda da qualidade edáfica compromete não apenas a produtividade agrícola, mas também os serviços ecossistêmicos essenciais ao equilíbrio ambiental. Os bioindicadores destacaram-se como ferramentas estratégicas para o diagnóstico da qualidade do solo, por refletirem de forma sensível e integrada as alterações decorrentes do uso e manejo da terra. A resposta dos organismos edáficos e dos processos biológicos permite identificar precocemente os estágios de degradação, ampliando a eficiência das ações preventivas e corretivas.

A análise dos fundamentos teóricos e das aplicações práticas dos bioindicadores demonstrou que microrganismos, mesofauna e macrofauna do solo oferecem informações valiosas sobre a funcionalidade dos sistemas edáficos. Esses indicadores possibilitam avaliações mais realistas da sustentabilidade dos sistemas agrícolas, ao integrarem aspectos físicos, químicos e biológicos do solo. As aplicações dos bioindicadores no diagnóstico de áreas agrícolas, pastagens degradadas, sistemas intensivos e áreas em recuperação evidenciaram seu potencial para orientar práticas de manejo mais adequadas. A utilização desses indicadores contribui para a definição de estratégias específicas de intervenção, respeitando as particularidades de cada ambiente e sistema de uso da terra.

O manejo sustentável do solo mostrou-se fundamental para a reversão dos processos de degradação, especialmente quando fundamentado em práticas conservacionistas e ecológicas. A adoção de sistemas diversificados, como os agroflorestais, e o manejo adequado da matéria orgânica favorecem a recuperação da biodiversidade edáfica e da funcionalidade do solo.

A integração dos bioindicadores aos processos de monitoramento contínuo reforça a importância de avaliações de longo prazo para garantir a eficácia das práticas de manejo adotadas. Essa abordagem permite ajustes dinâmicos nas estratégias de recuperação, promovendo maior resiliência dos sistemas produtivos frente às pressões ambientais.

Dessa forma, os bioindicadores consolidam-se como instrumentos essenciais para o diagnóstico da degradação do solo e para o manejo sustentável dos agroecossistemas. Quando utilizados de forma integrada e contextualizada, esses indicadores contribuem para a conservação do solo, a sustentabilidade ambiental e a construção de sistemas agrícolas mais equilibrados e duradouros.

Referências Bibliográficas

- ALENCAR, F. V. D.; SANDES, I. M. F.; SILVA, K. C. C. Uso de biomarcadores enzimáticos e genotóxicos para diagnóstico da qualidade da água do lago Itaparica-PE. **Revista Rios Saúde**, v. 1, n. 5, p. 49-60, 2018.
- ANDRÉA, M. M. O uso de minhocas como bioindicadores de contaminação de solos. **Acta zoológica mexicana**, v. 26, n. SPE2, p. 95-107, 2010.
- ARAÚJO, A. S. F.; MONTEIRO, R. T. R. Indicadores biológicos de qualidade do solo. **Bioscience Journal**, v. 23, n. 3, 2007.
- BACK, P. I. K. *et al.* Organismos edáficos como bioindicadores de qualidade do solo e da sustentabilidade ambiental. **Revista da Universidade Vale do Rio Verde**, v. 23, n. 1, 2025.
- CAMILO-COTRIM, C. F. *et al.* Qualidade do solo: relevância e uso de indicadores para o monitoramento. **Revista Agrotecnologia-Agrotec**, v. 13, n. 2, p. 46-65, 2022.
- GASPAR, J. C. *et al.* Degradações ambientais no Riacho Ouro em trechos da zona rural do município de Caxias, Maranhão. **Agrarian Academy**, v. 3, n. 6, p. 150, 2016.
- JUNQUEIRA, A. C. *et al.* Sistemas agroflorestais e mudanças na qualidade do solo em assentamento de reforma agrária. **Revista Brasileira de Agroecologia**, v. 8, n. 1, p. 102-115, 2013.
- MARTINS, A. L. L. *et al.* Estimativa de degradação de pastagens utilizando o “método da corda” em torno de Palmas-TO. **AGRI-ENVIRONMENTAL SCIENCES**, v. 9, n. 2, p. 7-7, 2023.
- MENDES, I. C.; SOUSA, D. M. G.; JUNIOR, F. B. R. Bioindicadores de qualidade de solo: dos laboratórios de pesquisa para o campo. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, v. 32, n. 1/2, p. 191-209, 2015.
- MORAES, C. L. *et al.* Diagnóstico ambiental da bacia hidrográfica contribuinte do reservatório tanque grande, Guarulhos (SP), com base em macroinvertebrados bentônicos. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 10, n. 5, p. 345-359, 2019.
- OLIVEIRA, E. M.; SOUTO, J. S. Mesofauna edáfica como indicadora de áreas degradadas. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 6, n. 1, p. 1, 2011.
- OLIVEIRA, M. R. *et al.* Os impactos ambientais do setor sucroenergético e o uso de indicadores de sustentabilidade. **RDE-Revista de Desenvolvimento Econômico**, v. 2, n. 52, 2023.

PEREIRA, Gleidson Marques et al. Atividade microbiana e carbono do solo em sistemas agroflorestais na amazônia oriental: estudo de caso em Marabá, Pará. **Revista de Geopolítica**, v. 16, n. 5, p. e1064-e1064, 2025.

PIMENTEL, M. S. *et al.* Atributos biológicos do solo sob manejo orgânico de cafeeiro, pastagem e floresta em região do médio Paraíba Fluminense-RJ. **Coffee Science-ISSN 1984-3909**, v. 1, n. 2, p. 83-93, 2006.

RECHE, M. H. L. R.; PITTOL, M.; FIUZA, L. M. Bactérias e bioindicadores de qualidade de águas de ecossistemas orizícolas da região sul do Brasil. **Oecologia Australis**, v. 14, n. 2, p. 452-463, 2010.

ROVEDDER, A. P. M. *et al.* Organismos edáficos como bioindicadores da recuperação de solos degradados por arenização no Bioma Pampa. **Ciência Rural**, v. 39, p. 1051-1058, 2009.

SILVA, J. H. C. S. *et al.* Indicadores qualitativos do ambiente edáfico e serviços ecossistêmicos em diferentes sistemas de ocupação da terra. **Nativa**, v. 9, n. 5, 2021.

SILVA, M. O. *et al.* Qualidade do solo: indicadores biológicos para um manejo sustentável. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 1, p. 6853-6875, 2021.

SILVA, R. M. *et al.* Fauna do solo como bioindicadora da qualidade do solo em cultivos de cana-de-açúcar: um referencial teórico. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 10, p. e239101018741-e239101018741, 2021.

SILVA, T. L. *et al.* Avaliação da qualidade do solo por meio de indicadores visuais no Projeto de Assentamento Marcelo Déda. **Diversitas Journal**, v. 8, n. 4, p. 2832-2842, 2023.

SIMÕES, V. J. *et al.* Indicadores de sustentabilidade com base na qualidade do solo e acúmulo de fitomassa em pastagens degradadas. **Agrarian Academy**, v. 5, n. 09, 2018.

SOUZA, A. G. V. Degradação dos solos de agricultura intensiva, diagnóstico e métodos de recuperação. **Revista Agrotecnologia-Agrotec**, v. 11, n. 1, p. 23-29, 2020.

TRINDADE-SANTOS, M. E.; CASTRO, M. S. Manejo ecológico de solo: chave para o processo de transição agroecológica. **Revista Brasileira de Agroecologia**, v. 16, n. 1, p. 12-12, 2021.

VALENTINI, C. M. A.; ABREU, J. G.; FARIA, R. A. P. G. Respiração do solo como bioindicador em áreas degradadas. **Revista Internacional de Ciências**, v. 5, n. 2, p. 127-142, 2015.



CAPÍTULO 7

GEOTECNOLOGIAS APLICADAS À GESTÃO DA COBERTURA E USO DO SOLO

Keithy Juliane de Oliveira

Rayane Feitosa de carvalho

Airton Kleber Gomes Matos

Carla Michelle da Silva

Antônio Veimar da Silva

1. Introdução

A análise da cobertura e do uso do solo é fundamental para o planejamento ambiental, a gestão territorial e a conservação dos recursos naturais, uma vez que as formas de ocupação da terra refletem diretamente as relações entre sociedade, economia e meio ambiente. Alterações inadequadas no uso do solo podem desencadear processos de degradação ambiental, perda de biodiversidade e conflitos territoriais (Santos *et al.*, 2020).

Nas últimas décadas, a intensificação das atividades agropecuárias, a expansão urbana e a implantação de grandes empreendimentos têm promovido mudanças significativas na dinâmica da paisagem. Essas transformações reforçam a necessidade de ferramentas capazes de monitorar, analisar e interpretar as modificações espaciais e

temporais da cobertura e do uso do solo de forma integrada (Ziembowicz *et al.*, 2018). Nesse contexto, as geotecnologias têm se consolidado como instrumentos essenciais para a gestão do território. O uso do sensoriamento remoto, dos sistemas de informações geográficas e das técnicas de geoprocessamento possibilita a obtenção de informações espaciais precisas, subsidiando análises ambientais, agrícolas e urbanas (Flauzino *et al.*, 2010).

O mapeamento e a classificação do uso e da cobertura do solo por meio de geotecnologias permitem identificar padrões espaciais, avaliar a ocupação da terra e acompanhar a evolução das paisagens ao longo do tempo. Essas análises são fundamentais para o diagnóstico ambiental e para a definição de estratégias de planejamento sustentável (Bargos; Lago; Ferraz, 2017). As geotecnologias também desempenham papel relevante na identificação de conflitos de uso do solo, especialmente em áreas ambientalmente sensíveis, como bacias hidrográficas e áreas de preservação permanente. A análise espacial permite confrontar o uso atual da terra com a legislação ambiental, contribuindo para a gestão e a conservação dos ecossistemas (Brito *et al.*, 2016). O monitoramento ambiental baseado em geotecnologias tem sido amplamente aplicado em diferentes escalas, desde microbacias até grandes regiões, apoiando a gestão dos recursos naturais e o ordenamento territorial. Essas ferramentas permitem avaliar impactos ambientais, planejar ações corretivas e acompanhar a eficácia das políticas públicas (Campos *et al.*, 2016).

Apesar dos avanços, o uso das geotecnologias na gestão da cobertura e do uso do solo enfrenta desafios relacionados à escolha de métodos de classificação, à disponibilidade de dados e à capacitação técnica. A superação dessas limitações é fundamental para ampliar a confiabilidade das análises e democratizar o acesso às ferramentas geotecnológicas (Costa; Corrêa, 2018). Assim, o objetivo deste capítulo é analisar a aplicação das geotecnologias na gestão da cobertura e do uso do solo, destacando sua contribuição para o mapeamento, o monitoramento ambiental, a identificação de conflitos de uso da terra e o apoio ao planejamento sustentável e à tomada de decisão territorial.

2. Uso e cobertura do solo: conceitos e implicações ambientais

O uso e a cobertura do solo são conceitos centrais para a compreensão da dinâmica territorial e ambiental, pois expressam a forma como a superfície terrestre é ocupada e

transformada pelas atividades humanas e pelos processos naturais. A distinção entre uso do solo, associado às atividades antrópicas, e cobertura do solo, relacionada aos elementos naturais e artificiais que recobrem a superfície, é fundamental para análises ambientais e de planejamento (Costa; Corrêa, 2018). As mudanças no uso e na cobertura do solo refletem transformações socioeconômicas e produtivas, especialmente em regiões de expansão agrícola e urbana. A conversão de áreas naturais em áreas agrícolas ou urbanizadas altera a estrutura da paisagem e influencia diretamente os processos ecológicos e hidrológicos (Morais; Francisco; Melo, 2014; Santos; Martins; Guilherme, 2017). A ocupação inadequada do solo pode desencadear uma série de impactos ambientais, como erosão, assoreamento de cursos d'água, perda de biodiversidade e degradação dos recursos naturais. Esses impactos tornam evidente a necessidade de compreender a relação entre padrões de uso do solo e a sustentabilidade ambiental (Bezerra *et al.*, 2011; Ziembowicz *et al.*, 2018).

Em áreas agrícolas, o uso intensivo do solo, associado à monocultura e à ausência de práticas conservacionistas, compromete a qualidade ambiental e a capacidade produtiva a longo prazo. A análise do uso do solo permite identificar áreas suscetíveis à degradação e subsidiar estratégias de manejo mais sustentáveis (Andrade *et al.*, 2017; Brito *et al.*, 2016). A cobertura vegetal desempenha papel essencial na proteção do solo e na regulação do ciclo hidrológico. A supressão da vegetação natural aumenta a vulnerabilidade do solo à erosão e reduz sua capacidade de retenção de água, afetando diretamente a estabilidade dos ecossistemas (Saito *et al.*, 2016).

As áreas de preservação permanente constituem elementos-chave na manutenção da qualidade ambiental, especialmente em bacias hidrográficas. A ocupação irregular dessas áreas evidencia conflitos de uso do solo que podem ser identificados por meio de análises espaciais e ambientais (Bargos; Lago; Ferraz, 2017). O estudo do uso e da cobertura do solo em microbacias hidrográficas permite compreender de forma integrada os impactos ambientais decorrentes das atividades humanas. Essas análises são fundamentais para o planejamento ambiental e a conservação dos recursos naturais em escala local e regional (Campos *et al.*, 2016).

As mudanças temporais no uso do solo evidenciam tendências de expansão ou retração de determinadas atividades, como agricultura, silvicultura e urbanização. A análise dessas dinâmicas contribui para a avaliação de políticas públicas e para o ordenamento territorial sustentável (Silva; Leite; Filho, 2017). Os conflitos de uso do solo

ocorrem quando as formas de ocupação da terra não são compatíveis com sua capacidade de suporte ambiental. A identificação desses conflitos é essencial para prevenir impactos negativos e promover o uso racional dos recursos naturais (Barão, 2021; Brito *et al.*, 2016). Em regiões semiáridas e de cerrado, a análise do uso e da cobertura do solo assume relevância ainda maior devido à fragilidade ambiental desses ecossistemas. A substituição da vegetação nativa por usos intensivos intensifica processos de degradação e compromete a sustentabilidade ambiental (Andrade *et al.*, 2017).

O planejamento ambiental baseado no conhecimento do uso e da cobertura do solo contribui para a definição de estratégias de conservação e recuperação ambiental. A identificação de áreas críticas orienta ações de manejo e políticas de proteção dos recursos naturais (Castro *et al.*, 2017). Portanto, compreender os conceitos e as implicações ambientais do uso e da cobertura do solo é fundamental para a gestão territorial sustentável. Essa compreensão subsidia o planejamento ambiental, a conservação dos ecossistemas e a adoção de práticas de uso da terra mais equilibradas e compatíveis com a capacidade ambiental dos territórios (Leite; Bezerra; Santos, 2025).

3. Geotecnologias como ferramentas para mapeamento e análise espacial

As geotecnologias configuram-se como um conjunto de técnicas e ferramentas voltadas à coleta, ao processamento e à análise de dados espaciais, sendo fundamentais para o mapeamento e a compreensão da dinâmica do uso e da cobertura do solo. Essas tecnologias permitem integrar informações geográficas e ambientais, ampliando a precisão das análises territoriais (Flauzino *et al.*, 2010; Castro *et al.*, 2017). O sensoriamento remoto destaca-se entre as principais geotecnologias utilizadas no mapeamento do uso do solo, ao possibilitar a obtenção de dados multiespectrais e multitemporais da superfície terrestre. O uso de imagens de satélite permite identificar padrões de ocupação, monitorar mudanças na paisagem e avaliar impactos ambientais em diferentes escalas (Saito *et al.*, 2016).

Os Sistemas de Informações Geográficas constituem ferramentas essenciais para a organização, o armazenamento e a análise de dados espaciais. Por meio do SIG, é possível integrar informações de diferentes fontes, realizar análises espaciais complexas e produzir mapas temáticos que subsidiam o planejamento ambiental e territorial (Campos *et al.*, 2016). As técnicas de geoprocessamento permitem manipular e analisar dados espaciais de forma sistemática, favorecendo a identificação de áreas críticas e a avaliação

da distribuição espacial dos usos da terra. Essas técnicas são amplamente aplicadas em estudos ambientais, agrícolas e urbanos (Bezerra *et al.*, 2011). A classificação do uso e da cobertura do solo é uma das aplicações mais recorrentes das geotecnologias. Métodos supervisionados e não supervisionados permitem diferenciar classes de uso da terra, como áreas agrícolas, florestais, urbanas e corpos d'água, contribuindo para diagnósticos ambientais mais detalhados (Duarte; Silva, 2019; Santos *et al.*, 2020).

A escolha dos algoritmos de classificação influencia diretamente a qualidade dos mapas produzidos. Estudos comparativos têm avaliado o desempenho de diferentes métodos, destacando a importância da validação dos resultados e da análise da acurácia para garantir a confiabilidade das informações espaciais (Duarte; Silva, 2019). As geotecnologias também possibilitam análises multitemporais do uso do solo, permitindo acompanhar a evolução da paisagem ao longo do tempo. Essas análises são fundamentais para identificar tendências de expansão agrícola, desmatamento ou regeneração vegetal, apoiando o monitoramento ambiental contínuo (Saito *et al.*, 2016).

O mapeamento espacial do uso e da cobertura do solo em microbacias hidrográficas tem sido amplamente utilizado para subsidiar ações de planejamento ambiental e conservação dos recursos naturais. A delimitação de áreas sensíveis contribui para a gestão integrada dos territórios (Campos *et al.*, 2016; Bargas; Lago; Ferraz, 2017). As geotecnologias livres e de acesso gratuito têm ampliado o uso dessas ferramentas em estudos ambientais e no planejamento territorial. A disponibilidade de dados abertos e softwares livres favorece a democratização do acesso às geotecnologias e fortalece iniciativas de gestão sustentável (Garcia *et al.*, 2025). A aplicação das geotecnologias na análise espacial também se mostra eficaz na identificação de conflitos de uso do solo, ao confrontar o uso atual da terra com sua aptidão ambiental. Essa abordagem contribui para a prevenção de impactos negativos e para a adequação do uso do solo às normas ambientais (Barão, 2021).

Apesar dos avanços, o uso das geotecnologias exige cuidados metodológicos, especialmente quanto à qualidade dos dados e à escala de análise. A interpretação inadequada das informações espaciais pode comprometer os resultados e a tomada de decisão, reforçando a importância da capacitação técnica (Leite; Bezerra; Santos, 2025; Garcia *et al.*, 2025). As geotecnologias configuram-se como ferramentas indispensáveis para o mapeamento e a análise espacial do uso e da cobertura do solo. Quando utilizadas de forma integrada e criteriosa, essas tecnologias contribuem para diagnósticos mais

precisos, planejamento ambiental eficiente e gestão territorial orientada pela sustentabilidade (Castro *et al.*, 2017).

4. Monitoramento ambiental e gestão territorial com geotecnologias

O monitoramento ambiental constitui etapa essencial para a gestão territorial sustentável, pois permite acompanhar as transformações na paisagem e avaliar os impactos das atividades humanas sobre os recursos naturais. Nesse contexto, as geotecnologias oferecem suporte técnico e metodológico para a análise contínua do uso e da cobertura do solo em diferentes escalas espaciais (Flauzino *et al.*, 2010).

A utilização de imagens de satélite e dados geoespaciais possibilita o monitoramento sistemático de áreas agrícolas, florestais e urbanas, permitindo identificar mudanças no padrão de ocupação da terra ao longo do tempo. Essas informações são fundamentais para subsidiar políticas públicas e ações de planejamento ambiental (Saito *et al.*, 2016). No âmbito da gestão territorial, as geotecnologias contribuem para a delimitação e o acompanhamento de bacias hidrográficas, áreas estratégicas para a conservação dos recursos hídricos. A análise espacial do uso do solo nessas áreas permite identificar fontes potenciais de degradação ambiental e orientar ações de manejo integrado (Veloso; Leite; Almeida, 2011; Campos *et al.*, 2016).

O monitoramento ambiental baseado em geotecnologias também tem sido amplamente aplicado na avaliação de áreas de preservação permanente e unidades de conservação. A identificação de ocupações irregulares e alterações na cobertura vegetal auxilia no cumprimento da legislação ambiental e na proteção dos ecossistemas sensíveis (Bargos; Lago; Ferraz, 2017; Carvalho *et al.*, 2021). As análises espaciais possibilitam ainda a avaliação da dinâmica da cobertura vegetal em diferentes biomas e regiões, evidenciando processos de desmatamento, regeneração natural ou substituição da vegetação nativa. Esses dados são essenciais para o acompanhamento de políticas de conservação e uso sustentável da terra (Morais; Francisco; Melo, 2014; Santos; Martins; Guilherme, 2017).

A gestão territorial apoiada por geotecnologias favorece a integração entre informações ambientais, socioeconômicas e produtivas. Essa abordagem integrada permite compreender as múltiplas dimensões do território e planejar ações que conciliem desenvolvimento econômico e conservação ambiental (Castro *et al.*, 2017). No planejamento ambiental, o monitoramento contínuo do uso do solo possibilita a

identificação de áreas prioritárias para conservação, recuperação ou ordenamento territorial. As geotecnologias auxiliam na definição de zonas de uso compatíveis com a capacidade ambiental do território (Brito *et al.*, 2016; Barão, 2021). As geotecnologias também são aplicadas no acompanhamento de grandes empreendimentos e obras de infraestrutura, como usinas hidrelétricas e projetos de expansão urbana. A análise espacial permite avaliar os impactos dessas intervenções sobre a cobertura do solo e os recursos naturais, subsidiando processos de licenciamento ambiental (Ziembowicz *et al.*, 2018).

Em regiões agrícolas, o monitoramento ambiental contribui para a avaliação das condições das pastagens e das áreas cultivadas, apoiando práticas de manejo mais sustentáveis. A identificação de áreas degradadas ou em processo de degradação orienta intervenções corretivas e preventivas (Andrade *et al.*, 2017; Silva; Leite; Filho, 2017). O uso de geotecnologias na gestão territorial também favorece a transparência e o acesso à informação ambiental. A disponibilização de mapas e dados geoespaciais contribui para a participação social e para o fortalecimento da governança ambiental (Costa; Corrêa, 2018).

Apesar de toda essa evolução, o monitoramento ambiental por meio de geotecnologias enfrenta desafios relacionados à atualização dos dados, à escala de análise e à integração entre diferentes bases de informações. A superação dessas limitações é fundamental para garantir a eficácia da gestão territorial (Leite; Bezerra; Santos, 2025; Duarte; Silva, 2019). O monitoramento ambiental e a gestão territorial apoiados por geotecnologias configuram-se como instrumentos estratégicos para o uso sustentável do solo. Ao fornecer informações espaciais precisas e atualizadas, essas ferramentas contribuem para o planejamento ambiental, a conservação dos recursos naturais e a construção de territórios mais equilibrados e resilientes (Flauzino *et al.*, 2010; Castro *et al.*, 2017).

5. Conflitos de uso do solo e áreas ambientalmente sensíveis

Os conflitos de uso do solo ocorrem quando as formas de ocupação e exploração da terra não são compatíveis com sua capacidade ambiental ou com a legislação vigente. Esses conflitos resultam, em geral, da pressão por expansão agrícola, urbana e de infraestrutura sobre áreas ambientalmente frágeis, exigindo instrumentos de diagnóstico e gestão eficazes (Brito *et al.*, 2016). As áreas ambientalmente sensíveis, como bacias

hidrográficas, áreas de preservação permanente e fragmentos de vegetação nativa, desempenham funções ecológicas essenciais. A ocupação inadequada desses espaços compromete a proteção do solo, a qualidade da água e a conservação da biodiversidade, intensificando processos de degradação ambiental (Bargos; Lago; Ferraz, 2017; Carvalho *et al.*, 2021).

A identificação de conflitos de uso do solo é uma etapa fundamental do planejamento ambiental, pois permite confrontar o uso atual da terra com sua aptidão e com os limites legais. As geotecnologias possibilitam essa análise por meio da sobreposição de mapas temáticos e da avaliação espacial integrada (Barão, 2021; Brito *et al.*, 2016). Em microbacias hidrográficas, os conflitos de uso do solo tendem a ser mais evidentes devido à diversidade de atividades concentradas em áreas relativamente pequenas. A ocupação irregular dessas áreas afeta diretamente os recursos hídricos e a estabilidade ambiental, reforçando a importância do monitoramento espacial (Campos *et al.*, 2016; Veloso; Leite; Almeida, 2011).

As áreas de preservação permanente são frequentemente alvo de conflitos de uso do solo, especialmente em regiões de expansão agrícola e urbana. O mapeamento dessas áreas por meio de geotecnologias permite identificar ocupações irregulares e subsidiar ações de fiscalização e recuperação ambiental (Bargos; Lago; Ferraz, 2017). Os conflitos também se manifestam em regiões agrícolas onde o uso do solo não respeita sua capacidade de suporte, resultando em processos de erosão, compactação e perda de fertilidade. A análise espacial auxilia na identificação dessas áreas e na definição de práticas de manejo mais adequadas (Andrade *et al.*, 2017; Campos *et al.*, 2016). As geotecnologias aplicadas à análise de conflitos de uso do solo possibilitam avaliar impactos ambientais associados a grandes empreendimentos, como hidrelétricas e obras de infraestrutura. Essas análises contribuem para o licenciamento ambiental e para a mitigação de impactos sobre a cobertura e o uso da terra (Ziembowicz *et al.*, 2018;).

O uso de ferramentas geotecnológicas também permite identificar áreas prioritárias para conservação e recuperação ambiental, orientando políticas públicas e ações de ordenamento territorial. A delimitação dessas áreas contribui para reduzir conflitos e promover o uso sustentável do solo (Castro *et al.*, 2017). A gestão de conflitos de uso do solo demanda integração entre informações técnicas e instrumentos legais. As geotecnologias auxiliam na interpretação e na aplicação da legislação ambiental, fortalecendo a tomada de decisão baseada em evidências espaciais (Brito *et al.*, 2016).

Apesar de sua eficácia, a análise de conflitos de uso do solo enfrenta desafios relacionados à atualização dos dados e à complexidade dos sistemas territoriais. A dinâmica acelerada da ocupação da terra exige monitoramento contínuo e metodologias adaptativas (Leite; Bezerra; Santos, 2025; Duarte; Silva, 2019).

A participação social e a transparência no acesso às informações espaciais são aspectos importantes na gestão de conflitos territoriais. A disponibilização de mapas e dados geotecnológicos favorece o diálogo entre gestores, produtores e sociedade, contribuindo para soluções mais consensuais (Costa; Corrêa, 2018). A análise dos conflitos de uso do solo e das áreas ambientalmente sensíveis por meio de geotecnologias configura-se como estratégia indispensável para o planejamento ambiental. Essas ferramentas contribuem para identificar incompatibilidades de uso, orientar ações de gestão e promover a conservação dos recursos naturais de forma integrada e sustentável (Flauzino *et al.*, 2010).

6. Desafios e perspectivas futuras no uso de geotecnologias para gestão do solo

O uso de geotecnologias na gestão da cobertura e do uso do solo tem avançado de forma significativa, porém ainda enfrenta desafios técnicos, institucionais e operacionais que limitam sua aplicação plena. Entre esses desafios destaca-se a necessidade de dados espaciais atualizados e de alta qualidade, fundamentais para análises confiáveis e para a tomada de decisão territorial (Duarte; Silva, 2019).

A escolha adequada de sensores, escalas e métodos de classificação representa um dos principais entraves técnicos no uso das geotecnologias. A aplicação inadequada dessas ferramentas pode gerar interpretações equivocadas sobre o uso do solo e comprometer o planejamento ambiental (Garcia *et al.*, 2025; Costa; Corrêa, 2018). Outro desafio relevante está relacionado à capacitação técnica dos profissionais envolvidos na análise e interpretação dos dados geoespaciais. O uso eficiente das geotecnologias exige domínio conceitual e metodológico, o que nem sempre está presente em instituições públicas e privadas responsáveis pela gestão territorial (Leite; Bezerra; Santos, 2025; Brito *et al.*, 2016).

A integração entre diferentes bases de dados espaciais também constitui um desafio importante. Informações provenientes de distintas fontes e períodos podem apresentar incompatibilidades, exigindo padronização e validação para garantir análises espaciais consistentes (Flauzino *et al.*, 2010). Do ponto de vista institucional, a articulação

entre órgãos gestores e a incorporação das geotecnologias nos processos de planejamento ainda ocorrem de forma desigual. A ausência de políticas públicas integradas pode limitar o uso estratégico dessas ferramentas na gestão do uso do solo (Castro *et al.*, 2017; Barão, 2021). Apesar desses desafios, observa-se um avanço significativo no acesso a dados geoespaciais e ao uso de geotecnologias livres. Plataformas abertas e softwares gratuitos têm ampliado as possibilidades de aplicação dessas ferramentas, favorecendo a democratização do acesso e a ampliação de estudos ambientais e territoriais (Costa; Corrêa, 2018).

As perspectivas futuras para o uso das geotecnologias na gestão do solo apontam para a ampliação das análises multitemporais e em tempo quase real. O aumento da disponibilidade de imagens de alta resolução contribui para o monitoramento contínuo da cobertura e do uso do solo, fortalecendo a gestão ambiental (Saito *et al.*, 2016; Santos *et al.*, 2020). A incorporação de novas técnicas de análise espacial, como algoritmos mais avançados de classificação, tende a aprimorar a precisão dos mapas de uso do solo. Esses avanços metodológicos ampliam a capacidade de identificar mudanças sutis na paisagem e de antecipar processos de degradação (Duarte; Silva, 2019). O uso das geotecnologias no apoio à legislação ambiental e ao ordenamento territorial também tende a se intensificar. A análise espacial contribui para o cumprimento das normas ambientais, especialmente no monitoramento de áreas de preservação permanente e reservas legais (Bargos; Lago; Ferraz, 2017; Carvalho *et al.*, 2021).

Em regiões agrícolas e semiáridas, as geotecnologias assumem papel estratégico para a gestão sustentável do solo, ao permitir o acompanhamento das mudanças na cobertura vegetal e a identificação de áreas vulneráveis à degradação (Andrade *et al.*, 2017; Moraes; Francisco; Melo, 2014). A integração entre geotecnologias, planejamento ambiental e participação social representa uma perspectiva promissora para a gestão do uso do solo. O acesso público às informações espaciais favorece a transparência e o engajamento da sociedade nos processos de tomada de decisão territorial (Costa; Corrêa, 2018; Garcia *et al.*, 2025). Assim, os desafios e as perspectivas futuras no uso de geotecnologias para a gestão da cobertura e do uso do solo indicam a necessidade de investimentos contínuos em capacitação, infraestrutura e políticas públicas. A consolidação dessas ferramentas como instrumentos estratégicos depende de sua utilização integrada, crítica e orientada pela sustentabilidade ambiental e territorial (Flauzino *et al.*, 2010; Leite; Bezerra; Santos, 2025).

7. Conclusão

A gestão da cobertura e do uso do solo constitui um elemento central para o planejamento ambiental e o ordenamento territorial, especialmente diante das intensas transformações decorrentes das atividades agrícolas, urbanas e de infraestrutura. Ao longo deste capítulo, evidenciou-se que compreender a dinâmica espacial da paisagem é fundamental para promover o uso sustentável dos recursos naturais e reduzir impactos ambientais. As geotecnologias destacaram-se como ferramentas estratégicas para o mapeamento, a análise e o monitoramento do uso e da cobertura do solo. O emprego do sensoriamento remoto, dos sistemas de informações geográficas e das técnicas de geoprocessamento ampliou a capacidade de gerar informações espaciais precisas e atualizadas, fundamentais para diagnósticos ambientais mais consistentes.

O uso dessas tecnologias no monitoramento ambiental e na gestão territorial mostrou-se especialmente relevante em bacias hidrográficas, áreas agrícolas e regiões ambientalmente sensíveis. A análise espacial permitiu identificar padrões de ocupação, acompanhar mudanças temporais e subsidiar ações de planejamento voltadas à conservação e ao uso racional do solo. A identificação de conflitos de uso do solo por meio das geotecnologias evidenciou seu papel no apoio à aplicação da legislação ambiental e na prevenção de impactos negativos sobre áreas de preservação permanente e outros ecossistemas frágeis. Essas análises contribuem para uma gestão mais eficiente e integrada do território.

O capítulo também destacou que, apesar dos avanços, o uso das geotecnologias enfrenta desafios relacionados à qualidade dos dados, à capacitação técnica e à integração institucional. A superação dessas limitações é essencial para ampliar a confiabilidade das análises e fortalecer a tomada de decisão baseada em evidências espaciais. Nesse contexto, as perspectivas futuras apontam para a ampliação do uso de dados abertos, geotecnologias livres e análises multitemporais, favorecendo a democratização do acesso às informações e o monitoramento contínuo da paisagem. Essas tendências reforçam o potencial das geotecnologias como instrumentos fundamentais para a gestão ambiental.

Dessa forma, as geotecnologias aplicadas à gestão da cobertura e do uso do solo consolidam-se como pilares do planejamento ambiental sustentável. Quando utilizadas de maneira integrada, crítica e orientada por políticas públicas eficazes, essas ferramentas contribuem para a conservação dos recursos naturais, a redução de conflitos territoriais e a construção de territórios mais equilibrados e resilientes.

Referências Bibliográficas

- ANDRADE, R. G. *et al.* Avaliação das condições de pastagens no cerrado brasileiro por meio de geotecnologias. **Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável**, v. 7, n. 1, p. 34-41, 2017.
- BARAO, W. Técnicas de geoprocessamento aplicadas ao estudo do conflito de uso do solo em microbacias do município de Senador Amaral-MG. **Revista Brasileira de Geografia Física**, 2021.
- BARGOS, D. C.; LAGO, G. M. T.; FERRAZ, F. Geotecnologias aplicadas ao mapeamento e classificação das formas de uso da terra nas Áreas de Preservação Permanente da microbacia do Ribeirão dos Passos (Lorena-SP). **Caminhos de Geografia**, v. 18, p. 47-59, 2017.
- BEZERRA, J. M. *et al.* Uso de Geotecnologias para avaliação ambiental da deterioração do município de Mossoró. **Revista de Geografia (UFPE)**, v. 28, n. 3, 2011.
- BRITO, E. M. *et al.* Geotecnologias aplicadas ao estudo do conflito de uso do solo visando o planejamento ambiental. *irriga*, v. 21, n. 3, p. 577, 2016.
- CAMPOS, S. *et al.* Geotecnologia aplicada na obtenção das subclasses de capacidade de uso das terras de uma microbacia, visando a conservação dos recursos naturais. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, v. 10, n. 3, p. 339-348, 2016.
- CARVALHO, C. G. S. *et al.* Uso de geotecnologias na identificação e na avaliação dos impactos ambientais nas áreas de preservação permanente em nascentes. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 4, p. 39362-39380, 2021.
- CASTRO, É. J. M. *et al.* Uso de geotecnologias para gestão de recursos naturais: caso do macrozoneamento ecológico econômico do maranhão. **Revista Ceuma Perspectivas**, v. 30, n. 2, p. 49-58, 2017.
- COSTA, I. C. N. P.; CORRÊA, J. A. J. Geotecnologias aplicadas no reconhecimento de padrões de uso e cobertura da terra a partir da escala da paisagem no município de Belterra, Pará. **Scientia Plena**, v. 14, n. 11, 2018.
- DUARTE, M. L.; SILVA, T. A. Avaliação do desempenho de três algoritmos na classificação de uso do solo a partir de geotecnologias gratuitas. **Revista de estudos Ambientais**, v. 21, n. 1, p. 6-16, 2019.
- FLAUZINO, F. S. *et al.* Geotecnologias aplicadas à gestão dos recursos naturais da bacia hidrográfica do rio Paranaíba no cerrado mineiro. **Sociedade & Natureza**, v. 22, p. 75-91, 2010.
- GARCIA, P. H. M. *et al.* Geotecnologias livres na classificação do uso e cobertura da terra em pequenas bacias hidrográficas: aplicações no planejamento e na gestão da legislação ambiental. **Revista Ciência Geográfica**, v. 29, n. 2, 2025.

LEITE, M. J. H.; BEZERRA, D. H. S.; SANTOS, I. C. L. Geotecnologias no monitoramento e gestão sustentável de espaços agrários no Nordeste: desafios e perspectivas futuras. **Revista Caribeña de Ciencias Sociales (RCCS)**, v. 14, n. 3, p. 4, 2025.

MORAIS, L. G. B. L.; FRANCISCO, P. R. M.; MELO, J. A. B. Análise da cobertura vegetal das terras de região semiárida com o uso de geotecnologias. **Polêm! ca**, v. 13, n. 3, p. 1345-1363, 2014.

SAITO, N. S. *et al.* Uso da geotecnologia para análise temporal da cobertura florestal. **Cerne**, v. 22, n. 1, p. 11-18, 2016.

SANTOS, E. V.; MARTINS, R. A.; GUILHERME, F. A. G. Barra do Garças (MT): auxílio das geotecnologias na caracterização fisiográfica, uso da terra e cobertura vegetal. **Espaço em Revista**, v. 19, n. 1, 2017.

SANTOS, J. C. *et al.* Caracterização do uso e cobertura do solo do município de Concórdia do Pará utilizando geotecnologias. **Natural Resources**, v. 10, n. 2, p. 33-37, 2020.

SILVA, L. A. P.; LEITE, M. R.; FILHO, R. M. Geotecnologias aplicadas ao mapeamento da evolução geográfica dos sistemas de usos da terra da bacia do rio jatobá. **Revista Geotemas**, v. 7, n. 2, p. 93-108, 2017.

SOUSA, J. H. S. *et al.* Aplicação de geotecnologias no uso e cobertura da terra na bacia hidrográfica do Alto Curso do rio Paraíba. **Revista Semiárido De Visu**, v. 12, n. 2, p. 644-657, 2024.

VELOSO, G. A.; LEITE, M. E.; ALMEIDA, M. I. S. Geotecnologias aplicadas ao monitoramento do uso do solo na bacia hidrográfica do Riachão, no Norte de Minas Gerais. **Revista de Geografia (UFPE)**, v. 28, n. 2, p. 165-184, 2011.

ZIEMBOWICZ, M. M. *et al.* Geotecnologias aplicadas na análise dos impactos no uso e cobertura da terra causados pela construção de uma usina hidrelétrica. **Ciência e Natura**, v. 40, p. e17, 2018.



CAPÍTULO 8

ESTRESSE HÍDRICO E MANEJO INTELIGENTE DA IRRIGAÇÃO COM SUPORTE DIGITAL

Carla Michelle da Silva

Airton Kleber Gomes Matos

Antônio Veimar da Silva

1. Introdução

A água é um dos principais fatores limitantes da produção agrícola, exercendo influência direta sobre o crescimento das plantas, a produtividade das culturas e a sustentabilidade dos agroecossistemas. Em cenários de variabilidade climática e de aumento da demanda por alimentos, a gestão eficiente dos recursos hídricos torna-se estratégica para a segurança alimentar e para a conservação ambiental (Massruhá *et al.*, 2020).

O estresse hídrico ocorre quando a disponibilidade de água no solo é insuficiente para atender às necessidades fisiológicas das plantas, comprometendo processos como fotossíntese, transpiração e absorção de nutrientes. Esse fenômeno é especialmente recorrente em regiões de clima semiárido e em sistemas agrícolas submetidos a irregularidades pluviométricas, resultando em perdas produtivas significativas (Borba *et al.*, 2023). A irrigação destaca-se como prática essencial para mitigar os efeitos do estresse

hídrico e garantir a estabilidade da produção agrícola. No entanto, o uso inadequado da irrigação pode gerar desperdício de água, aumento de custos e impactos ambientais negativos, reforçando a necessidade de estratégias de manejo mais eficientes e baseadas em dados (Arantes *et al.*, 2020; Vidal *et al.*, 2025). Nesse contexto, a agricultura de precisão surge como abordagem capaz de otimizar o uso da água por meio do monitoramento detalhado das condições do solo, do clima e das culturas. A integração de sensores, sistemas automatizados e plataformas digitais permite ajustar a irrigação às reais demandas hídricas das plantas, promovendo maior eficiência e sustentabilidade (Mendes *et al.*, 2025).

O avanço das tecnologias digitais, como a Internet das Coisas, a agrocomputação e a automação, tem impulsionado o desenvolvimento de sistemas de irrigação inteligente. Essas soluções possibilitam o controle em tempo real do fornecimento de água, a coleta contínua de dados e a tomada de decisão mais precisa, contribuindo para a redução do estresse hídrico e do consumo excessivo de recursos hídricos (Santos; Silva, 2020). Além disso, o uso de drones, sensoriamento remoto e técnicas de inteligência artificial tem ampliado as possibilidades de monitoramento hídrico e avaliação do desempenho dos sistemas de irrigação. A análise espacial e temporal das culturas permite identificar áreas com déficit hídrico e ajustar o manejo de forma localizada e eficiente (Balabenute; Filho, 2024; Sousa *et al.*, 2024).

Apesar dos avanços tecnológicos, a adoção do manejo inteligente da irrigação ainda enfrenta desafios relacionados à capacitação técnica, aos custos de implementação e à adaptação das soluções às diferentes realidades produtivas, especialmente na agricultura familiar. A democratização do acesso às tecnologias digitais é fundamental para ampliar seus benefícios e promover a sustentabilidade hídrica no campo (Dresch; Figueiredo; Fagundes, 2022). Nesse sentido, o objetivo do presente capítulo é analisar o estresse hídrico na agricultura e discutir o papel do manejo inteligente da irrigação com suporte digital, destacando a contribuição das tecnologias de agricultura de precisão, automação e sistemas de suporte à decisão para o uso eficiente da água e a sustentabilidade dos sistemas agrícolas.

2. Estresse hídrico na agricultura: conceitos, causas e impactos

O estresse hídrico na agricultura é caracterizado pela condição em que a disponibilidade de água no solo é inferior à demanda das plantas, comprometendo seu

desenvolvimento fisiológico e produtivo. Essa condição afeta diretamente o equilíbrio hídrico vegetal e está entre os principais fatores limitantes da produtividade agrícola em diferentes regiões do mundo (Borba *et al.*, 2023). Do ponto de vista fisiológico, o estresse hídrico interfere em processos essenciais como a fotossíntese, a transpiração e a absorção de nutrientes. A redução do potencial hídrico do solo leva ao fechamento estomático, diminuição da assimilação de carbono e queda no crescimento das plantas, refletindo-se em perdas quantitativas e qualitativas da produção (D'Oliveira *et al.*, 2024).

As causas do estresse hídrico são múltiplas e envolvem fatores climáticos, edáficos e de manejo. A irregularidade das chuvas, os períodos prolongados de estiagem e as altas temperaturas intensificam a evapotranspiração, agravando a deficiência hídrica, especialmente em regiões semiáridas e tropicais (Borba *et al.*, 2023; Mendes *et al.*, 2025). Além das condições climáticas, características do solo como textura, profundidade e capacidade de retenção de água influenciam diretamente a ocorrência do estresse hídrico. Solos rasos ou com baixa capacidade de armazenamento hídrico tornam as culturas mais suscetíveis a déficits de água, mesmo em períodos de precipitação moderada (Massruhá *et al.*, 2020). O manejo inadequado da irrigação constitui outro fator determinante para o estresse hídrico nas lavouras. A aplicação insuficiente ou mal distribuída de água pode não atender às exigências das culturas, enquanto o excesso compromete a eficiência do uso da água e pode causar impactos ambientais adicionais (Arantes *et al.*, 2020; Vidal *et al.*, 2025).

Em sistemas agrícolas irrigados, falhas na uniformidade de distribuição da água e na operação dos equipamentos contribuem para a ocorrência localizada de estresse hídrico. A heterogeneidade no fornecimento de água resulta em áreas sub ou superirrigadas, afetando a produtividade e a eficiência do sistema (Façanha *et al.*, 2025). Os impactos do estresse hídrico estendem-se além da produtividade agrícola, influenciando a eficiência do uso dos recursos naturais. O déficit hídrico recorrente pode reduzir a eficiência do uso da água e dos nutrientes, elevando os custos de produção e a pressão sobre os recursos hídricos disponíveis (Massruhá *et al.*, 2020). Em culturas sensíveis à disponibilidade hídrica, o estresse hídrico pode comprometer etapas críticas do ciclo produtivo, como germinação, florescimento e enchimento de grãos. Essas fases apresentam elevada demanda por água, tornando o manejo hídrico um fator decisivo para o sucesso produtivo (D'Oliveira *et al.*, 2024; Vidal *et al.*, 2025).

No contexto da agricultura familiar, o estresse hídrico assume maior relevância devido à limitação de infraestrutura e de acesso a tecnologias de irrigação eficientes. A dependência de regimes pluviométricos irregulares aumenta a vulnerabilidade desses sistemas produtivos às variações climáticas (Borba *et al.*, 2023). As mudanças climáticas tendem a intensificar os eventos de estresse hídrico, ao aumentar a frequência e a severidade de secas e ondas de calor. Esse cenário reforça a necessidade de estratégias adaptativas capazes de mitigar os impactos do déficit hídrico sobre a produção agrícola (Borba *et al.*, 2023).

O monitoramento do estresse hídrico tem sido aprimorado por meio do uso de tecnologias digitais, como sensoriamento remoto, dados climáticos e sistemas automatizados. Essas ferramentas permitem identificar precocemente áreas sob déficit hídrico, favorecendo intervenções mais rápidas e eficientes no manejo da irrigação (Balabenute; Filho, 2024). Nesse sentido, compreender os conceitos, as causas e os impactos do estresse hídrico são fundamentais para o desenvolvimento de estratégias de manejo agrícola mais eficientes. A adoção de práticas baseadas em monitoramento contínuo e suporte digital constitui caminho essencial para reduzir os efeitos do déficit hídrico, promover o uso racional da água e garantir a sustentabilidade dos sistemas agrícolas (Massruhá *et al.*, 2020; Chagas *et al.*, 2025).

3. Agricultura de precisão e manejo racional da irrigação

A agricultura de precisão representa uma abordagem inovadora voltada à gestão diferenciada das áreas agrícolas, considerando a variabilidade espacial e temporal dos sistemas produtivos. No contexto do manejo hídrico, essa abordagem permite adequar a irrigação às necessidades reais das culturas, reduzindo desperdícios e promovendo maior eficiência no uso da água (Martini; Teixeira, 2024; Massruhá *et al.*, 2020). O manejo racional da irrigação baseia-se no princípio de aplicar a quantidade correta de água, no momento adequado e no local necessário. A agricultura de precisão fornece os meios tecnológicos para alcançar esse objetivo, integrando informações sobre solo, clima e planta em processos decisórios mais precisos (D'Oliveira *et al.*, 2024; Santos; Silva, 2020).

A variabilidade espacial do solo é um dos principais fatores que justificam a adoção da irrigação de precisão. Diferenças na textura, profundidade e capacidade de retenção de água influenciam a dinâmica hídrica, tornando ineficiente a aplicação uniforme de água em toda a área cultivada (Massruhá *et al.*, 2020). O uso de sensores de umidade do solo é

uma das ferramentas centrais da agricultura de precisão aplicada à irrigação. Esses dispositivos permitem monitorar continuamente o conteúdo de água no solo, fornecendo dados que orientam a tomada de decisão sobre quando e quanto irrigar (Kamienski; Visoli, 2018). Além dos sensores de solo, dados climáticos desempenham papel fundamental no manejo racional da irrigação. Informações sobre temperatura, umidade do ar, radiação solar e precipitação são utilizadas para estimar a evapotranspiração das culturas e ajustar o manejo hídrico de forma mais eficiente (Chagas; Zamberlan, 2025; Mendes *et al.*, 2025).

A agricultura de precisão também incorpora técnicas de zoneamento agrícola, permitindo a definição de áreas com diferentes demandas hídricas dentro da mesma lavoura. Essa estratégia possibilita a aplicação localizada de água, reduzindo o consumo hídrico e melhorando o desempenho produtivo (Martini; Teixeira, 2024). Em sistemas irrigados, a avaliação da eficiência de aplicação de água é essencial para o manejo racional. Tecnologias como drones e sensores remotos têm sido utilizadas para identificar falhas na distribuição da irrigação e áreas sob estresse hídrico, contribuindo para ajustes operacionais mais precisos (Arantes *et al.*, 2020; Sousa *et al.*, 2024).

A integração entre agricultura de precisão e automação tem potencializado o controle da irrigação. Sistemas automatizados permitem a aplicação de água de forma dinâmica, respondendo em tempo real às condições ambientais e às demandas das culturas (Jesus *et al.*, 2021). No contexto da agricultura familiar, a adoção da agricultura de precisão no manejo da irrigação tem avançado gradualmente, impulsionada por soluções tecnológicas mais acessíveis. O uso de sensores de baixo custo e plataformas digitais simplificadas amplia as possibilidades de uso eficiente da água em pequenas propriedades (Gomes; Assunção; Gomes, 2025). A agricultura de precisão aplicada à irrigação também contribui para a sustentabilidade ambiental ao reduzir o uso excessivo de água e minimizar impactos como lixiviação de nutrientes e salinização do solo. Esses benefícios reforçam a importância dessa abordagem em cenários de escassez hídrica (Massruhá *et al.*, 2020; Vidal *et al.*, 2025).

Apesar dos benefícios, o manejo racional da irrigação por meio da agricultura de precisão ainda enfrenta desafios relacionados à capacitação técnica e à integração das tecnologias. A interpretação adequada dos dados gerados é fundamental para transformar informações em decisões eficientes (Dresch; Figueiredo; Fagundes, 2022). Dessa forma, a agricultura de precisão consolida-se como ferramenta estratégica para o manejo racional

da irrigação, ao possibilitar o uso eficiente da água, a redução do estresse hídrico e o aumento da produtividade agrícola. Sua adoção contribui diretamente para a sustentabilidade dos sistemas produtivos e para a adaptação da agricultura aos desafios climáticos atuais (Massruhá *et al.*, 2020; Borba *et al.*, 2023).

4. Tecnologias digitais, IoT e automação em sistemas de irrigação

As tecnologias digitais têm transformado de forma significativa os sistemas de irrigação, ao possibilitar maior controle, monitoramento contínuo e eficiência no uso da água. A incorporação de soluções baseadas em automação e conectividade permite superar limitações dos métodos tradicionais de irrigação, especialmente em contextos de escassez hídrica (Santos; Silva, 2020).

A Internet das Coisas constitui um dos principais pilares da irrigação inteligente, ao permitir a interconexão de sensores, atuadores e plataformas digitais. Esses dispositivos coletam dados em tempo real sobre umidade do solo, clima e funcionamento dos sistemas, viabilizando decisões mais precisas e responsivas (Kamienski; Visoli, 2018; Gomes; Assunção; Gomes, 2025). Sensores de umidade do solo desempenham papel central nos sistemas de irrigação baseados em IoT, pois fornecem informações contínuas sobre a disponibilidade hídrica na zona radicular. A partir desses dados, é possível ajustar automaticamente o fornecimento de água, reduzindo desperdícios e prevenindo o estresse hídrico das culturas (Façanha *et al.*, 2025).

Além dos sensores de solo, estações meteorológicas conectadas ampliam a capacidade de monitoramento ambiental. Dados de temperatura, umidade do ar, radiação solar e precipitação são integrados aos sistemas de irrigação, permitindo o cálculo da evapotranspiração e o planejamento mais eficiente das lâminas de irrigação (Mendes *et al.*, 2025). A automação dos sistemas de irrigação possibilita a operação remota e programada dos equipamentos, reduzindo a dependência de intervenção manual. Válvulas, bombas e controladores automatizados garantem maior uniformidade na aplicação da água e contribuem para a eficiência operacional dos sistemas irrigados (Jesus *et al.*, 2021; Hackenhaar; Hackenhaar; Abreu, 2015).

O uso de plataformas digitais integradas tem ampliado o potencial da irrigação automatizada, ao centralizar a gestão das informações e facilitar a visualização dos dados. Interfaces intuitivas permitem que produtores acompanhem o desempenho do sistema e realizem ajustes de forma ágil e fundamentada (Dresch; Figueiredo; Fagundes, 2022;

Chagas; Castro; Vale, 2025). A integração entre IoT e agricultura de precisão permite a irrigação localizada e variável, adaptada às condições específicas de cada área da lavoura. Essa abordagem contribui para o uso racional da água e para a redução dos impactos ambientais associados à irrigação excessiva (Martini; Teixeira, 2024).

Drones e sensoriamento remoto complementam os sistemas automatizados de irrigação ao fornecer informações espaciais sobre o estado hídrico das culturas. A identificação de áreas sob estresse hídrico orienta ajustes no manejo e potencializa a eficiência das tecnologias digitais aplicadas à irrigação (Balabenute; Filho, 2024; Sousa *et al.*, 2024). Em regiões semiáridas, as tecnologias digitais e a automação assumem papel estratégico para a convivência com a escassez hídrica. A adoção de sistemas inteligentes permite otimizar o uso da água disponível e aumentar a resiliência dos sistemas produtivos frente às variabilidades climáticas (Borba *et al.*, 2023; Mendes *et al.*, 2025). No contexto da agricultura familiar, soluções de IoT de baixo custo têm ampliado o acesso à irrigação inteligente. Sistemas simplificados e adaptados à realidade local contribuem para a democratização das tecnologias digitais e para a sustentabilidade hídrica em pequenas propriedades (Chagas; Castro; Vale, 2025).

Mesmo com esses avanços, a implementação de tecnologias digitais e de IoT em sistemas de irrigação enfrenta desafios relacionados à conectividade, à capacitação técnica e à manutenção dos equipamentos. A superação dessas barreiras é fundamental para a consolidação da irrigação inteligente no campo (Dresch; Figueiredo; Fagundes, 2022). As tecnologias digitais, a IoT e a automação configuram-se como elementos-chave para a modernização dos sistemas de irrigação. Sua aplicação integrada contribui para a redução do estresse hídrico, o aumento da eficiência do uso da água e a promoção de uma agricultura mais sustentável e inteligente (Kamienski; Visoli, 2018; Vidal *et al.*, 2025).

5. Suporte digital à tomada de decisão no manejo hídrico

O manejo eficiente da irrigação exige decisões fundamentadas em informações precisas sobre clima, solo, planta e sistema produtivo. Nesse contexto, o suporte digital à tomada de decisão torna-se essencial para orientar o uso racional da água e reduzir os impactos do estresse hídrico nas lavouras (Massruhá *et al.*, 2020). Os sistemas de suporte à decisão consistem em plataformas computacionais capazes de integrar dados provenientes de diferentes fontes e transformá-los em informações úteis para o manejo agrícola. Esses sistemas auxiliam produtores e técnicos na definição do momento ideal e

da quantidade adequada de água a ser aplicada (Martini; Teixeira, 2024). Dados climáticos desempenham papel central nos sistemas digitais de apoio à irrigação. Informações sobre precipitação, temperatura, radiação solar e evapotranspiração são utilizadas para estimar a demanda hídrica das culturas e ajustar o manejo de forma dinâmica e eficiente (Mendes *et al.*, 2025; Santos; Silva, 2020).

O sensoriamento remoto também contribui de forma significativa para o suporte digital à decisão, ao permitir o monitoramento espacial das condições hídricas das culturas. A análise de imagens obtidas por satélites e drones possibilita identificar áreas sob estresse hídrico e orientar intervenções localizadas no manejo da irrigação (Mendes *et al.*, 2025; Sousa *et al.*, 2024). A integração entre sensores de solo, dados climáticos e plataformas digitais amplia a capacidade de resposta dos sistemas de irrigação. Essa integração permite a automação de decisões, reduzindo a dependência de avaliações empíricas e aumentando a precisão do manejo hídrico (Kamienski; Visoli, 2018; Façanha *et al.*, 2025).

A inteligência artificial e os algoritmos de aprendizado de máquina têm sido incorporados aos sistemas de suporte à decisão para aprimorar a análise dos dados. Essas tecnologias permitem identificar padrões complexos e prever cenários de déficit hídrico, contribuindo para um manejo mais antecipado e eficiente (Balabenute; Filho, 2024; Oliveira; Fernandes; Júnior, 2025). Modelos computacionais aplicados ao balanço hídrico são amplamente utilizados como ferramentas de apoio à decisão. Esses modelos simulam a dinâmica da água no sistema solo-planta-atmosfera, fornecendo subsídios para o planejamento da irrigação em diferentes condições ambientais (Cruz, 2024; Chagas; Zamberlan, 2025). O uso de plataformas digitais favorece a visualização e a interpretação dos dados, tornando o processo decisório mais acessível aos produtores. Interfaces gráficas simplificadas permitem acompanhar indicadores hídricos e realizar ajustes no manejo de forma mais ágil e informada (Dresch; Figueiredo; Fagundes, 2022; Gomes; Assunção; Gomes, 2025).

No contexto da agricultura familiar, o suporte digital à decisão contribui para reduzir a vulnerabilidade ao estresse hídrico, ao oferecer ferramentas que auxiliam no planejamento do uso da água. Soluções adaptadas à realidade local ampliam o acesso às tecnologias e fortalecem a sustentabilidade hídrica (Chagas; Castro; Vale, 2025; Borba *et al.*, 2023). Apesar dos avanços, o uso de sistemas digitais de apoio à decisão ainda enfrenta desafios relacionados à confiabilidade dos dados e à conectividade no meio rural. A

qualidade das informações e a infraestrutura de comunicação são fatores determinantes para a eficácia dessas ferramentas (Dresch; Figueiredo; Fagundes, 2022).

A capacitação dos usuários também é um aspecto fundamental para o sucesso do suporte digital à tomada de decisão. A interpretação adequada das informações geradas pelos sistemas é essencial para que os dados se convertam em práticas de manejo eficientes (Martini; Teixeira, 2024; Chagas; Zamberlan, 2025). Dessa forma, o suporte digital à tomada de decisão configura-se como elemento estratégico no manejo hídrico inteligente. Ao integrar dados, modelos e tecnologias avançadas, esses sistemas contribuem para a otimização do uso da água, a redução do estresse hídrico e a promoção de sistemas agrícolas mais sustentáveis e resilientes (Massruhá *et al.*, 2020; Vidal *et al.*, 2025).

6. Desafios, sustentabilidade e perspectivas futuras da irrigação inteligente

A irrigação inteligente tem se consolidado como estratégia fundamental para enfrentar o estresse hídrico na agricultura, contudo sua adoção ainda enfrenta desafios de ordem técnica, econômica e social. A implementação dessas tecnologias exige investimentos em infraestrutura, conectividade e capacitação, fatores que limitam sua disseminação em diferentes contextos produtivos (Massruhá *et al.*, 2020).

Um dos principais desafios está relacionado ao custo inicial de implantação dos sistemas digitais e automatizados de irrigação. Sensores, plataformas digitais e equipamentos de automação representam investimentos significativos, especialmente para pequenos produtores e agricultores familiares, o que pode restringir o acesso às soluções inteligentes de manejo hídrico (Borba *et al.*, 2023). A conectividade no meio rural constitui outro entrave relevante para a expansão da irrigação inteligente. A limitação de acesso à internet e à transmissão de dados compromete o funcionamento adequado dos sistemas baseados em IoT e suporte digital, dificultando o monitoramento contínuo e a automação da irrigação (Dresch; Figueiredo; Fagundes, 2022; Gomes; Assunção; Gomes, 2025). Além dos aspectos técnicos, a capacitação dos usuários é essencial para o uso eficiente das tecnologias de irrigação inteligente. A interpretação dos dados gerados pelos sistemas digitais requer conhecimentos específicos, e a ausência de formação adequada pode comprometer a tomada de decisão e os resultados esperados (Martini; Teixeira, 2024; Chagas; Zamberlan, 2025).

Apesar desses desafios, a irrigação inteligente apresenta elevado potencial para promover a sustentabilidade ambiental. A otimização do uso da água reduz o desperdício, minimiza impactos sobre os recursos hídricos e contribui para a conservação dos ecossistemas, especialmente em regiões sujeitas à escassez hídrica (Vidal *et al.*, 2025). A sustentabilidade econômica também é favorecida pela irrigação inteligente, uma vez que o uso eficiente da água pode reduzir custos operacionais e aumentar a produtividade agrícola. A aplicação precisa da irrigação contribui para o melhor aproveitamento dos insumos e para a estabilidade da produção ao longo do tempo (Arantes *et al.*, 2020; Façanha *et al.*, 2025).

No contexto das mudanças climáticas, a irrigação inteligente assume papel estratégico para a adaptação dos sistemas agrícolas. O aumento da frequência de eventos extremos, como secas prolongadas, reforça a necessidade de soluções tecnológicas capazes de ajustar o manejo hídrico às condições climáticas variáveis (Mendes *et al.*, 2025). As perspectivas futuras indicam a ampliação do uso de inteligência artificial e aprendizado de máquina nos sistemas de irrigação. Essas tecnologias tendem a aprimorar a capacidade de previsão de cenários hídricos e a automatizar decisões com maior precisão, fortalecendo o manejo inteligente da irrigação (Balabenute; Filho, 2024). A integração entre irrigação inteligente, sensoriamento remoto e agricultura de precisão também desponta como tendência relevante. O uso combinado dessas ferramentas possibilita uma visão sistêmica do estado hídrico das culturas, favorecendo intervenções mais eficientes e sustentáveis (Sousa *et al.*, 2024; Mendes *et al.*, 2025).

Na agricultura familiar, as perspectivas futuras apontam para o desenvolvimento de soluções tecnológicas mais acessíveis e adaptadas às realidades locais. Sistemas simplificados e de baixo custo podem ampliar o acesso à irrigação inteligente e reduzir a vulnerabilidade hídrica desses produtores (Chagas; Castro; Vale, 2025; Gomes; Assunção; Gomes, 2025).

O fortalecimento de políticas públicas de incentivo à inovação tecnológica no campo é fundamental para ampliar a adoção da irrigação inteligente. Programas de apoio técnico e financeiro podem contribuir para a democratização das tecnologias digitais e para a promoção do uso sustentável da água na agricultura (Massruhá *et al.*, 2020; Borba *et al.*, 2023). Assim, os desafios e as perspectivas futuras da irrigação inteligente evidenciam a necessidade de ações integradas que envolvam tecnologia, capacitação e políticas públicas. A consolidação do manejo inteligente da irrigação representa um

caminho promissor para reduzir o estresse hídrico, promover a sustentabilidade ambiental e fortalecer a resiliência dos sistemas agrícolas frente aos desafios climáticos contemporâneos (Massruhá *et al.*, 2020; Vidal *et al.*, 2025).

7. Conclusão

O estresse hídrico configura-se como um dos principais desafios enfrentados pela agricultura contemporânea, sobretudo em contextos marcados por variabilidade climática e crescente pressão sobre os recursos hídricos. Ao longo deste capítulo, evidenciou-se que a compreensão dos mecanismos associados ao déficit hídrico é fundamental para o desenvolvimento de estratégias de manejo mais eficientes e sustentáveis. A irrigação, quando conduzida de forma racional e orientada por dados, assume papel decisivo na mitigação dos efeitos do estresse hídrico sobre as culturas agrícolas. A transição de sistemas convencionais para modelos baseados na agricultura de precisão representa um avanço significativo no uso eficiente da água, contribuindo para a estabilidade produtiva e a conservação ambiental.

As tecnologias digitais, a automação e a Internet das Coisas demonstraram elevado potencial para transformar os sistemas de irrigação, ao possibilitar monitoramento contínuo, controle em tempo real e aplicação precisa da água. A integração entre sensores, plataformas digitais e sistemas automatizados fortalece a capacidade de resposta dos produtores frente às variações ambientais. O suporte digital à tomada de decisão destacou-se como elemento estratégico para o manejo hídrico inteligente. A utilização de dados climáticos, sensoriamento remoto e modelos computacionais permite decisões mais assertivas, reduzindo desperdícios e ampliando a eficiência dos sistemas irrigados.

Apesar dos avanços, o capítulo também evidenciou desafios relacionados à conectividade, aos custos de implementação e à capacitação técnica, especialmente no contexto da agricultura familiar. A superação dessas limitações é essencial para ampliar o alcance das tecnologias digitais e garantir que seus benefícios sejam distribuídos de forma equitativa no meio rural.

As perspectivas futuras apontam para o fortalecimento da irrigação inteligente como componente central da agricultura sustentável. A incorporação de soluções mais acessíveis, aliada a políticas públicas de incentivo e à formação técnica, tende a consolidar o manejo hídrico digital como prática essencial para a resiliência dos sistemas agrícolas. Dessa forma, o manejo inteligente da irrigação com suporte digital apresenta-se como

caminho promissor para enfrentar o estresse hídrico, promover o uso racional da água e contribuir para a sustentabilidade da produção agrícola. A integração entre tecnologia, conhecimento e gestão eficiente dos recursos hídricos é fundamental para assegurar a produtividade e a adaptação da agricultura aos desafios ambientais atuais e futuros.

Referências Bibliográficas

- ARANTES, B. H. T. *et al.* Eficiência de distribuição do sistema de irrigação, por meio de um veículo aéreo não tripulado de baixo custo. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 4, p. 20332-20346, 2020.
- BALABENUTE, B.; FILHO, J. L. IA e drones na agricultura: inovação e sustentabilidade no agronegócio. **Revista Interface Tecnológica**, v. 21, n. 2, p. 236-247, 2024.
- BORBA, M. C. *et al.* A difusão de tecnologias no meio agrícola na Caatinga—a região de clima semiárido brasileiro. **Interações (Campo Grande)**, v. 24, n. 1, p. 69-93, 2023.
- CHAGAS, E. S.; ZAMBERLAN, M. F. Modelos de sistemas de suporte à decisão para agricultura de precisão: aplicações no monitoramento climático e predição de rendimento agrícola. **ARACÊ**, v. 7, n. 11, p. e10310, 2025.
- CHAGAS, K. C. M.; CASTRO, G. R.; VALE, T. S. O uso da agrocomputação para a otimização do uso de recursos hídricos na agricultura familiar. **ERR01**, v. 10, n. 6, p. e10415, 2025.
- CRUZ, I. A. V. Assessment of reliability in the water balance of mills: case study in the mining sector. **Journal of Interdisciplinary Debates**, v. 5, n. 02, p. 63-92, 2024.
- D'OLIVEIRA, P. S. *et al.* Como a agricultura de precisão pode contribuir com a produção de alfafa nos trópicos. **Revista Contemporânea**, v. 4, n. 10, p. e6272, 2024.
- DRESCH, L. O.; FIGUEIREDO, A. M. R.; FAGUNDES, M. B. B. A digitalização do campo e a democratização da ciência de dados: perspectivas para aplicação por produtores agropecuários. **COLÓQUIO-Revista do Desenvolvimento Regional**, v. 19, n. Edição Especial 1, p. 310-328, 2022.
- FAÇANHA, G. S. *et al.* Avaliação de protótipo de irrigação inteligente. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação**, v. 11, n. 11, p. 7404-7421, 2025.
- GOMES, J. P.; ASSUNÇÃO, L. D. F.; GOMES, M. P. Uso de IoT em sistemas de irrigação sustentável: perspectivas para a agricultura familiar amazônica. **Caderno Pedagógico**, v. 22, n. 13, p. e21324, 2025.
- HACKENHAAR, N. M.; HACKENHAAR, C.; ABREU, Y. V. Robótica na agricultura. **Interações**, v. 16, p. 119-129, 2015.
- JESUS, A. M. *et al.* Sistema de automatização para irrigação de uma horta a partir da energia fotovoltaica. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 5, p. 53478-53493, 2021.
- KAMIENSKI, C.; VISOLI, M. SWAMP: uma plataforma para irrigação de precisão baseada na internet das coisas. **Embrapa Informática Agropecuária-Artigo em periódico indexado (ALICE)**, v. 15, p. 76-84, 2018.

MARTINI, L. C. P.; TEIXEIRA, M. S. Classificação da agricultura de precisão com base nas características do monitoramento. **Revista Interface Tecnológica**, v. 21, n. 1, p. 507-519, 2024.

MASSRUHÁ, S. M. F. S. *et al.* A transformação digital no campo rumo à agricultura sustentável e inteligente. **Agricultura Digital**, p. 20, 2020.

MENDES, W. R. *et al.* Sensoriamento Remoto Aplicado ao Monitoramento Agrícola e Ambiental. **Revista de Gestão e Secretariado**, v. 16, n. 6, p. e4874, 2025.

NASCIMENTO, D. D. *et al.* Gerenciamento hidropônico com controle via análise climática. **Revista Contemporânea**, v. 5, n. 11, p. e9667, 2025.

OLIVEIRA, E. B.; FERNANDES, V. O.; JÚNIOR, M. J. A. Deep Learning: uma Revisão Sistemática Integrativa de Suas Aplicações em Mapeamento Utilizando Imagens de RPA. **Rev. Bras. Cartogr**, v. 77, 2025.

SANTOS, P. M.; SILVA, T. E. S. O uso da internet das coisas para o desenvolvimento sustentável da agricultura. **Revista Multidisciplinar do Sertão**, v. 2, n. 1, p. 13-24, 2020.

SOUSA, M. P. *et al.* Avanços e aplicações de drones na gestão de recursos naturais e monitoramento ambiental no semiárido brasileiro. **Revista de Gestão e Secretariado**, v. 15, n. 7, p. e4030, 2024.

VIDAL, V. M. *et al.* Impacto de um sistema inteligente de fertirrigação no controle hídrico e nutricional do cultivo do tomate grape. **Caderno Pedagógico**, v. 22, n. 11, p. e19630, 2025.



CAPÍTULO 9

ÍNDICES ESPECTRAIS (NDVI, EVI, SAVI): DADOS PARA DECISÕES SUSTENTÁVEIS

Antônio Veimar da Silva
Jefferson Santos de Amorim
Diego Fernando Daniel
Carla Michelle da Silva

1. Introdução

O sensoriamento remoto consolidou-se como uma das principais ferramentas para a análise e o monitoramento da superfície terrestre, permitindo compreender a dinâmica da vegetação em diferentes escalas espaciais e temporais. A partir da resposta espectral dos alvos terrestres, especialmente da vegetação, tornou-se possível extrair informações fundamentais para o planejamento ambiental e agrícola (Tucker, 1979; Xue; Su, 2017). Nesse contexto, os índices espectrais de vegetação surgem como indicadores quantitativos capazes de expressar o vigor, a densidade e a condição da cobertura vegetal. Esses índices resultam da combinação matemática de bandas espectrais, principalmente do vermelho e do infravermelho próximo, refletindo características biofísicas das plantas e sua interação com o ambiente (Huete *et al.*, 1997, 2002).

Entre os índices mais utilizados, destacam-se o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), o Índice de Vegetação Melhorado (EVI) e o Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI). Cada um desses índices apresenta especificidades metodológicas que os tornam mais adequados a determinados contextos ambientais, agrícolas ou florestais (Neto; Danelichen, 2022). O NDVI é amplamente empregado no monitoramento agrícola e ambiental devido à sua simplicidade e robustez, sendo utilizado em análises de ciclo fenológico, produtividade e dinâmica temporal da vegetação. Contudo, suas limitações em áreas com alta biomassa ou grande influência do solo motivaram o desenvolvimento de índices alternativos, como o EVI e o SAVI (Francisco *et al.*, 2015). O EVI foi desenvolvido com o objetivo de melhorar a sensibilidade em áreas densamente vegetadas e reduzir interferências atmosféricas, enquanto o SAVI busca minimizar a influência do solo exposto, tornando-se especialmente útil em regiões semiáridas e áreas agrícolas em estágios iniciais de desenvolvimento das culturas (Huete *et al.*, 1997; Gameiro *et al.*, 2016).

A aplicação dos índices espectrais tem se expandido significativamente nas últimas décadas, abrangendo o monitoramento de culturas agrícolas, florestas plantadas, áreas naturais e ambientes urbanos. Estudos demonstram sua eficácia na análise da dinâmica temporal da vegetação, na identificação de estresse vegetal e no suporte a decisões relacionadas ao uso e ocupação do solo (Figueiredo, 2020; Costa; Lameira, 2022).

Além do uso agrícola, os índices espectrais desempenham papel relevante na avaliação ambiental e no planejamento territorial, contribuindo para análises de qualidade ambiental, degradação, conservação e sustentabilidade. A integração desses índices com dados de solo, clima e uso da terra amplia sua capacidade de apoiar decisões estratégicas em diferentes contextos socioambientais (Albano *et al.*, 2017; Xu; Zhang, 2020). Nesse contexto, o objetivo geral do presente capítulo é apresentar os fundamentos, as aplicações e as limitações dos principais índices espectrais de vegetação, com ênfase no NDVI, EVI e SAVI, destacando sua importância como ferramentas de apoio à tomada de decisões sustentáveis no monitoramento agrícola e ambiental.

2. Fundamentos dos índices espectrais de vegetação

Os índices espectrais de vegetação constituem ferramentas fundamentais do sensoriamento remoto, sendo utilizados para representar quantitativamente a condição da cobertura vegetal a partir da resposta espectral registrada por sensores orbitais ou

aerotransportados. Esses índices permitem sintetizar informações complexas em valores numéricos que refletem o vigor, a densidade e a atividade fotossintética da vegetação (Tucker, 1979; Xue; Su, 2017). A base conceitual dos índices espectrais está relacionada ao comportamento espectral das plantas, especialmente à forma como a vegetação interage com a radiação eletromagnética. As folhas absorvem fortemente a radiação na região do vermelho, devido à presença de clorofila, e refletem intensamente no infravermelho próximo, em função da estrutura celular do mesófilo foliar (Huete *et al.*, 1997, 2002).

Essa diferença de comportamento espectral entre as bandas do vermelho e do infravermelho próximo é explorada matematicamente para gerar índices capazes de discriminar áreas vegetadas de superfícies não vegetadas. Quanto maior a atividade fotossintética e o vigor da vegetação, maior tende a ser a diferença entre a reflectância nessas bandas (Tucker, 1979; Francisco *et al.*, 2015). Os índices espectrais surgiram como alternativa ao uso direto das bandas espectrais individuais, pois reduzem a influência de fatores externos, como variações de iluminação, ângulo solar e características do sensor. Dessa forma, proporcionam maior comparabilidade entre imagens adquiridas em diferentes datas e condições ambientais (Xue; Su, 2017).

Historicamente, o desenvolvimento dos índices de vegetação acompanhou a evolução dos sensores remotos e das plataformas orbitais. Com o avanço das missões Landsat, MODIS e, mais recentemente, sensores de alta resolução, ampliou-se a capacidade de monitoramento contínuo da vegetação em escala local, regional e global (Figueiredo, 2020). Entre os primeiros índices propostos, destacam-se aqueles baseados em combinações lineares das bandas espectrais, culminando na formulação do NDVI, que se consolidou como referência mundial para estudos de vegetação. A simplicidade matemática e a interpretação direta de seus valores favoreceram sua ampla disseminação em estudos ambientais e agrícolas (Tucker, 1979; Neto; Danelichen, 2022).

Os valores dos índices espectrais geralmente variam em intervalos padronizados, permitindo a interpretação da condição da vegetação. Valores próximos a zero ou negativos estão associados a superfícies sem vegetação, enquanto valores positivos mais elevados indicam maior densidade e vigor vegetal (Gameiro *et al.*, 2016). Além da vegetação, fatores como solo exposto, umidade do solo e presença de resíduos vegetais podem influenciar os valores dos índices espectrais. Essa interferência motivou o desenvolvimento de índices ajustados, capazes de minimizar a influência do fundo do solo

e melhorar a precisão das análises em ambientes heterogêneos (Francisco *et al.*, 2015; Leite; Santos; Santos, 2017). Os índices espectrais também apresentam sensibilidade às condições atmosféricas, como aerossóis e vapor d'água, que podem alterar a reflectância registrada pelos sensores. O entendimento dessas limitações é essencial para a correta interpretação dos resultados e para a escolha do índice mais adequado a cada contexto (Huete *et al.*, 2002; Xue; Su, 2017).

Do ponto de vista metodológico, a aplicação dos índices espectrais requer cuidados relacionados à calibração radiométrica, correção atmosférica e seleção adequada das imagens. Esses procedimentos asseguram maior confiabilidade aos valores obtidos e ampliam o potencial de uso dos índices em análises temporais (Alves *et al.*, 2024). A análise temporal dos índices espectrais permite acompanhar a dinâmica da vegetação ao longo do tempo, identificando padrões sazonais, ciclos fenológicos e alterações decorrentes de eventos climáticos ou de mudanças no uso do solo. Essa característica torna os índices ferramentas estratégicas para o monitoramento ambiental contínuo (Biazoto; Rosa, 2024; Araujo *et al.*, 2025).

No contexto agrícola, os fundamentos dos índices espectrais estão diretamente associados à sua capacidade de representar a variabilidade espacial das lavouras. A partir desses índices, é possível identificar áreas com diferentes níveis de desenvolvimento vegetal, subsidiando práticas de agricultura de precisão e manejo localizado (Marin *et al.*, 2019; Cardoso *et al.*, 2025). Em ambientes naturais e florestais, os índices espectrais auxiliam na avaliação da estrutura da vegetação, da biomassa e da integridade dos ecossistemas. Esses indicadores são amplamente utilizados em estudos de conservação, monitoramento de áreas protegidas e avaliação de impactos ambientais (Costa; Lameira, 2022; Albano *et al.*, 2017). Dessa forma, os fundamentos dos índices espectrais de vegetação evidenciam sua relevância como instrumentos analíticos do sensoriamento remoto. Ao sintetizar informações espectrais complexas em indicadores objetivos, esses índices constituem a base para análises mais avançadas e para a tomada de decisões sustentáveis no planejamento agrícola e ambiental (Xu; Zhang, 2020).

3. NDVI: aplicações, potencialidades e limitações

O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) é um dos indicadores mais utilizados no sensoriamento remoto para avaliação da vegetação. Proposto originalmente por Tucker, o índice baseia-se na razão normalizada entre as bandas do

vermelho e do infravermelho próximo, permitindo estimar o vigor e a densidade da cobertura vegetal de forma simples e eficiente (Tucker, 1979; Xue; Su, 2017). A ampla difusão do NDVI decorre de sua facilidade de cálculo e interpretação, além da disponibilidade de dados em diferentes plataformas orbitais. Missões como Landsat, MODIS e sensores de alta resolução oferecem séries temporais extensas, favorecendo análises multitemporais e comparações espaciais consistentes (Figueiredo, 2020).

No contexto agrícola, o NDVI é amplamente empregado no monitoramento do desenvolvimento das culturas e no acompanhamento do ciclo fenológico. A variação temporal do índice permite identificar fases críticas do crescimento vegetal e avaliar o desempenho das lavouras ao longo da safra (Araujo *et al.*, 2025). O uso do NDVI na agricultura de precisão tem contribuído para a identificação da variabilidade espacial das áreas cultivadas. A partir dos mapas gerados, é possível delimitar zonas de manejo e direcionar práticas diferenciadas de irrigação, fertilização e controle fitossanitário (Biazoto; Rosa, 2024; Neto; Danelichen, 2022).

Além da agricultura, o NDVI é amplamente utilizado em estudos ambientais e florestais. Sua aplicação permite avaliar a dinâmica da cobertura vegetal, monitorar áreas naturais e analisar processos de degradação ou regeneração da vegetação em diferentes biomas (Francisco *et al.*, 2015). Em áreas florestais, o NDVI tem sido empregado na estimativa indireta de biomassa e na análise da estrutura da vegetação. Estudos demonstram correlação entre valores elevados do índice e maior densidade de cobertura vegetal, reforçando seu potencial como indicador ambiental (Costa; Lameira, 2022; Macedo *et al.*, 2017). O NDVI também se destaca no monitoramento de eventos de estresse vegetal, como seca, pragas e doenças. A redução nos valores do índice pode indicar alterações fisiológicas nas plantas, auxiliando na detecção precoce de problemas e no suporte à tomada de decisão (Goodwin *et al.*, 2008; Marin *et al.*, 2019).

No âmbito urbano, o NDVI tem sido utilizado como indicador de qualidade ambiental, permitindo avaliar a distribuição e a condição das áreas verdes. Essas análises contribuem para o planejamento urbano e para a promoção de ambientes mais sustentáveis (Alves *et al.*, 2024). Apesar de suas inúmeras aplicações, o NDVI apresenta limitações que devem ser consideradas na interpretação dos resultados. Uma das principais restrições está relacionada à saturação do índice em áreas com alta biomassa, onde valores elevados tendem a se estabilizar, reduzindo a sensibilidade a variações na densidade da vegetação (Huete *et al.*, 2002).

Outra limitação do NDVI refere-se à influência do solo exposto, especialmente em áreas com baixa cobertura vegetal ou em estágios iniciais de desenvolvimento das culturas. Nessas condições, a reflectância do solo pode interferir nos valores do índice, comprometendo sua precisão (Francisco *et al.*, 2015). As condições atmosféricas também afetam o desempenho do NDVI, uma vez que aerossóis e vapor d'água podem alterar a reflectância registrada pelos sensores. A ausência de correções atmosféricas adequadas pode resultar em distorções nos valores do índice, especialmente em análises temporais (Huete *et al.*, 1997; Figueiredo, 2020). Além disso, o NDVI apresenta sensibilidade limitada em ambientes heterogêneos, onde a mistura espectral de diferentes alvos dentro de um mesmo pixel dificulta a discriminação precisa da vegetação. Essa limitação é mais evidente em imagens de resolução espacial mais baixa (Xue; Su, 2017).

Para contornar essas limitações, o NDVI é frequentemente utilizado em conjunto com outros índices espectrais, como o EVI e o SAVI, que oferecem melhor desempenho em contextos específicos. A escolha adequada do índice depende das características do ambiente analisado e dos objetivos do estudo (Huete *et al.*, 2002; Neto; Danelichen, 2022). Assim, o NDVI consolida-se como ferramenta essencial para o monitoramento agrícola e ambiental, desde que suas potencialidades e limitações sejam devidamente consideradas. O uso criterioso do índice, aliado a outras informações espectrais e ambientais, amplia sua contribuição para decisões sustentáveis no manejo da vegetação e dos recursos naturais (Xu; Zhang, 2020).

4. EVI e SAVI: alternativas ao NDVI em diferentes contextos ambientais

O avanço das pesquisas em sensoriamento remoto evidenciou que, embora o NDVI seja amplamente utilizado, ele apresenta limitações em determinados contextos ambientais. Essas restrições impulsionaram o desenvolvimento de índices espectrais alternativos, como o Índice de Vegetação Melhorado (EVI) e o Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI), que buscam maior sensibilidade e precisão na análise da vegetação (Huete *et al.*, 1997; Xue; Su, 2017).

O EVI foi desenvolvido com o objetivo de aprimorar a resposta espectral em áreas de alta biomassa vegetal, onde o NDVI tende a apresentar saturação. Esse índice incorpora correções atmosféricas e fatores de ajuste que reduzem a influência do solo e da atmosfera, tornando-o mais eficiente em ambientes florestais densos (Huete *et al.*, 2002). Uma das principais características do EVI é sua maior sensibilidade às variações

estruturais do dossel vegetal. Essa propriedade permite detectar mudanças mais sutis na vegetação, sendo especialmente útil em estudos de florestas tropicais e áreas com elevada cobertura vegetal (Costa; Lameira, 2022). O uso do EVI tem se destacado em análises globais e regionais baseadas em dados MODIS, possibilitando o acompanhamento da dinâmica da vegetação em larga escala. Sua aplicação contribui para estudos relacionados à produtividade primária, mudanças climáticas e monitoramento de ecossistemas naturais (Xu; Zhang, 2020).

Por outro lado, o SAVI foi proposto para minimizar a influência do solo exposto nos valores dos índices espectrais, sendo especialmente indicado para áreas agrícolas em estágios iniciais de cultivo e regiões semiáridas. A introdução de um fator de correção permite reduzir o efeito do fundo do solo sobre a reflectância da vegetação (Francisco *et al.*, 2015; Gameiro *et al.*, 2016). Em ambientes onde a cobertura vegetal é esparsa ou irregular, o SAVI apresenta desempenho superior ao NDVI, pois proporciona maior estabilidade nos valores do índice. Essa característica torna o SAVI uma ferramenta importante para o monitoramento de áreas agrícolas recém-implantadas e ecossistemas naturais com baixa densidade vegetal (Francisco *et al.*, 2015).

Estudos comparativos demonstram que a escolha entre NDVI, EVI e SAVI deve considerar as características ambientais da área de estudo. Em regiões com alta biomassa, o EVI tende a apresentar melhor desempenho, enquanto em áreas com maior influência do solo exposto, o SAVI se mostra mais adequado (Xue; Su, 2017; Neto; Danelichen, 2022). No contexto agrícola, o uso do EVI e do SAVI tem contribuído para análises mais precisas da variabilidade espacial das lavouras. Esses índices auxiliam na identificação de zonas de manejo e na avaliação do desenvolvimento das culturas ao longo do ciclo produtivo (Biazoto; Rosa, 2024; Araujo *et al.*, 2025). Em áreas semiáridas, o SAVI destaca-se como índice estratégico para o monitoramento da vegetação, devido à predominância de solo exposto e à irregularidade da cobertura vegetal. Sua aplicação contribui para estudos de degradação, desertificação e manejo sustentável dos recursos naturais (Gameiro *et al.*, 2016).

O EVI também tem sido utilizado em estudos ambientais voltados à avaliação da qualidade da vegetação e da dinâmica de ecossistemas naturais. A maior sensibilidade do índice permite detectar alterações associadas a estresse hídrico, mudanças no uso da terra e impactos ambientais (Xu; Zhang, 2020; Costa; Lameira, 2022). Apesar de suas vantagens, tanto o EVI quanto o SAVI apresentam limitações que devem ser consideradas. O EVI exige

dados com maior qualidade radiométrica e correções atmosféricas adequadas, enquanto o SAVI depende da escolha apropriada do fator de ajuste do solo, o que pode influenciar os resultados (Huete *et al.*, 2002; Xue; Su, 2017). A aplicação integrada de diferentes índices espectrais tem se mostrado uma estratégia eficaz para ampliar a confiabilidade das análises. O uso combinado de NDVI, EVI e SAVI permite explorar as potencialidades de cada índice e minimizar suas limitações individuais (Neto; Danelichen, 2022; Alves *et al.*, 2024).

Com o avanço das plataformas de processamento e a ampliação do acesso a dados multiespectrais, a comparação entre índices espectrais tornou-se mais acessível. Ferramentas digitais facilitam a análise simultânea de diferentes índices, favorecendo decisões mais embasadas no planejamento agrícola e ambiental (Biazoto; Rosa, 2024). Dessa forma, o EVI e o SAVI consolidam-se como alternativas complementares ao NDVI em diferentes contextos ambientais. A escolha criteriosa do índice, ou a utilização integrada de múltiplos índices, amplia o potencial do sensoriamento remoto como suporte à tomada de decisões sustentáveis na gestão da vegetação e dos recursos naturais (Xu; Zhang, 2020).

5. Índices espectrais no monitoramento agrícola e ambiental

Os índices espectrais de vegetação têm se consolidado como ferramentas centrais no monitoramento agrícola e ambiental, ao permitir a avaliação contínua da dinâmica da vegetação em diferentes escalas espaciais e temporais. Sua aplicação possibilita acompanhar mudanças na cobertura vegetal, identificar padrões de uso do solo e subsidiar ações de planejamento sustentável (Xue; Su, 2017; Xu; Zhang, 2020). No monitoramento agrícola, os índices espectrais são amplamente utilizados para acompanhar o desenvolvimento das culturas ao longo do ciclo fenológico. A variação temporal de índices como NDVI, EVI e SAVI permite identificar fases críticas do crescimento vegetal e avaliar o desempenho das lavouras em diferentes períodos da safra (Araujo *et al.*, 2025).

A análise espectral contribui para a identificação de áreas com estresse vegetal associado a déficits hídricos, nutricionais ou fitossanitários. Reduções nos valores dos índices podem indicar alterações fisiológicas nas plantas, favorecendo a detecção precoce de problemas e a adoção de medidas corretivas no manejo agrícola (Goodwin *et al.*, 2008; Marin *et al.*, 2019). Os índices espectrais também desempenham papel relevante na

geração de zonas de manejo agrícola, ao evidenciar a variabilidade espacial das lavouras. A partir dessas informações, é possível orientar práticas de agricultura de precisão, como aplicação localizada de insumos, irrigação diferenciada e manejo específico por talhão (Biazoto; Rosa, 2024; Neto; Danelichen, 2022).

No contexto da agricultura de precisão, a integração de índices espectrais com dados de solo e clima amplia a capacidade de interpretação dos sistemas produtivos. Essa abordagem integrada favorece decisões mais assertivas e contribui para o uso racional dos recursos naturais (Xu; Zhang, 2020). Além do uso agrícola, os índices espectrais são amplamente aplicados no monitoramento ambiental, especialmente na avaliação da cobertura vegetal de ecossistemas naturais. Essas ferramentas permitem analisar processos de degradação, regeneração e conservação da vegetação em diferentes biomas (Albano *et al.*, 2017). Em áreas florestais, os índices espectrais auxiliam na análise da estrutura da vegetação e na estimativa indireta de biomassa. A relação entre os valores dos índices e atributos biofísicos das florestas reforça seu potencial como indicadores ambientais (Macedo *et al.*, 2017; Costa; Lameira, 2022).

O monitoramento de áreas urbanas também se beneficia do uso de índices espectrais, especialmente na avaliação da distribuição e da qualidade das áreas verdes. Esses indicadores contribuem para o planejamento urbano sustentável e para a melhoria da qualidade ambiental nas cidades (Albano *et al.*, 2017; Alves *et al.*, 2024). Os índices espectrais têm sido empregados no acompanhamento de mudanças no uso e cobertura da terra, permitindo identificar processos de conversão de áreas naturais em agrícolas ou urbanas. A análise temporal desses índices possibilita avaliar tendências e impactos associados às mudanças no uso do solo (Figueiredo, 2020; Xu; Zhang, 2020).

No monitoramento ambiental, os índices também auxiliam na avaliação de impactos decorrentes de eventos extremos, como secas prolongadas e alterações no regime de chuvas. A resposta espectral da vegetação a esses eventos fornece subsídios para análises de vulnerabilidade e resiliência dos ecossistemas (Goodwin *et al.*, 2008). A utilização de dados multiespectrais provenientes de diferentes sensores amplia o potencial do monitoramento agrícola e ambiental. A combinação de imagens de distintas resoluções espaciais e temporais favorece análises mais detalhadas e abrangentes da vegetação (Huete *et al.*, 2002; Alves *et al.*, 2024).

O avanço das plataformas de processamento de dados geoespaciais tem facilitado o acesso e a análise de índices espectrais em larga escala. Ferramentas digitais permitem

processar grandes volumes de dados e realizar análises comparativas de forma mais ágil e precisa (Biazoto; Rosa, 2024). Apesar das inúmeras aplicações, o monitoramento por índices espectrais exige interpretação cuidadosa dos resultados. Fatores como interferência atmosférica, heterogeneidade da paisagem e limitações dos sensores devem ser considerados para evitar interpretações equivocadas (Huete *et al.*, 2002; Xue; Su, 2017).

A validação em campo permanece como etapa fundamental para assegurar a confiabilidade das análises baseadas em índices espectrais. A integração entre dados espectrais e informações obtidas *in loco* fortalece a robustez dos estudos e amplia sua aplicabilidade prática (Marin *et al.*, 2019; Cardoso *et al.*, 2025). Dessa forma, os índices espectrais consolidam-se como ferramentas indispensáveis no monitoramento agrícola e ambiental. Ao fornecer informações objetivas sobre a dinâmica da vegetação, esses indicadores contribuem para decisões mais sustentáveis, apoiando a gestão eficiente dos recursos naturais e o planejamento territorial em diferentes contextos socioambientais (Xue; Su, 2017).

6. Índices espectrais como suporte à tomada de decisão sustentável

Os índices espectrais de vegetação têm se consolidado como importantes instrumentos de apoio à tomada de decisão sustentável, ao fornecer informações objetivas e especializadas sobre a condição da vegetação. Esses indicadores permitem transformar dados espectrais em subsídios técnicos para o planejamento agrícola, ambiental e territorial (Xue; Su, 2017; Xu; Zhang, 2020). No âmbito da agricultura, os índices espectrais auxiliam produtores e gestores na identificação da variabilidade espacial das lavouras, permitindo decisões mais precisas quanto ao manejo de insumos. A delimitação de zonas de manejo a partir de índices como NDVI, EVI e SAVI contribui para a eficiência produtiva e a redução de impactos ambientais (Biazoto; Rosa, 2024).

A tomada de decisão baseada em índices espectrais favorece o uso racional de recursos naturais, especialmente água e fertilizantes. Ao identificar áreas com diferentes níveis de vigor vegetal, é possível direcionar práticas de irrigação e adubação de forma localizada, reduzindo desperdícios e promovendo a sustentabilidade do sistema produtivo (Araujo *et al.*, 2025).

Os índices espectrais também desempenham papel relevante no planejamento ambiental, ao permitir a avaliação contínua da cobertura vegetal e a identificação de áreas

sob risco de degradação. Essas informações são fundamentais para orientar ações de conservação, recuperação ambiental e ordenamento do uso do solo (Albano *et al.*, 2017; Francisco *et al.*, 2015). No monitoramento de ecossistemas naturais, os índices de vegetação fornecem subsídios para decisões relacionadas à conservação da biodiversidade. A análise temporal desses indicadores possibilita acompanhar processos de degradação, regeneração e fragmentação da vegetação, apoiando estratégias de gestão ambiental (Figueiredo, 2020; Xu; Zhang, 2020).

A utilização de índices espectrais como suporte à decisão também se estende ao contexto urbano, especialmente na avaliação da qualidade ambiental. A análise da distribuição e do estado das áreas verdes contribui para o planejamento urbano sustentável e para a melhoria da qualidade de vida da população (Albano *et al.*, 2017; Alves *et al.*, 2024). No âmbito das políticas públicas, os índices espectrais oferecem dados confiáveis para o monitoramento ambiental em larga escala. Essas informações subsidiam a formulação de estratégias voltadas ao uso sustentável da terra, à mitigação de impactos ambientais e ao cumprimento de metas de sustentabilidade (Xue; Su, 2017). A integração dos índices espectrais com outras bases de dados, como informações climáticas, edáficas e socioeconômicas, amplia seu potencial como ferramenta de apoio à decisão. Essa abordagem integrada permite análises mais abrangentes e fundamentadas, fortalecendo o planejamento territorial e ambiental (Cardoso *et al.*, 2025).

Os avanços tecnológicos no processamento de dados geoespaciais têm facilitado o acesso aos índices espectrais e sua aplicação em diferentes escalas. Plataformas digitais e ambientes de processamento em nuvem permitem análises mais rápidas e precisas, ampliando o uso desses índices no suporte à decisão (Alves *et al.*, 2024; Biazoto; Rosa, 2024). Apesar de seu potencial, o uso dos índices espectrais na tomada de decisão sustentável exige interpretação cuidadosa dos resultados. Limitações associadas à resolução espacial, interferências atmosféricas e características do ambiente analisado devem ser consideradas para evitar decisões equivocadas (Huete *et al.*, 2002; Xue; Su, 2017). A validação das informações espectrais por meio de dados de campo permanece essencial para garantir a confiabilidade das decisões. A integração entre observações *in situ* e análises espectrais fortalece a robustez das conclusões e amplia a aplicabilidade prática dos índices (Marin *et al.*, 2019; Cardoso *et al.*, 2025).

No contexto da agricultura de precisão, a tomada de decisão orientada por índices espectrais contribui para a competitividade e a sustentabilidade dos sistemas produtivos.

O uso estratégico dessas ferramentas permite equilibrar produtividade e conservação ambiental, atendendo às demandas por produção sustentável (Biazoto; Rosa, 2024). Os índices espectrais também desempenham papel importante na avaliação de impactos ambientais e na gestão de riscos. A identificação precoce de alterações na vegetação possibilita respostas mais rápidas a eventos adversos, como secas, pragas ou mudanças no uso do solo (Goodwin *et al.*, 2008; Figueiredo, 2020).

A adoção dos índices espectrais como suporte à tomada de decisão sustentável tende a se intensificar à medida que se amplia o acesso aos dados e às ferramentas de análise. A democratização dessas tecnologias favorece sua incorporação em diferentes contextos produtivos e ambientais (Alves *et al.*, 2024). Assim, os índices espectrais configuram-se como instrumentos estratégicos para a tomada de decisão sustentável, ao integrar ciência, tecnologia e gestão ambiental. Seu uso criterioso contribui para o planejamento eficiente do território, a conservação dos recursos naturais e a promoção de sistemas agrícolas e ambientais mais resilientes e sustentáveis (Xu; Zhang, 2020; Xue; Su, 2017).

7. Conclusão

Os índices espectrais de vegetação consolidaram-se como ferramentas essenciais para a análise e o monitoramento da cobertura vegetal em diferentes contextos ambientais e produtivos. Ao longo deste capítulo, evidenciou-se que indicadores como NDVI, EVI e SAVI permitem traduzir informações espectrais complexas em dados objetivos, capazes de representar o vigor, a densidade e a dinâmica da vegetação. A compreensão dos fundamentos físicos e espectrais desses índices mostrou-se indispensável para sua correta aplicação e interpretação. O conhecimento sobre o comportamento da vegetação frente à radiação eletromagnética e sobre as limitações inerentes a cada índice é fundamental para evitar análises simplificadas ou conclusões imprecisas.

O NDVI destacou-se pela ampla aplicabilidade e facilidade de uso, sendo amplamente empregado no monitoramento agrícola, ambiental e urbano. No entanto, suas limitações em ambientes com alta biomassa ou forte influência do solo reforçam a importância da utilização de índices complementares, como o EVI e o SAVI. O EVI e o SAVI demonstraram elevado potencial para análises mais específicas, especialmente em áreas densamente vegetadas ou com cobertura vegetal esparsa. A escolha criteriosa do índice,

considerando as características ambientais da área de estudo, amplia a confiabilidade das análises e a qualidade das informações geradas.

A aplicação dos índices espectrais no monitoramento agrícola e ambiental evidenciou sua relevância para o acompanhamento do ciclo fenológico das culturas, a identificação de estresse vegetal, a avaliação da cobertura vegetal e o suporte à agricultura de precisão. Esses usos reforçam o papel estratégico dos índices na gestão eficiente dos sistemas produtivos. Além do contexto agrícola, os índices espectrais mostraram-se fundamentais para o planejamento ambiental, a conservação dos ecossistemas e a análise das mudanças no uso e cobertura da terra. Sua aplicação contribui para decisões mais informadas e alinhadas aos princípios da sustentabilidade.

O uso dos índices espectrais como suporte à tomada de decisão sustentável destacou a importância da integração entre dados espectrais, informações de solo, clima e uso da terra. Essa abordagem integrada fortalece o planejamento territorial e ambiental, promovendo o uso racional dos recursos naturais. Apesar dos avanços tecnológicos e da ampla disponibilidade de dados orbitais, o capítulo evidenciou que a interpretação dos índices espectrais requer cautela, validação em campo e conhecimento técnico. A combinação entre análises espectrais e observações in loco permanece essencial para garantir a confiabilidade dos resultados.

As perspectivas futuras indicam a ampliação do uso dos índices espectrais em ambientes digitais integrados, com maior acesso a plataformas de processamento e análise em larga escala. Esse cenário tende a fortalecer ainda mais o papel desses indicadores na gestão sustentável do território. Dessa forma, os índices espectrais NDVI, EVI e SAVI configuram-se como instrumentos estratégicos para decisões sustentáveis, ao conectar ciência, tecnologia e gestão ambiental. Seu uso adequado contribui para a promoção de sistemas agrícolas mais eficientes, a conservação ambiental e o planejamento responsável do uso da terra.

Referências Bibliográficas

- ALBANO, L. B. *et al.* Análise das áreas verdes urbanas como indicador de qualidade ambiental: uma abordagem em índice de vegetação. In: **VIII Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental**. 2017. p. 1-7.
- ALVES, W. D. *et al.* Análise comparativa entre classificação de imagens de satélite e índices espectrais de vegetação: estudo de caso do município de São Félix do Xingu-Pará. **Revista Foco**, v. 17, n. 9, p. e6319-e6319, 2024.
- ARAUJO, R. W. O. *et al.* Utilização de imageamento multiespectral por satélite para monitoramento de ciclo fenológico da cultura da soja. **Boletim de Conjuntura (BOCA)**, v. 23, n. 67, p. 197-224, 2025.
- ATATSI, E. A. *et al.* Learn in order to innovate: an exploration of individual and team learning as antecedents of innovative work behaviours in Ghanaian technical universities. **Sustainability**, v. 14, n. 7, p. 4012, 2022.
- BIAZOTO, J. C.; ROSA, H. A. Análise da dinâmica temporal de índices de vegetação na geração de zonas de manejo agrícola. **Revista Cultivando o Saber**, v. 17, p. 265-277, 2024.
- CARDOSO, M. M. *et al.* Correlação espacial entre NDVI multiescalar e atributos do solo em pastagem no Vale do Jamari, Rondônia. **Revista Delos**, v. 18, n. 71, p. e6845-e6845, 2025.
- CHAN, J. C. *et al.* An evaluation of ensemble classifiers for mapping Natura 2000 heathland in Belgium using spaceborne angular hyperspectral (CHRIS/Proba) imagery. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 18, p. 13-22, 2012.
- COSTA, A. S.; LAMEIRA, O. A. O uso do NDVI derivado das imagens Pléiades na análise na estrutura da vegetação em dois fragmentos florestais. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 1, p. e54711124170-e54711124170, 2022.
- FIGUEIREDO, T. A. Análise da variação temporal do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada no Parque Nacional da Serra do Gandarela em Minas Gerais utilizando imagens Landsat 8. **Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego**, v. 14, n. 2, p. 405-421, 2020.
- FRANCISCO, P. R. M. *et al.* Análise espectral e avaliação de índices de vegetação para o mapeamento da caatinga. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 10, n. 3, p. 26, 2015.
- GAMEIRO, S. *et al.* Avaliação da cobertura vegetal por meio de índices de vegetação (NDVI, SAVI e IAF) na Sub-Bacia Hidrográfica do Baixo Jaguaribe, CE. **Terræ**, v. 13, n. 1-2, p. 15-22, 2016.

- GOODWIN, N. R. *et al.* Estimation of insect infestation dynamics using a temporal sequence of Landsat data. **Remote sensing of environment**, v. 112, n. 9, p. 3680-3689, 2008.
- HUETE, A. *et al.* Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote sensing of environment**, v. 83, n. 1-2, p. 195-213, 2002.
- HUETE, A. R. *et al.* A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. **Remote sensing of environment**, v. 59, n. 3, p. 440-451, 1997.
- LEITE, A. P.; SANTOS, G. R.; SANTOS, J. É. O. Análise temporal dos índices de vegetação NDVI e SAVI na Estação Experimental de Itatinga utilizando imagens Landsat 8. **Revista brasileira de energias renováveis**, v. 6, n. 4, p. 606-623, 2017.
- MACEDO, F. L. *et al.* Estimativa do volume de madeira para Eucalyptus sp. com imagens de satélite de alta resolução espacial. **Scientia Forestalis**, v. 45, n. 114, p. 237-247, 2017.
- MARIN, D. B. *et al.* Sensoriamento remoto multiespectral na identificação e mapeamento das variáveis bióticas e abióticas do cafeeiro. **Revista Ceres**, v. 66, n. 2, p. 142-153, 2019.
- NETO, F. S. S.; DANELICHEN, V. H. M. Estudo do uso de índices de vegetação nas culturas do Brasil. **Uniciências**, v. 26, n. 2, p. 100-107, 2022.
- NONATO, C. T.; ABREU, Y. V. Mineração de dados para identificação de florestas plantadas destinadas à produção de bioenergia utilizando imagens de satélite. **Energia na Agricultura**, v. 30, n. 3, p. 294-301, 2015.
- RISSO, J. *et al.* Índices de vegetação Modis aplicados na discriminação de áreas de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, p. 1317-1326, 2012.
- TUCKER, C. J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. **Remote sensing of Environment**, v. 8, n. 2, p. 127-150, 1979.
- XU, E.; ZHANG, H. Change pathway and intersection of rainfall, soil, and land use influencing water-related soil erosion. **Ecological Indicators**, v. 113, p. 106281, 2020.
- XUE, J.; SU, B. Significant remote sensing vegetation indices: A review of developments and applications. **Journal of sensors**, v. 2017, n. 1, p. 1353691, 2017.



CAPÍTULO 10

BIOTECNOLOGIA MICROBIANA: CONTROLE BIOLÓGICO E SUSTENTABILIDADE PRODUTIVA

Carla Michelle da Silva

Jefferson Santos de Amorim

Airton Kleber Gomes Matos

Talys Moratti Lemos de Oliveira

Antônio Veimar da Silva

1. Introdução

A biotecnologia microbiana tem assumido papel estratégico na agricultura contemporânea, especialmente diante da necessidade de sistemas produtivos mais sustentáveis e ambientalmente equilibrados. O uso de microrganismos benéficos como ferramentas biotecnológicas representa uma alternativa promissora para o manejo de pragas e doenças, reduzindo a dependência de insumos químicos e contribuindo para a conservação dos agroecossistemas (Lopes *et al.*, 2021; Naves *et al.*, 2024). Historicamente, o controle fitossanitário na agricultura baseou-se predominantemente no uso de defensivos químicos, os quais, apesar de sua eficiência imediata, estão associados a impactos negativos sobre o ambiente, a saúde humana e a biodiversidade. Nesse contexto, o controle biológico surge como uma estratégia sustentável, fundamentada na utilização

de organismos vivos ou de seus metabólitos para suprimir populações de patógenos e pragas agrícolas (Bortoloti; Sampaio, 2022).

Microrganismos como bactérias e fungos apresentam ampla diversidade funcional e elevado potencial biotecnológico. Esses organismos atuam por diferentes mecanismos, incluindo antagonismo, antibiose, competição por nutrientes e indução de resistência em plantas, configurando-se como aliados naturais no manejo integrado de culturas (Lopes *et al.*, 2021; Gazola *et al.*, 2024). Entre os agentes microbianos mais estudados e utilizados no controle biológico destacam-se espécies dos gêneros *Bacillus* e *Trichoderma*, amplamente reconhecidas por sua eficácia no controle de patógenos de solo e doenças foliares. Além disso, fungos entomopatogênicos e bactérias bioinseticidas têm demonstrado eficiência no controle de insetos-praga de importância econômica (Abreu *et al.*, 2025).

A biotecnologia microbiana também se relaciona diretamente à promoção do crescimento vegetal e à melhoria da saúde do solo. Microrganismos benéficos podem atuar como rizobactérias promotoras de crescimento, endofíticos ou agentes de solubilização de nutrientes, contribuindo para o aumento da produtividade agrícola de forma sustentável (Monteiro *et al.*, 2025). O avanço do mercado de bioinsumos no Brasil reflete a crescente demanda por soluções agrícolas mais sustentáveis e alinhadas às exigências ambientais e regulatórias. No entanto, a incorporação dessas tecnologias ainda enfrenta desafios relacionados à produção em escala, à regulamentação, à adoção pelos produtores e à transferência de tecnologia (Bortoloti; Sampaio, 2022).

Além do uso direto no controle biológico, os microrganismos apresentam potencial para aplicações biotecnológicas mais amplas, como a produção de enzimas, metabólitos secundários, biofilmes e compostos com aplicações na agricultura, na indústria e na conservação de alimentos. Essas aplicações ampliam o papel da biotecnologia microbiana na promoção da sustentabilidade produtiva (Bauermeister *et al.*, 2010; Ortiz *et al.*, 2024). Nesse sentido, o objetivo do presente capítulo é discutir os fundamentos, as aplicações e os desafios da biotecnologia microbiana na agricultura, com ênfase no controle biológico de pragas e doenças, destacando o papel dos microrganismos na promoção da sustentabilidade produtiva e na construção de sistemas agrícolas mais eficientes e ambientalmente responsáveis.

2. Fundamentos da biotecnologia microbiana aplicada à agricultura

A biotecnologia microbiana aplicada à agricultura baseia-se no uso intencional de microrganismos ou de seus produtos metabólicos para melhorar processos produtivos, controlar pragas e doenças e promover a sustentabilidade dos sistemas agrícolas. Essa abordagem utiliza o potencial biológico de bactérias, fungos e outros microrganismos para atuar de forma benéfica nos agroecossistemas (Lopes *et al.*, 2021; Naves *et al.*, 2024). Os fundamentos dessa área estão associados à compreensão das interações entre microrganismos, plantas, solo e ambiente. Microrganismos agrícolas podem estabelecer relações simbióticas, associativas ou antagonistas, influenciando diretamente o crescimento vegetal, a sanidade das culturas e a dinâmica dos nutrientes no solo (Ribeiro; Pamphile, 2017; Brito *et al.*, 2016).

A diversidade microbiana presente nos solos agrícolas constitui a base funcional da biotecnologia microbiana. Solos biologicamente ativos abrigam comunidades complexas de microrganismos capazes de desempenhar funções essenciais, como ciclagem de nutrientes, decomposição da matéria orgânica e supressão natural de patógenos (Silva; Malta, 2016). Do ponto de vista conceitual, a biotecnologia microbiana engloba práticas como inoculação de microrganismos benéficos, uso de bioinsumos, aplicação de metabólitos microbianos e exploração de enzimas de interesse agrícola. Essas práticas visam substituir ou complementar insumos químicos convencionais (Pereira; Martins, 2016; Bortoloti; Sampaio, 2022).

As bactérias e os fungos representam os principais grupos de microrganismos utilizados na biotecnologia agrícola. Esses organismos apresentam elevada plasticidade metabólica, capacidade de adaptação a diferentes ambientes e múltiplos mecanismos de ação benéficos às plantas (Gazola *et al.*, 2024). Entre os mecanismos de ação mais relevantes destacam-se a produção de substâncias antimicrobianas, a competição por espaço e nutrientes e a indução de resistência sistêmica em plantas. Esses processos reduzem a incidência de doenças e contribuem para a estabilidade dos sistemas produtivos (Abreu *et al.*, 2025; Machado *et al.*, 2012). A biotecnologia microbiana também está associada à promoção do crescimento vegetal por meio da produção de fitohormônios, solubilização de nutrientes e melhoria da absorção radicular. Esses efeitos refletem-se em maior vigor das plantas e melhor desempenho produtivo (Monteiro *et al.*, 2025; Lopes *et al.*, 2021).

Outro fundamento importante dessa área é a especificidade das interações microbianas. A eficácia dos microrganismos depende de fatores como espécie vegetal, condições edafoclimáticas e manejo agrícola, o que exige conhecimento técnico para a correta aplicação das tecnologias (Naves *et al.*, 2024; Bortoloti; Sampaio, 2022). O uso de microrganismos na agricultura também se fundamenta em princípios ecológicos, buscando fortalecer processos naturais de regulação biológica. Essa perspectiva contribui para a redução de desequilíbrios ecológicos causados pelo uso excessivo de defensivos químicos (Gazola *et al.*, 2024). A biotecnologia microbiana está intimamente ligada ao conceito de agricultura sustentável, pois promove a conservação do solo, da água e da biodiversidade. A incorporação de microrganismos benéficos contribui para sistemas produtivos mais resilientes e ambientalmente responsáveis (Lopes *et al.*, 2021).

No Brasil, a aplicação da biotecnologia microbiana tem crescido de forma significativa, impulsionada pela expansão do mercado de bioinsumos e pelo avanço das pesquisas científicas. Esse cenário reflete a busca por soluções inovadoras que conciliem produtividade e sustentabilidade (Bortoloti; Sampaio, 2022; Santos *et al.*, 2025). Apesar de seu potencial, a biotecnologia microbiana enfrenta desafios relacionados à produção em escala, à padronização dos produtos e à aceitação pelos produtores. A compreensão dos fundamentos científicos é essencial para superar essas limitações e ampliar a adoção dessas tecnologias (Naves *et al.*, 2024; Pereira; Martins, 2016).

A pesquisa científica desempenha papel central no avanço da biotecnologia microbiana, ao investigar novos microrganismos, mecanismos de ação e formas de aplicação. O conhecimento gerado orienta o desenvolvimento de produtos mais eficientes e adaptados às diferentes realidades agrícolas (Gazola *et al.*, 2024). Dessa forma, os fundamentos da biotecnologia microbiana aplicada à agricultura evidenciam seu papel estratégico na construção de sistemas produtivos sustentáveis. Ao integrar princípios ecológicos, inovação tecnológica e manejo agrícola, essa abordagem amplia as possibilidades de controle biológico, promoção do crescimento vegetal e sustentabilidade produtiva (Lopes *et al.*, 2021).

3. Bactérias no controle biológico de pragas e doenças

As bactérias desempenham papel central no controle biológico de pragas e doenças agrícolas, devido à sua diversidade metabólica e à capacidade de atuar por diferentes mecanismos de supressão de organismos fitopatogênicos. A utilização desses

microrganismos representa uma alternativa sustentável ao controle químico convencional, contribuindo para sistemas produtivos mais equilibrados (Lopes *et al.*, 2021).

Entre os gêneros bacterianos mais utilizados no controle biológico destaca-se *Bacillus*, amplamente reconhecido por sua eficiência no controle de patógenos e insetos-praga. Espécies desse gênero apresentam elevada capacidade de sobrevivência no ambiente, produção de esporos e síntese de metabólitos bioativos com ação antimicrobiana e inseticida (Becheleni; Campolino, 2017). O *Bacillus thuringiensis* é um dos exemplos mais consolidados de bactéria utilizada como bioinseticida. Seus cristais proteicos apresentam toxicidade específica a determinados grupos de insetos, permitindo o controle eficiente de pragas agrícolas com baixo impacto ambiental e reduzido risco à saúde humana (Becheleni; Campolino, 2017; Pereira; Martins, 2016).

Além do controle de insetos, espécies de *Bacillus* também são utilizadas no manejo de doenças fúngicas de plantas. A produção de antibióticos, enzimas hidrolíticas e compostos voláteis contribui para a inibição do crescimento de fitopatógenos no solo e na rizosfera (Abreu *et al.*, 2025). Outro grupo bacteriano de interesse no controle biológico é o gênero *Lysinibacillus*, que apresenta potencial para aplicações agrícolas e biotecnológicas. Essas bactérias têm sido estudadas por sua capacidade de produção de enzimas e compostos bioativos, além de sua possível atuação no controle de organismos nocivos (Gonçalves; Santos; Assunção, 2025). As bactérias também se destacam no controle biológico de fitonematóides, pragas de difícil manejo que causam prejuízos significativos à agricultura. Diferentes espécies bacterianas atuam por meio da produção de toxinas, enzimas e competição por nichos ecológicos, reduzindo a população desses organismos no solo (Machado *et al.*, 2012).

O mecanismo de competição por nutrientes e espaço é outro fator relevante no controle biológico bacteriano. Ao colonizar rapidamente a rizosfera, as bactérias benéficas limitam o estabelecimento de patógenos, promovendo um ambiente menos favorável ao desenvolvimento de doenças (Ribeiro; Pamphile, 2017; Brito *et al.*, 2016). Além da ação direta sobre pragas e patógenos, algumas bactérias atuam na indução de resistência sistêmica em plantas. Esse mecanismo estimula as defesas naturais das culturas, tornando-as menos suscetíveis ao ataque de organismos nocivos (Lopes *et al.*, 2021).

A aplicação de bactérias no controle biológico pode ocorrer de diferentes formas, incluindo tratamentos de sementes, aplicação no solo e pulverizações foliares. A escolha

da estratégia depende do alvo biológico, da cultura agrícola e das condições ambientais (Pereira; Martins, 2016; Naves *et al.*, 2024). No contexto da agricultura sustentável, o uso de bactérias como agentes de controle biológico contribui para a redução do uso de defensivos químicos e para a preservação da biodiversidade do solo. Essa abordagem fortalece os processos naturais de regulação biológica nos agroecossistemas (Bortoloti; Sampaio, 2022; Brito *et al.*, 2016). Apesar das vantagens, a eficiência do controle biológico bacteriano pode ser influenciada por fatores ambientais, como temperatura, umidade e características do solo. A adaptação das cepas às condições locais é essencial para o sucesso das aplicações (Naves *et al.*, 2024).

Outro desafio associado ao uso de bactérias no controle biológico refere-se à produção em escala e à estabilidade dos produtos comerciais. A formulação adequada e o armazenamento são aspectos críticos para garantir a viabilidade e a eficácia dos microrganismos (Bortoloti; Sampaio, 2022). A pesquisa científica tem contribuído para o desenvolvimento de cepas bacterianas mais eficientes e adaptadas ao uso agrícola. Estudos envolvendo seleção, melhoramento e caracterização genética ampliam o potencial de aplicação dessas bactérias no controle biológico (Gonçalves; Santos; Assunção, 2025; Santos *et al.*, 2025).

No Brasil, o uso de bactérias no controle biológico tem avançado de forma consistente, impulsionado pela expansão do mercado de bioinsumos e pela crescente demanda por práticas agrícolas sustentáveis. Esse cenário reforça a importância das bactérias como aliadas estratégicas na produção agrícola moderna (Bortoloti; Sampaio, 2022). Portanto, as bactérias configuram-se como agentes fundamentais no controle biológico de pragas e doenças, ao combinar eficiência agrônômica e sustentabilidade ambiental. Sua utilização integrada a outras práticas de manejo contribui para sistemas produtivos mais resilientes, equilibrados e alinhados aos princípios da agricultura sustentável (Lopes *et al.*, 2021; Abreu *et al.*, 2025).

4. Fungos de interesse agrícola no controle biológico

Os fungos ocupam posição de destaque no controle biológico agrícola devido à sua ampla diversidade funcional e capacidade de atuar diretamente sobre pragas, patógenos e processos fisiológicos das plantas. A utilização de fungos como agentes de biocontrole representa uma estratégia sustentável, alinhada à redução do uso de insumos químicos e à conservação ambiental (Gazola *et al.*, 2024; Lopes *et al.*, 2021).

Entre os fungos mais empregados na agricultura, destacam-se aqueles do gênero *Trichoderma*, reconhecidos por sua eficácia no controle de doenças de plantas e na promoção do crescimento vegetal. Esses microrganismos atuam por múltiplos mecanismos, incluindo antibiose, micoparasitismo e competição por recursos no solo (Abreu *et al.*, 2025). O micoparasitismo é um dos principais mecanismos de ação de *Trichoderma*, caracterizado pela capacidade do fungo de reconhecer, colonizar e degradar estruturas de outros fungos patogênicos. Esse processo envolve a produção de enzimas hidrolíticas, como quitinases e glucanases, que comprometem a integridade celular dos patógenos (Bauermeister *et al.*, 2010). Além do controle direto de fitopatógenos, fungos do gênero *Trichoderma* contribuem para a indução de resistência sistêmica em plantas. Esse mecanismo fortalece as defesas naturais das culturas, reduzindo a incidência e a severidade de doenças ao longo do ciclo produtivo (Lopes *et al.*, 2021; Abreu *et al.*, 2025).

Outro grupo de fungos amplamente utilizado no controle biológico é o dos fungos entomopatogênicos, como *Metarhizium anisopliae*. Esses organismos são capazes de infectar e matar insetos-praga, atuando como bioinseticidas naturais em diversos sistemas agrícolas (Orlandelli; Pamphile, 2011). Os fungos entomopatogênicos penetram no hospedeiro por contato direto com a cutícula do inseto, produzindo enzimas e toxinas que levam à morte do organismo. Esse modo de ação torna esses fungos ferramentas eficientes no manejo de pragas, especialmente em sistemas de produção sustentável (Dias; Soares; Monnerat, 2004; Vilela; Vieira, 2023). Além dos fungos de solo e entomopatogênicos, os fungos endofíticos também apresentam elevado potencial biotecnológico. Esses microrganismos vivem no interior das plantas sem causar danos, podendo conferir proteção contra pragas, doenças e estresses ambientais (Pamphile *et al.*, 2017; Ribeiro; Pamphile, 2017).

Os fungos endofíticos produzem metabólitos secundários com propriedades antifúngicas, antibacterianas e inseticidas, contribuindo para a defesa das plantas hospedeiras. Essa interação simbiótica amplia as possibilidades de aplicação da biotecnologia microbiana na agricultura (Pamphile *et al.*, 2017; Lopes *et al.*, 2021). Outro aspecto relevante do uso de fungos no controle biológico é sua contribuição para a saúde do solo. A presença desses microrganismos favorece a atividade biológica, a ciclagem de nutrientes e a estruturação do solo, criando condições mais favoráveis ao desenvolvimento das culturas (Lopes *et al.*, 2021). Apesar de seus benefícios, a utilização de fungos no controle biológico enfrenta desafios relacionados à adaptação às condições

ambientais e à estabilidade das formulações comerciais. Fatores como temperatura, umidade e pH do solo influenciam diretamente a eficiência desses organismos (Naves *et al.*, 2024; Gazola *et al.*, 2024).

A produção e a formulação de bioinsumos fúngicos exigem tecnologias adequadas para garantir a viabilidade e a eficácia dos microrganismos durante o armazenamento e a aplicação no campo. Esses aspectos são fundamentais para ampliar a adoção do controle biológico fúngico em larga escala (Pereira; Martins, 2016). No Brasil, o uso de fungos no controle biológico tem crescido de forma expressiva, impulsionado pelo avanço das pesquisas científicas e pelo fortalecimento do setor de bioinsumos. Esse movimento reflete a busca por soluções agrícolas mais sustentáveis e inovadoras (Bortoloti; Sampaio, 2022).

A integração de fungos de interesse agrícola com outras práticas de manejo, como rotação de culturas e uso de bactérias benéficas, potencializa os resultados do controle biológico. Essa abordagem sistêmica favorece a estabilidade dos agroecossistemas (Lopes *et al.*, 2021; Gazola *et al.*, 2024). Assim, os fungos de interesse agrícola consolidam-se como componentes estratégicos no controle biológico, ao combinar eficiência no manejo de pragas e doenças com benefícios ambientais. Sua aplicação contribui para a construção de sistemas produtivos sustentáveis, resilientes e alinhados às demandas da agricultura moderna (Abreu *et al.*, 2025; Gazola *et al.*, 2024).

5. Microrganismos endofíticos, rizobactérias e interação com plantas

Os bioinsumos têm ganhado destaque como componentes estratégicos na agricultura sustentável, ao integrarem microrganismos, metabólitos e processos biológicos voltados à melhoria da produtividade e à redução dos impactos ambientais. Esses insumos incluem biofertilizantes, bioestimulantes, inoculantes e agentes de controle biológico, constituindo uma alternativa aos insumos químicos convencionais (Bortoloti; Sampaio, 2022; Lopes *et al.*, 2021).

Os inoculantes microbianos representam uma das principais categorias de bioinsumos, sendo utilizados para promover o crescimento vegetal, aumentar a eficiência nutricional e proteger as culturas contra patógenos. Sua aplicação baseia-se na inoculação direcionada de microrganismos benéficos no solo ou nas plantas (Lopes *et al.*, 2021). A utilização de inoculantes permite a exploração de mecanismos como fixação biológica de nitrogênio, solubilização de fósforo e produção de fitohormônios. Esses processos

contribuem para o aumento da produtividade agrícola e para a redução da dependência de fertilizantes sintéticos (Pereira; Martins, 2016; Sousa *et al.*, 2025). Os biofertilizantes microbianos também desempenham papel relevante na melhoria da fertilidade do solo, ao estimular a atividade biológica e a ciclagem de nutrientes. Esses produtos favorecem o equilíbrio microbiológico do solo, promovendo ambientes mais saudáveis para o desenvolvimento das culturas (Lopes *et al.*, 2021; Brito *et al.*, 2016).

No contexto do controle biológico, os bioinsumos oferecem soluções eficazes para o manejo integrado de pragas e doenças. A aplicação conjunta de bactérias e fungos benéficos potencializa os efeitos de supressão de patógenos e contribui para a estabilidade dos agroecossistemas (Abreu *et al.*, 2025). As tecnologias emergentes têm ampliado as possibilidades de uso dos bioinsumos na agricultura. Avanços em biotecnologia, microbiologia e engenharia genética permitem a seleção de cepas mais eficientes e adaptadas a diferentes condições edafoclimáticas (Naves *et al.*, 2024; Santos *et al.*, 2025). A integração entre bioinsumos e tecnologias digitais, como agricultura de precisão e sistemas de monitoramento, favorece a aplicação mais eficiente desses produtos. O uso de dados agronômicos possibilita ajustes na dosagem, no momento e na forma de aplicação, aumentando a eficácia dos inoculantes (Araújo; Junior; Santana, 2024).

Outro avanço importante refere-se ao desenvolvimento de consórcios microbianos, que combinam diferentes microrganismos com funções complementares. Essa estratégia amplia o espectro de atuação dos bioinsumos e melhora a adaptação às variáveis ambientais (Lopes *et al.*, 2021; Gazola *et al.*, 2024). A produção on farm de bioinsumos tem se destacado como alternativa viável para pequenos e médios produtores. Essa prática reduz custos, aumenta a autonomia dos agricultores e estimula a adoção de práticas sustentáveis no campo (Bortoloti; Sampaio, 2022; Sousa *et al.*, 2025). Apesar dos avanços, a adoção de bioinsumos ainda enfrenta desafios, como a falta de conhecimento técnico, a variabilidade de resultados e a necessidade de regulamentação adequada. A capacitação dos produtores é essencial para garantir o uso correto dessas tecnologias (Naves *et al.*, 2024; Lopes *et al.*, 2021).

O marco regulatório brasileiro tem evoluído para acompanhar o crescimento do setor de bioinsumos, criando condições mais favoráveis para pesquisa, produção e comercialização desses produtos. Esse cenário fortalece o mercado e estimula a inovação tecnológica no agronegócio (Bortoloti; Sampaio, 2022; Santos *et al.*, 2025). As agtechs

desempenham papel fundamental no desenvolvimento e na difusão de tecnologias emergentes relacionadas aos bioinsumos. Essas empresas atuam na criação de soluções inovadoras que conectam biotecnologia, agricultura digital e sustentabilidade (Junior; Sordi, 2019; Costa *et al.*, 2024).

A adoção de bioinsumos também contribui para a mitigação dos impactos ambientais da agricultura, como a redução da contaminação do solo e da água. Esses benefícios reforçam o alinhamento das tecnologias microbianas com os princípios da sustentabilidade produtiva (Viola; Mendes, 2022; Lopes *et al.*, 2021). Contudo, os bioinsumos, os inoculantes e as tecnologias emergentes consolidam-se como pilares da agricultura sustentável contemporânea. Ao integrar inovação biotecnológica, manejo ecológico e eficiência produtiva, essas ferramentas ampliam as possibilidades de uma produção agrícola mais resiliente, responsável e alinhada às demandas ambientais e sociais (Naves *et al.*, 2024).

6. Bioinsumos, inovação e desafios da biotecnologia microbiana

Os bioinsumos representam uma das principais expressões da inovação no campo da biotecnologia microbiana aplicada à agricultura. Esses produtos, formulados a partir de microrganismos ou de seus metabólitos, têm como objetivo promover o crescimento vegetal, controlar pragas e doenças e melhorar a qualidade do solo de forma sustentável (Bortoloti; Sampaio, 2022; Lopes *et al.*, 2021). A expansão do uso de bioinsumos está diretamente associada à necessidade de reduzir a dependência de insumos químicos sintéticos, cujos impactos ambientais e sociais têm sido amplamente discutidos. Nesse contexto, a biotecnologia microbiana surge como alternativa estratégica para conciliar produtividade agrícola e conservação dos recursos naturais (Viola; Mendes, 2022).

A inovação nesse setor tem sido impulsionada por avanços científicos na microbiologia, na biotecnologia e nas ciências agrárias. A identificação de novas cepas microbianas, o aprimoramento de técnicas de isolamento e a compreensão dos mecanismos de ação ampliam o potencial de aplicação dos bioinsumos (Gazola *et al.*, 2024; Santos *et al.*, 2025). O desenvolvimento de inoculantes mais eficientes e adaptados às condições edafoclimáticas locais é um dos focos da inovação biotecnológica. A seleção de microrganismos com maior capacidade de sobrevivência e desempenho no campo contribui para resultados mais consistentes e previsíveis (Lopes *et al.*, 2021).

Outro aspecto inovador refere-se à formulação dos bioinsumos. Tecnologias que aumentam a estabilidade, a viabilidade e a vida útil dos microrganismos são fundamentais para garantir a eficácia dos produtos desde a produção até a aplicação no campo (Pereira; Martins, 2016; Bortoloti; Sampaio, 2022). A integração entre bioinsumos e agricultura digital também tem ampliado as possibilidades de inovação. O uso de dados agronômicos, sensores e sistemas de apoio à decisão permite aplicações mais precisas, reduzindo desperdícios e aumentando a eficiência dos microrganismos utilizados (Araújo; Junior; Santana, 2024; Massruhá; Leite, 2016). Apesar dos avanços, a biotecnologia microbiana enfrenta desafios relevantes. Um dos principais está relacionado à variabilidade de desempenho dos bioinsumos em diferentes ambientes agrícolas, uma vez que fatores como clima, solo e manejo influenciam diretamente a ação dos microrganismos (Naves *et al.*, 2024).

A falta de conhecimento técnico por parte de produtores e profissionais do setor constitui outro obstáculo à adoção dos bioinsumos. A aplicação inadequada, seja por dosagem incorreta ou por incompatibilidade com outros insumos, pode comprometer os resultados esperados (Pereira; Martins, 2016). Questões relacionadas à regulamentação e à padronização dos produtos também representam desafios para o setor. A necessidade de garantir qualidade, segurança e eficácia exige marcos regulatórios claros e alinhados ao avanço científico (Santos *et al.*, 2025).

Do ponto de vista econômico, a percepção de risco ainda limita a adoção dos bioinsumos por parte de alguns produtores. A comparação com insumos químicos de ação imediata pode gerar resistência inicial, especialmente em sistemas produtivos mais intensivos (Viola; Mendes, 2022; Lopes *et al.*, 2021). As agtechs e startups de base biotecnológica desempenham papel fundamental na superação desses desafios. Essas empresas atuam na transferência de tecnologia, no desenvolvimento de soluções inovadoras e na aproximação entre pesquisa científica e setor produtivo (Junior; Sordi, 2019; Costa *et al.*, 2024).

A produção on-farm de bioinsumos também surge como alternativa inovadora, sobretudo para pequenos e médios produtores. Essa prática promove autonomia, redução de custos e fortalecimento de sistemas agrícolas sustentáveis, desde que acompanhada de orientação técnica adequada (Bortoloti; Sampaio, 2022; Sousa *et al.*, 2025). Do ponto de vista ambiental, os bioinsumos contribuem para a melhoria da saúde do solo, a preservação da biodiversidade e a redução da contaminação dos recursos naturais. Esses

benefícios reforçam o papel da biotecnologia microbiana como aliada da sustentabilidade produtiva (Lopes *et al.*, 2021). Nesse sentido, os bioinsumos sintetizam o potencial inovador da biotecnologia microbiana, ao mesmo tempo em que evidenciam desafios técnicos, regulatórios e culturais. A superação desses desafios depende da integração entre ciência, inovação, políticas públicas e capacitação, consolidando a biotecnologia microbiana como eixo estratégico da agricultura sustentável contemporânea (Naves *et al.*, 2024).

7. Conclusão

A biotecnologia microbiana aplicada à agricultura evidencia-se, ao longo deste capítulo, como uma das estratégias mais promissoras para a construção de sistemas produtivos sustentáveis e resilientes. O uso de microrganismos benéficos no controle biológico de pragas e doenças, na promoção do crescimento vegetal e na melhoria da saúde do solo reforça a importância de abordagens que valorizem os processos naturais dos agroecossistemas. A análise dos fundamentos da biotecnologia microbiana demonstrou que a compreensão das interações entre microrganismos, plantas e ambiente é essencial para o sucesso dessas tecnologias. Bactérias e fungos, quando corretamente selecionados e manejados, apresentam elevado potencial para substituir ou complementar insumos químicos, contribuindo para a redução de impactos ambientais e para a conservação da biodiversidade agrícola.

Os diferentes grupos microbianos discutidos ao longo do capítulo, como bactérias do gênero *Bacillus*, fungos do gênero *Trichoderma* e microrganismos entomopatogênicos e endofíticos, evidenciam a diversidade de mecanismos de ação disponíveis para o manejo biológico. Essa diversidade amplia as possibilidades de aplicação da biotecnologia microbiana em distintos sistemas produtivos e contextos regionais. A incorporação de bioinsumos e inoculantes representa um avanço significativo no processo de inovação agrícola, especialmente quando integrada a tecnologias digitais e práticas de manejo sustentável. No entanto, o capítulo também evidencia que a adoção dessas soluções depende de fatores como capacitação técnica, adequação às condições locais, regulamentação eficiente e aceitação por parte dos produtores.

Os desafios associados à variabilidade de resultados, à produção em escala e à transferência de tecnologia não anulam o potencial da biotecnologia microbiana. Pelo contrário, reforçam a necessidade de investimentos contínuos em pesquisa, extensão

rural e políticas públicas que estimulem a inovação e a difusão do conhecimento científico no campo. Assim, a biotecnologia microbiana consolida-se como um eixo estratégico da agricultura contemporânea, alinhando produtividade, sustentabilidade e inovação. Sua integração aos sistemas agrícolas modernos contribui para a construção de modelos produtivos mais equilibrados, capazes de atender às demandas ambientais, sociais e econômicas da produção de alimentos no século XXI.

Referências Bibliográficas

- ABREU, L. P. S. *et al.* Controle Biológico de *Sclerotinia sclerotiorum*: Ação de *Bacillus* spp. e *Trichoderma harzianum*. **Revista Brasileira de Meio Ambiente**, v. 13, n. 2, 2025.
- BAUERMEISTER, A. *et al.* beta-(1, 3)-Glucanases Fúngicas: Produção e Aplicações Biotecnológicas. **Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas**, v. 31, n. 2, p. 75-86, 2010.
- BECHELENI, F. R. C.; CAMPOLINO, M. L. Aplicação Biotecnológica da bactéria *Bacillus thuringiensis* no controle biológico da lagarta do cartucho *Spodoptera frugiperda*. **Revista Brasileira de Ciências da Vida**, v. 5, n. 1, 2017.
- BORTOLOTTI, G.; SAMPAIO, R. M. Demandas tecnológicas: os bioinsumos para controle biológico no Brasil. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, v. 39, n. 1, p. e26927, 2022.
- BRITO, M. F. *et al.* Diversidade da fauna edáfica e epigeica de invertebrados em consórcio de mandioca com adubos verdes. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, p. 253-260, 2016.
- DIAS, D. G. S.; SOARES, C. M. S.; MONNERAT, R. Avaliação de larvicidas de origem microbiana no controle da traça-das-crucíferas em couve-flor. **Horticultura Brasileira**, v. 22, p. 553-556, 2004.
- GAZOLA, V. D. *et al.* Importância de fungos do gênero *Trichoderma* para a agricultura: mecanismos de ação e melhoramento genético. **Peer Review**, v. 6, n. 16, p. 141-156, 2024.
- GONÇALVES, F. G. M. F.; SANTOS, F. A. C.; ASSUNÇÃO, J. C. C. *Bacillus* spp. e *Lysinibacillus* spp. como Candidatos à Degradação Lignocelulósica em *Teredinidae*: Evidências, Lacunas e Perspectivas Biotecnológicas. **Brazilian Journal of Biological Sciences**, v. 12, n. 27, p. e547-e547, 2025.
- LOPES, M. J. S. *et al.* Biotecnologia microbiana: inoculação, mecanismos de ação e benefícios às plantas. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 12, p. e356101220585, 2021.
- MACHADO, V. *et al.* Bactérias como agentes de controle biológico de fitonematóides. **Oecologia Australis**, v. 16, n. 2, p. 165-182, 2012.
- MONTEIRO, N. O. C. *et al.* Uso de coberturas vegetais e rizobactérias benéficas no feijão-comum. **Revista Contemporânea**, v. 5, n. 4, p. e8005, 2025.
- NAVES, A. G. L. *et al.* Desafios e oportunidades na incorporação de tecnologias biotecnológicas na agricultura. **Revista Delos**, v. 17, n. 55, p. e1444, 2024.
- ORLANDELLI, R. C.; PAMPHILE, J. A. Fungo Entomopatogênico *Metarhizium anisopliae* como agente de controle biológico de insetos pragas. **SaBios-Revista de Saúde e Biologia**, v. 6, n. 2, 2011.

ORTIZ, T. A. *et al.* Biofilmes: tecnologia na conservação de frutas em prol da segurança alimentar, sustentabilidade ambiental e viabilidade econômica. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, v. 11, n. 28, p. 961-973, 2024.

PAMPHILE, J. A. *et al.* Aplicações biotecnológicas de metabólitos secundários extraídos de fungos endofíticos: o caso do *Colletotrichum* sp. **Revista uningá**, v. 53, n. 1, 2017.

PEREIRA, E. L.; MARTINS, B. A. Processos biotecnológicos na produção de bioinseticidas. **Revista da Universidade Vale do Rio Verde**, v. 14, n. 2, p. 714-734, 2016.

POLLI, A. *et al.* Aspectos da interação dos microrganismos endofíticos com plantas hospedeiras e sua aplicação no controle biológico de pragas na agricultura. **SaBios-Revista de Saúde e Biologia**, v. 7, n. 2, 2012.

RIBEIRO, A. S.; PAMPHILE, J. A. Micro-organismos endofíticos e seu potencial biotecnológico. **Uningá Review**, v. 29, n. 3, 2017.

SANTOS, L. A. L. *et al.* Inovação na biotecnologia: desenvolvimento de fármacos a partir da biodiversidade brasileira e seus desafios para a bioinovação. **Cuadernos de Educación y Desarrollo**, v. 17, n. 10, p. e9718, 2025.

SILVA, C. A. O papel dos probióticos na inibição de micro-organismos patogênicos em alimentos fermentados: revisão sistemática da literatura. **Aurum Revista Multidisciplinar**, v. 1, n. 8, p. 123-135, 2025.

SILVA, C. J. A.; MALTA, D. J. N. A importância dos fungos na biotecnologia. **Caderno de Graduação-Ciências Biológicas e da Saúde-UNIT-PERNAMBUCO**, v. 2, n. 3, p. 49, 2016.

SOUZA, D. B. *et al.* Estudo de microrganismos presentes em uma área contaminada por gasolina comercial. **Revista de estudos ambientais**, v. 12, n. 2, p. 38-46, 2010.

VILELA, R. C. O.; VIEIRA, V. A. Uso de fungos entomopatogênicos para o controle biológico de carrapatos em bovinos. **Revista Interface Tecnológica**, v. 20, n. 2, p. 726-737, 2023.



CAPÍTULO 11

BIOINFORMÁTICA E GENÔMICA: IDENTIFICAÇÃO DE GENES DE INTERESSE AGRONÔMICO

Michelle dos Santos Oliveira

Jefferson Santos de Amorim

Airton Kleber Gomes Matos

Antônio Veimar da Silva

Carla Michelle da Silva

1. Introdução

A bioinformática e a genômica têm assumido papel central na agricultura contemporânea, especialmente diante da crescente demanda por sistemas produtivos mais eficientes, resilientes e sustentáveis. Essas áreas possibilitam a análise integrada de grandes volumes de dados biológicos, permitindo compreender a base genética de características agronômicas de interesse (Silveira; Futino; Olalde, 2002). O avanço das tecnologias de sequenciamento de nova geração impulsionou significativamente os estudos genômicos aplicados ao agronegócio. A partir dessas ferramentas, tornou-se possível acessar genomas completos, identificar variações genéticas e compreender a regulação gênica associada a características como produtividade, resistência a doenças e tolerância a estresses ambientais (Fagundes; Cagliari, 2019).

A bioinformática surge como elemento fundamental nesse processo, ao oferecer métodos computacionais capazes de organizar, analisar e interpretar dados genômicos complexos. Sem essas ferramentas, a exploração eficiente das informações geradas pelas tecnologias ômicas seria inviável (Souza; Rhoden; Pamphile, 2014; Struckmann *et al.*, 2021). No contexto agrônomo, a identificação de genes de interesse tem contribuído diretamente para o melhoramento genético de plantas. Genes associados à resistência a patógenos, à adaptação climática e ao aumento de rendimento vêm sendo caracterizados com maior precisão, acelerando o desenvolvimento de cultivares superiores (Ferrão *et al.*, 2016).

Estudos baseados em associação genômica ampla têm permitido correlacionar variações genéticas com fenótipos agrônômicos complexos. Essas abordagens ampliam a compreensão da arquitetura genética de características quantitativas e fornecem subsídios robustos para programas de melhoramento vegetal (Huang *et al.*, 2010; Nagel, 2024). A genômica funcional, aliada à transcriptômica e à proteômica, possibilita compreender não apenas a presença dos genes, mas também sua expressão e regulação em diferentes condições ambientais. Essa integração fortalece a identificação de genes-chave envolvidos em respostas adaptativas das plantas (Amaral *et al.*, 2020; Liu *et al.*, 2019). Além das plantas cultivadas, a genômica e a bioinformática também têm sido amplamente aplicadas ao estudo de microrganismos de interesse agrônomo. A análise metagenômica permite caracterizar comunidades microbianas associadas ao solo e às plantas, ampliando o conhecimento sobre suas funções ecológicas e biotecnológicas (Machado *et al.*, 2024; Marchetti).

O uso de marcadores moleculares derivados de sequências genômicas e transcriptômicas tem se mostrado estratégico para a seleção assistida no melhoramento vegetal. Esses marcadores permitem identificar precocemente genótipos superiores, reduzindo tempo e custos nos programas de seleção (Alvarenga *et al.*, 2011; Ferrão *et al.*, 2016). A identificação de genes relacionados à tolerância à seca e ao calor tornou-se especialmente relevante diante das mudanças climáticas globais. A genômica oferece ferramentas essenciais para compreender os mecanismos moleculares envolvidos nessas respostas e apoiar o desenvolvimento de cultivares mais adaptadas a cenários climáticos adversos (Viliquiá *et al.*, 2025; Lo *et al.*, 2020). A edição gênica, associada aos avanços da genômica, amplia ainda mais as possibilidades de inovação no agronegócio. Técnicas baseadas em sistemas como CRISPR-Cas permitem alterações precisas no genoma,

abrindo novas perspectivas para a melhoria genética de organismos agrícolas (Macias *et al.*, 2020).

Apesar dos avanços, a aplicação da bioinformática e da genômica no setor agrícola envolve desafios técnicos, econômicos e regulatórios. A necessidade de infraestrutura computacional, formação especializada e marcos legais adequados ainda limita a adoção ampla dessas tecnologias (Silveira; Futino; Olalde, 2002). Nesse contexto, a bioinformática e a genômica consolidam-se como pilares estratégicos da agricultura moderna, ao integrar ciência, tecnologia e inovação. A identificação de genes de interesse agrônomo fortalece o desenvolvimento de sistemas produtivos mais eficientes, sustentáveis e preparados para os desafios futuros da produção de alimentos (Souza; Rhoden; Pamphile, 2014).

2. Fundamentos da bioinformática e da genômica aplicadas ao agronegócio

A bioinformática e a genômica constituem campos científicos interdependentes que sustentam a análise moderna de sistemas biológicos complexos. No contexto do agronegócio, esses fundamentos permitem compreender a organização, a função e a variação dos genomas de plantas, microrganismos e animais de interesse produtivo (Souza; Rhoden; Pamphile, 2014; Silveira; Futino; Olalde, 2002). A genômica dedica-se ao estudo do conjunto completo de genes de um organismo, incluindo sua estrutura, organização e interação. Com o avanço das tecnologias de sequenciamento, tornou-se possível acessar genomas inteiros e investigar, em escala global, os determinantes genéticos de características agrônomicas relevantes (Wang *et al.*, 2018).

A bioinformática, por sua vez, fornece o suporte computacional necessário para o armazenamento, processamento e interpretação dos grandes volumes de dados gerados pela genômica. Algoritmos, bancos de dados e ferramentas estatísticas são essenciais para transformar dados brutos em informações biologicamente significativas (Struckmann *et al.*, 2021). No agronegócio, a integração entre bioinformática e genômica permite identificar genes associados à produtividade, à resistência a estresses bióticos e abióticos e à qualidade dos produtos agrícolas. Essa abordagem amplia a eficiência dos programas de melhoramento genético e acelera a inovação no setor (Ferrão *et al.*, 2016). Os fundamentos dessas áreas também envolvem a compreensão das diferentes camadas de informação biológica, conhecidas como ciências ômicas. Além da genômica, destacam-se a transcriptômica, a proteômica e a metabolômica, que analisam, respectivamente, a expressão gênica, as proteínas e os metabólitos de um organismo (Amaral *et al.*, 2020).

A transcriptômica, especialmente por meio do sequenciamento de RNA em larga escala, permite identificar genes expressos em condições específicas de desenvolvimento ou estresse. Essa informação é crucial para compreender como as plantas respondem a fatores ambientais adversos e para selecionar genes de interesse agrônomo (Fagundes; Cagliari, 2019; Liu *et al.*, 2019). Outro fundamento importante é o estudo da variabilidade genética, que analisa diferenças entre indivíduos ou populações. A identificação de polimorfismos e variações estruturais no genoma fornece subsídios para associar características genéticas a fenótipos agrônomicos complexos (Wang *et al.*, 2018). Os estudos de associação genômica ampla representam uma aplicação direta desses fundamentos, ao correlacionar marcadores genéticos com características quantitativas. Essas análises ampliam a compreensão da arquitetura genética de traços como rendimento, tolerância à seca e resistência a doenças (Huang *et al.*, 2010; Nagel, 2024).

No âmbito do agronegócio, os fundamentos da genômica também se estendem ao estudo de microrganismos associados às plantas e ao solo. A metagenômica permite caracterizar comunidades microbianas e identificar genes funcionais envolvidos em processos como fixação de nitrogênio e promoção do crescimento vegetal (Machado *et al.*, 2024; Marchetti; Santos; Baratto, 2017). A bioinformática é essencial para a análise desses dados metagenômicos, possibilitando a identificação taxonômica e funcional dos microrganismos. Esse conhecimento amplia as possibilidades de aplicação biotecnológica de comunidades microbianas na agricultura sustentável (Souza; Rhoden; Pamphile, 2014).

Outro aspecto fundamental refere-se à correlação entre genótipo e fenótipo, um dos principais desafios da genômica aplicada. A integração de dados genéticos com informações fenotípicas permite compreender como os genes se manifestam em características observáveis de interesse agrônomo (Nagel, 2024; Ferrão *et al.*, 2016). Os fundamentos da bioinformática e da genômica também sustentam o desenvolvimento de bancos de dados genéticos e plataformas de análise compartilhadas. Esses repositórios facilitam o acesso à informação científica e promovem a colaboração entre pesquisadores e instituições (Jia *et al.*, 2016; Struckmann *et al.*, 2021).

Apesar dos avanços, a aplicação desses fundamentos no agronegócio exige infraestrutura computacional adequada e formação especializada. A complexidade das análises demanda equipes multidisciplinares e investimentos contínuos em capacitação técnica (Silveira *et al.*, 2011). Nesse sentido, os fundamentos da bioinformática e da

genômica aplicadas ao agronegócio evidenciam seu papel estratégico na agricultura moderna. Ao integrar dados biológicos, computação e melhoramento genético, essas áreas fortalecem a identificação de genes de interesse agrônomo e contribuem para sistemas produtivos mais eficientes, inovadores e sustentáveis (Souza; Rhoden; Pamphile, 2014; Wang *et al.*, 2018).

3. Ferramentas ômicas e sequenciamento de nova geração na identificação gênica

As ferramentas ômicas representam um conjunto de abordagens integradas voltadas à análise global dos sistemas biológicos, permitindo compreender a complexidade molecular dos organismos de interesse agrônomo. No contexto da bioinformática e da genômica, essas ferramentas possibilitam identificar genes, vias metabólicas e mecanismos regulatórios associados a características produtivas relevantes (Amaral *et al.*, 2020).

O avanço do sequenciamento de nova geração ampliou significativamente a capacidade de investigação genética em larga escala. Essas tecnologias reduziram custos e tempo de análise, viabilizando o sequenciamento completo de genomas, transcriptomas e metagenomas de plantas e microrganismos agrícolas (Wang *et al.*, 2018). A genômica estrutural, apoiada por plataformas de sequenciamento de alta performance, permite identificar genes, regiões regulatórias e variações genéticas distribuídas ao longo do genoma. Essas informações são essenciais para compreender a base molecular de características agrônomicas complexas (Huang *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2018).

A transcriptômica, especialmente por meio do RNA-Seq, destaca-se como ferramenta central na identificação de genes expressos em diferentes condições ambientais ou estágios de desenvolvimento. Essa abordagem permite analisar padrões de expressão gênica associados à tolerância a estresses, resistência a patógenos e produtividade (Fagundes; Cagliari, 2019; Liu *et al.*, 2019). A análise transcriptômica fornece subsídios importantes para a identificação de genes candidatos em programas de melhoramento vegetal. Ao comparar perfis de expressão entre genótipos contrastantes, é possível selecionar genes relacionados a características agrônomicas específicas (Ferrão *et al.*, 2016; Nagel, 2024). A proteômica complementa a genômica e a transcriptômica ao investigar o conjunto de proteínas expressas por um organismo. Essa abordagem permite compreender como os produtos gênicos atuam efetivamente nos processos fisiológicos das plantas e microrganismos de interesse agrícola (Souza; Rhoden; Pamphile, 2014).

A metabolômica, por sua vez, analisa os metabólitos resultantes da atividade celular, fornecendo uma visão funcional do metabolismo vegetal. A integração de dados metabolômicos com informações genômicas amplia a compreensão das respostas das plantas a fatores ambientais e práticas de manejo (Scheiner; Barfield; Holt, 2021). No âmbito da agricultura, a integração das diferentes abordagens ômicas fortalece a identificação de genes associados a características quantitativas complexas. Essa visão sistêmica permite compreender a interação entre genes, proteínas e metabólitos na determinação do fenótipo (Souza; Rhoden; Pamphile, 2014; Struckmann *et al.*, 2021). A metagenômica destaca-se como ferramenta estratégica para o estudo de comunidades microbianas associadas ao solo e às plantas. Por meio dessa abordagem, é possível identificar genes funcionais de microrganismos envolvidos em processos como fixação de nitrogênio, solubilização de nutrientes e promoção do crescimento vegetal (Machado *et al.*, 2024; Marchetti; Santos; Baratto, 2017).

As análises metagenômicas dependem fortemente de ferramentas bioinformáticas para a montagem, anotação e interpretação dos dados. O uso de bancos de dados especializados permite a identificação taxonômica e funcional dos microrganismos presentes nos agroecossistemas (Jia *et al.*, 2016). Os estudos de associação genômica ampla também se beneficiam das ferramentas ômicas e do sequenciamento de nova geração. A análise simultânea de milhares de marcadores genéticos possibilita associar variações genômicas a características agronômicas de interesse (Huang *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2018). No melhoramento vegetal, essas ferramentas contribuem para acelerar a seleção de genótipos superiores, reduzindo o tempo necessário para o desenvolvimento de novas cultivares. A identificação precoce de genes de interesse aumenta a eficiência dos programas de melhoramento (Ferrão *et al.*, 2016).

Diante disso, o uso das ferramentas ômicas exige infraestrutura tecnológica robusta e equipes multidisciplinares. A análise integrada de dados genômicos, transcriptômicos e proteômicos demanda capacitação técnica e investimentos contínuos em bioinformática (Silveira; Futino; Olalde, 2002). Dessa forma, as ferramentas ômicas e o sequenciamento de nova geração consolidam-se como pilares da identificação gênica no agronegócio. Ao integrar diferentes níveis de informação biológica, essas abordagens fortalecem a inovação biotecnológica e contribuem para o desenvolvimento de sistemas agrícolas mais eficientes, adaptados e sustentáveis (Souza; Rhoden; Pamphile, 2014; Wang *et al.*, 2018).

4. Marcadores moleculares, associação genômica e melhoramento vegetal

Os marcadores moleculares constituem ferramentas centrais no melhoramento vegetal moderno, pois permitem identificar variações genéticas associadas a características agronômicas de interesse. Ao revelar diferenças no DNA entre indivíduos, esses marcadores viabilizam a seleção assistida, reduzindo tempo e custos dos programas de melhoramento (Oliveira *et al.*, 2014). Diferentes tipos de marcadores moleculares têm sido empregados na agricultura, incluindo marcadores derivados de sequências expressas, microssatélites e polimorfismos de nucleotídeo único. A escolha do marcador depende do objetivo do estudo, da cultura agrícola e da disponibilidade de informações genômicas (Alvarenga *et al.*, 2011; Nagel, 2024).

A utilização de marcadores derivados de genes expressos é particularmente relevante para o melhoramento, pois esses marcadores tendem a estar mais diretamente associados a características funcionais. Essa abordagem aumenta a probabilidade de identificar genes envolvidos em resistência a doenças e adaptação a estresses ambientais (Alvarenga *et al.*, 2011). Os estudos de associação genômica ampla representam um avanço significativo na identificação de genes relacionados a características quantitativas complexas. Essas análises avaliam milhares de marcadores distribuídos ao longo do genoma, correlacionando variações genéticas com fenótipos agronômicos (Huang *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2018).

A aplicação de GWAS em culturas agrícolas tem permitido identificar loci associados a rendimento, arquitetura da planta, tolerância à seca e resistência a patógenos. Esses resultados ampliam a compreensão da base genética das culturas e oferecem subsídios robustos para o melhoramento (Viliquiá *et al.*, 2025). A integração entre marcadores moleculares e estudos de associação genômica fortalece a seleção assistida por marcadores. Essa estratégia permite selecionar genótipos superiores em estágios iniciais do desenvolvimento, acelerando o processo de obtenção de novas cultivares (Ferrão *et al.*, 2016). No melhoramento vegetal, a correlação entre características fenotípicas e genotípicas é um desafio constante. A utilização de ferramentas genômicas tem contribuído para reduzir essa lacuna, permitindo análises mais precisas da relação entre genótipo e fenótipo (Nagel, 2024; Scheiner; Barfield; Holt, 2021). Os marcadores moleculares também têm sido amplamente utilizados na avaliação da diversidade genética de populações vegetais. Essa análise é fundamental para a

conservação de recursos genéticos e para a ampliação da base genética utilizada nos programas de melhoramento (Wang *et al.*, 2018; Ferrão *et al.*, 2016).

A aplicação dessas ferramentas no melhoramento de culturas perenes, como café e citros, tem permitido avanços significativos na identificação de genes associados à resistência a doenças e à adaptação climática. Esses estudos contribuem para a sustentabilidade de cadeias produtivas estratégicas (Oliveira *et al.*, 2014). O uso de marcadores moleculares também se estende à caracterização de microrganismos de interesse agrônomo. A identificação genética de bactérias e fungos associados às plantas amplia as possibilidades de aplicação biotecnológica desses organismos (Machado *et al.*, 2024; Marchetti; Santos; Baratto, 2017). Apesar dos avanços, a aplicação ampla de marcadores moleculares e estudos de associação genômica enfrenta desafios relacionados à complexidade dos dados e à necessidade de infraestrutura computacional. A análise e interpretação dos resultados exigem equipes multidisciplinares e ferramentas bioinformáticas robustas (Struckmann *et al.*, 2021).

Outro desafio refere-se à transferência do conhecimento científico para o setor produtivo. A integração entre pesquisa, melhoramento e extensão rural é essencial para que os avanços genômicos se traduzam em ganhos efetivos no campo (Silveira; Futino; Olalde, 2002; Naves *et al.*, 2024). As perspectivas para o uso de marcadores moleculares no melhoramento vegetal são amplamente positivas, especialmente com o avanço das tecnologias de sequenciamento e análise de dados. A tendência é de maior precisão na identificação de genes de interesse e maior eficiência na seleção de cultivares (Wang *et al.*, 2018; Viliquiuá *et al.*, 2025). Assim, os marcadores moleculares e os estudos de associação genômica consolidam-se como pilares do melhoramento vegetal contemporâneo. Ao integrar genômica, bioinformática e seleção assistida, essas ferramentas fortalecem o desenvolvimento de cultivares mais produtivas, resilientes e adaptadas aos desafios atuais da agricultura (Huang *et al.*, 2010).

5. Genes de interesse agrônomo: produtividade, resistência e adaptação climática

A identificação de genes de interesse agrônomo constitui um dos principais objetivos da bioinformática e da genômica aplicadas à agricultura. Esses genes estão diretamente relacionados a características que determinam o desempenho produtivo das culturas, como rendimento, qualidade dos produtos, resistência a patógenos e adaptação a condições ambientais adversas (Ferrão *et al.*, 2016; Wang *et al.*, 2018). Entre os genes

associados à produtividade, destacam-se aqueles envolvidos no controle do crescimento celular, divisão celular e desenvolvimento dos órgãos vegetais. Estudos genômicos têm demonstrado que a modulação da expressão desses genes pode resultar em aumento significativo da produção agrícola (Lo *et al.*, 2020).

A produtividade agrícola também é influenciada por genes relacionados à eficiência no uso de nutrientes e à arquitetura das plantas. A genômica possibilita identificar variantes genéticas que favorecem melhor absorção de água e nutrientes, contribuindo para sistemas produtivos mais eficientes (Nagel, 2024). A resistência a doenças é outro foco central na identificação de genes de interesse agronômico. Genes associados à resposta imune das plantas permitem reconhecer e neutralizar patógenos, reduzindo perdas produtivas e a dependência de defensivos químicos (Oliveira *et al.*, 2014).

No caso de culturas como o café e os citros, estudos genômicos têm permitido identificar genes relacionados à resistência a doenças específicas, como ferrugem e cancro cítrico. Essas descobertas subsidiam programas de melhoramento voltados à sustentabilidade dessas cadeias produtivas (Alvarenga *et al.*, 2011; Amaral *et al.*, 2020). A resistência a pragas também envolve genes associados à produção de compostos defensivos e à modulação de vias metabólicas específicas. A identificação desses genes amplia as possibilidades de desenvolvimento de cultivares mais tolerantes ao ataque de insetos (Huang *et al.*, 2010). A adaptação climática tem se tornado um dos temas mais relevantes na pesquisa agronômica, especialmente diante do aumento da frequência de eventos extremos. Genes relacionados à tolerância à seca, ao calor e a outros estresses abióticos são prioritários nos estudos genômicos atuais (Viliquiá *et al.*, 2025; Ferrão *et al.*, 2016).

A genômica funcional tem contribuído para compreender os mecanismos moleculares envolvidos na resposta das plantas ao estresse hídrico. A identificação de genes reguladores dessas respostas auxilia no desenvolvimento de cultivares mais resilientes em ambientes limitantes (Liu *et al.*, 2019; Viliquiá *et al.*, 2025). Além da seca, a tolerância a altas temperaturas depende de genes envolvidos na manutenção da integridade celular e na regulação do metabolismo. Estudos genômicos permitem identificar variantes genéticas associadas à adaptação térmica em diferentes culturas (Lo *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2018). A integração de dados genômicos com informações fenotípicas e ambientais fortalece a identificação de genes de interesse agronômico. Essa

abordagem sistêmica amplia a precisão das análises e favorece aplicações práticas no melhoramento vegetal (Nagel, 2024; Scheiner).

Os estudos de associação genômica ampla tem desempenhado papel relevante na identificação simultânea de genes relacionados à produtividade, resistência e adaptação climática. Essa abordagem permite analisar a complexidade genética dessas características de forma integrada (Huang *et al.*, 2010). A bioinformática é essencial para a análise desses dados complexos, possibilitando a identificação de padrões genéticos e a priorização de genes candidatos. Sem essas ferramentas, a exploração eficiente do potencial genômico seria limitada (Struckmann *et al.*, 2021; Souza). Apesar dos avanços, a transferência do conhecimento genômico para aplicações práticas ainda representa um desafio. A validação funcional dos genes identificados é etapa crucial para garantir sua efetiva utilização no melhoramento agrícola (Ferrão *et al.*, 2016; Naves *et al.*, 2024).

As perspectivas para a identificação de genes de interesse agronômico são amplamente positivas, especialmente com o avanço das tecnologias de sequenciamento e análise de dados. A tendência é de maior precisão na seleção de características desejáveis e maior eficiência no desenvolvimento de cultivares adaptadas aos desafios atuais da agricultura (Wang *et al.*, 2018; Viliquiuá *et al.*, 2025). Dessa maneira, os genes de interesse agronômico associados à produtividade, resistência e adaptação climática constituem a base genética da inovação agrícola. A integração entre genômica, bioinformática e melhoramento vegetal fortalece a construção de sistemas produtivos mais resilientes, eficientes e sustentáveis (Huang *et al.*, 2010).

6. Inovação, biotecnologia e desafios éticos e tecnológicos

A inovação em bioinformática e genômica tem impulsionado profundas transformações na biotecnologia aplicada ao agronegócio, ampliando a capacidade de identificar, caracterizar e utilizar genes de interesse agronômico. Essas inovações fortalecem o desenvolvimento de soluções voltadas à produtividade, à sustentabilidade e à adaptação das culturas a cenários ambientais cada vez mais complexos (Silveira *et al.*, 2011).

O avanço das tecnologias de sequenciamento, aliado a ferramentas computacionais mais robustas, tem acelerado o ritmo das descobertas genômicas. Esse cenário favorece a inovação ao reduzir o tempo entre a geração do conhecimento científico e sua aplicação prática no melhoramento agrícola (Wang *et al.*, 2018; Struckmann *et al.*, 2021). A

biotecnologia moderna integra diferentes abordagens, como genômica, transcriptômica e edição gênica, ampliando as possibilidades de intervenção direcionada no genoma de organismos agrícolas. Técnicas de edição gênica permitem modificações precisas, potencializando o desenvolvimento de cultivares com características desejáveis (Macias *et al.*, 2020).

Essas inovações biotecnológicas têm impacto direto nos programas de melhoramento genético, ao possibilitar maior controle sobre a introdução de características específicas. A edição gênica, quando integrada ao conhecimento genômico, representa uma ferramenta estratégica para responder rapidamente a desafios como mudanças climáticas e novas pressões bióticas (Viliquiúá *et al.*, 2025; Ferrão *et al.*, 2016). No entanto, o avanço acelerado dessas tecnologias também traz desafios éticos relevantes. Questões relacionadas à manipulação genética, à biossegurança e aos possíveis impactos ambientais exigem reflexões cuidadosas e abordagens responsáveis (Silveira; Futino; Olalde, 2002; Scheiner; Barfield; Holt, 2021).

Outro desafio ético refere-se ao acesso às tecnologias genômicas. A concentração de conhecimento e infraestrutura em grandes corporações pode ampliar desigualdades entre países, regiões e produtores, limitando o uso dessas inovações por pequenos agricultores (Silveira *et al.*, 2011). Os aspectos regulatórios também representam um desafio significativo para a inovação biotecnológica. A ausência ou a rigidez excessiva de marcos legais pode dificultar a pesquisa, o desenvolvimento e a adoção de tecnologias baseadas em genômica e bioinformática (Naves *et al.*, 2024). Do ponto de vista tecnológico, a complexidade dos dados genômicos exige infraestrutura computacional avançada e equipes multidisciplinares. A análise integrada de grandes volumes de dados demanda investimentos contínuos em tecnologia da informação e capacitação profissional (Struckmann *et al.*, 2021; Souza; Rhoden; Pamphile, 2014).

A segurança e a gestão dos dados genéticos também se configuram como desafios relevantes. A proteção das informações, a integridade dos bancos de dados e o uso ético dos dados genômicos são aspectos fundamentais para a credibilidade das pesquisas (Jia *et al.*, 2016). Apesar dos desafios, a inovação em bioinformática e genômica oferece perspectivas promissoras para a agricultura sustentável. A integração dessas tecnologias com práticas de manejo sustentável fortalece sistemas produtivos mais resilientes e eficientes (Viliquiúá *et al.*, 2025). As parcerias entre universidades, centros de pesquisa, setor produtivo e startups de base biotecnológica têm sido essenciais para impulsionar a

inovação. Esse modelo colaborativo favorece a transferência de tecnologia e a aplicação prática do conhecimento científico (Santos *et al.*, 2025).

A formação de recursos humanos qualificados constitui outro elemento-chave para o avanço da biotecnologia agronômica. A capacitação em bioinformática, genômica e ética científica é fundamental para lidar com os desafios técnicos e sociais associados a essas tecnologias (Souza; Rhoden; Pamphile, 2014). No contexto das mudanças climáticas, a inovação genômica assume papel estratégico ao permitir o desenvolvimento de cultivares mais adaptadas a condições extremas. Essa aplicação reforça a relevância social e ambiental da biotecnologia no agronegócio (Viliquiúá *et al.*, 2025; Ferrão *et al.*, 2016). Assim, a inovação em bioinformática e genômica, embora acompanhada de desafios éticos e tecnológicos, representa um caminho essencial para o futuro da agricultura. A adoção responsável dessas tecnologias, aliada a marcos regulatórios adequados e à democratização do acesso ao conhecimento, consolida a biotecnologia como pilar estratégico da sustentabilidade e da inovação agrícola (Silveira *et al.*, 2011).

7. Conclusão

A bioinformática e a genômica consolidaram-se como ferramentas estratégicas para a agricultura contemporânea, ao possibilitar a identificação precisa de genes associados a características agronômicas essenciais. Ao longo deste capítulo, evidenciou-se que o avanço dessas áreas tem ampliado significativamente a compreensão da base genética da produtividade, da resistência a estresses bióticos e abióticos e da adaptação das culturas às mudanças ambientais.

Os fundamentos conceituais apresentados demonstram que a integração entre genômica, bioinformática e ciências ômicas permite uma abordagem sistêmica dos organismos agrícolas. Essa integração viabiliza a análise de grandes volumes de dados biológicos e favorece a identificação de genes-chave envolvidos em processos fisiológicos complexos, fortalecendo a inovação no melhoramento vegetal. A discussão sobre ferramentas ômicas e tecnologias de sequenciamento de nova geração destacou o papel central dessas metodologias na identificação gênica em larga escala. O uso de genômica, transcriptômica, proteômica e metagenômica amplia as possibilidades de análise funcional, permitindo compreender não apenas a estrutura dos genes, mas também sua expressão e regulação em diferentes condições ambientais.

Os marcadores moleculares e os estudos de associação genômica ampla foram apresentados como elementos fundamentais para o melhoramento vegetal moderno. Essas abordagens contribuem para a seleção assistida, reduzem o tempo de desenvolvimento de novas cultivares e aumentam a eficiência dos programas de melhoramento, especialmente em culturas de importância econômica e social. A identificação de genes relacionados à produtividade, à resistência a doenças e à adaptação climática reforça o papel da genômica como aliada da sustentabilidade agrícola. A possibilidade de desenvolver cultivares mais resilientes ao estresse hídrico, ao calor e a patógenos responde diretamente aos desafios impostos pelas mudanças climáticas e pela intensificação dos sistemas produtivos.

O capítulo também evidenciou que a inovação biotecnológica, embora promissora, está associada a desafios éticos, tecnológicos e regulatórios. Questões como acesso às tecnologias, segurança dos dados genéticos, biossegurança e capacitação profissional exigem abordagens responsáveis e políticas públicas alinhadas ao avanço científico. Assim, a bioinformática e a genômica assumem papel central na construção de uma agricultura mais eficiente, sustentável e inovadora. A identificação de genes de interesse agrônomo, quando integrada a práticas de manejo responsável e a marcos regulatórios adequados, contribui para sistemas produtivos capazes de atender às demandas alimentares, ambientais e sociais do século XXI.

Referências Bibliográficas

- ALVARENGA, S. M. *et al.* Marcadores moleculares derivados de sequências expressas do genoma café potencialmente envolvidas na resistência à ferrugem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, p. 890-898, 2011.
- AMARAL, A. M. *et al.* Plataformas tecnológicas no estudo da bactéria causadora do cancro cítrico: genômica, transcriptômica e proteômica. **Citrus Research & Technology**, v. 27, n. 2, 2020.
- FAGUNDES, D. G. S.; CAGLIARI, A. Sequenciamento de RNA em larga escala como ferramenta para identificação e caracterização de genes em culturas de importância agronômica. **Revista Teste SPGG**, v. 5, n. 3, p. 271-279, 2019.
- FERRÃO, R. G. *et al.* Genética e melhoramento: desenvolvimento e recomendação de cultivares com tolerância à seca para o Espírito Santo. **Incaper em Revista**, v. 6, n. 4, p. 51-71, 2016.
- HUANG, X. *et al.* Genome-wide association studies of 14 agronomic traits in rice landraces. **Nature genetics**, v. 42, n. 11, p. 961-967, 2010.
- JIA, B. *et al.* CARD 2017: expansion and model-centric curation of the comprehensive antibiotic resistance database. **Nucleic acids research**, p. gkw1004, 2016.
- LIU, G. *et al.* Cystathionine beta-lyase is crucial for embryo patterning and the maintenance of root stem cell niche in Arabidopsis. **The Plant Journal**, v. 99, n. 3, p. 536-555, 2019.
- LO, S. *et al.* Rice Big Grain 1 promotes cell division to enhance organ development, stress tolerance and grain yield. **Plant Biotechnology Journal**, v. 18, n. 9, p. 1969-1983, 2020.
- MACHADO, P. C. *et al.* Caracterização de rizobactérias associadas ao pinhão-mansão (*Jatropha curcas* L.) por análise metagenômica: Characterization of rhizobacteria associated with physic nut (*Jatropha curcas* L.) by metagenomic analysis. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, v. 7, n. 1, p. 173-190, 2024.
- MACIAS, V. M. *et al.* Cas9-mediated gene-editing in the malaria mosquito *Anopheles stephensi* by ReMOT Control. **G3: Genes, Genomes, Genetics**, v. 10, n. 4, p. 1353-1360, 2020.
- MARCHETTI, M. M.; SANTOS, J. C. P.; BARATTO, C. M. Caracterização de bactérias em nódulos de leguminosas arbóreas de fragmentos da floresta ombrófila mista. **Scientia agraria**, v. 18, n. 4, p. 50-62, 2017.
- NAGEL, J. C. Correlação entre características fenotípicas e genotípicas de sementes: avanços e aplicações no melhoramento vegetal. **Revista Contemporânea**, v. 4, n. 12, p. e6924-e6924, 2024.

OLIVEIRA, R. P. *et al.* Melhoramento genético de plantas cítricas. **Informe Agropecuário, Belo Horizonte**, v. 35, n. 281, p. 22-29, 2014.

SCHEINER, S. M.; BARFIELD, M.; HOLT, R. D. The evolution of habitat construction with and without phenotypic plasticity. **Evolution**, v. 75, n. 7, p. 1650-1664, 2021.

SILVEIRA, J. M. F. J. *et al.* Caracterização da trajetória tecnológica da biotecnologia agrícola por meio de redes de patentes. **Revista Gestão & Políticas Públicas**, v. 1, n. 2, p. 163-187, 2011.

SILVEIRA, J. M. F. J.; FUTINO, A. M.; OLALDE, A. R. Biotecnologia: corporações, financiamento da inovação e novas formas organizacionais. **Economia e Sociedade**, v. 11, n. 1, p. 219-164, 2002.

SOUZA, L. L.; RHODEN, S. A.; PAMPHILE, J. A. A Importância das Ômicas como Ferramentas para o Estudo da Prospecção de Microrganismos: Perspectivas e Desafios. **Uningá Review**, v. 18, n. 2, 2014.

STRUCKMANN, S. *et al.* Scoring functions for drug-effect similarity. **Briefings in Bioinformatics**, v. 22, n. 3, p. bbaa072, 2021.

VILQUIUA, J. F. *et al.* Melhoramento genético de plantas" voltado para a tolerância à seca e altas temperaturas no contexto das" mudanças climáticas. **Observatório De La Economía Latinoamericana**, v. 23, n. 10, p. e11807-e11807, 2025.

WANG, W. *et al.* Genomic variation in 3,010 diverse accessions of Asian cultivated rice. **Nature**, v. 557, n. 7703, p. 43-49, 2018.

YUE, X. *et al.* Copy number variations of the extensively amplified Y-linked genes, HSFY and ZNF280BY, in cattle and their association with male reproductive traits in Holstein bulls. **BMC genomics**, v. 15, n. 1, p. 113, 2014.



CAPÍTULO 12

GESTÃO SUSTENTÁVEL DA PROPRIEDADE RURAL NA ERA DIGITAL

Carla Michelle da Silva

Erine Natalie Bortot

Antônio Veimar da Silva

1. Introdução

A gestão sustentável da propriedade rural tem assumido centralidade no debate contemporâneo sobre desenvolvimento rural, especialmente diante das transformações provocadas pela digitalização do campo. A incorporação de tecnologias digitais na gestão produtiva, econômica e ambiental das propriedades rurais redefine práticas tradicionais e amplia as possibilidades de tomada de decisão mais eficiente e responsável (Massruhá *et al.*, 2020; Silva Júnior *et al.*, 2024). Nesse contexto, a sustentabilidade da propriedade rural não se restringe ao uso racional dos recursos naturais, mas envolve também dimensões sociais, econômicas e institucionais. A gestão sustentável passa a considerar fatores como permanência no campo, sucessão rural, inclusão social e viabilidade econômica das atividades produtivas (Deponti, 2014; Santos; Pozzer, 2019).

A transformação digital no meio rural tem sido impulsionada pelo avanço das tecnologias de informação e comunicação, que permitem maior acesso a dados, mercados

e conhecimentos técnicos. Essas tecnologias favorecem o planejamento, o monitoramento e o controle das atividades agrícolas, contribuindo para práticas produtivas mais eficientes e alinhadas aos princípios da sustentabilidade (Bernardes *et al.*, 2015; Lora *et al.*, 2019). Entretanto, a adoção dessas tecnologias ocorre de forma desigual, especialmente na agricultura familiar, onde desafios como conectividade, capacitação técnica e acesso a políticas públicas ainda limitam a plena inserção na economia digital. Essas desigualdades evidenciam a necessidade de estratégias específicas para promover inclusão digital no campo (Silva; Santos, 2024; Favareto; Tolocka; Fonseca, 2024). A agricultura familiar ocupa papel estratégico na gestão sustentável do território rural, tanto pela produção de alimentos quanto pela preservação de saberes locais e práticas agroecológicas. A valorização do conhecimento tradicional, aliada às inovações tecnológicas, fortalece modelos de gestão mais adaptados às realidades locais (Tagliapietra; Carniatto; Bertolini, 2021; Bizawu; Lúcio, 2023).

As políticas públicas de assistência técnica e extensão rural também exercem papel fundamental nesse processo, ao promover a difusão de tecnologias, a capacitação dos produtores e o fortalecimento da gestão das propriedades. Contudo, a efetividade dessas políticas ainda enfrenta desafios para alcançar de forma ampla a agricultura familiar (Faria; Duenhas, 2019; Vieira; Bernardo; Lourenzani, 2015).

Além disso, o uso crescente de tecnologias digitais no campo levanta questões jurídicas e institucionais relacionadas à proteção de dados, ao monitoramento remoto e à governança territorial. Esses aspectos reforçam a necessidade de marcos regulatórios que acompanhem o avanço tecnológico e garantam segurança jurídica aos produtores rurais (Ghirotto; Queiroz, 2023; Stephanes; Silva, 2023). Diante desse cenário, este capítulo tem como objetivo analisar a gestão sustentável da propriedade rural na era digital, discutindo a integração entre tecnologias digitais, políticas públicas, conhecimento local e inovação como caminhos para o fortalecimento da sustentabilidade econômica, social e ambiental no meio rural.

2. Transformação digital e novos paradigmas da gestão rural

A transformação digital no meio rural tem promovido mudanças profundas nos paradigmas tradicionais de gestão da propriedade, redefinindo formas de planejamento, organização e controle das atividades produtivas. O uso de tecnologias digitais amplia a capacidade dos produtores de acessar informações estratégicas e de responder de

maneira mais eficiente às demandas produtivas e ambientais (Massruhá *et al.*, 2020; Silva Júnior *et al.*, 2024). A digitalização da gestão rural está associada à incorporação de ferramentas como aplicativos, sistemas de informação, plataformas digitais e dispositivos conectados, que possibilitam o acompanhamento em tempo real da produção, dos custos e dos impactos ambientais. Esses recursos favorecem uma gestão mais integrada e orientada por dados (Bernardes *et al.*, 2015; Lizzoni; Feiden; Feiden, 2018).

No contexto da agricultura familiar, a transformação digital representa tanto uma oportunidade quanto um desafio. Embora as tecnologias possam fortalecer a sustentabilidade e a competitividade das propriedades, sua adoção ainda enfrenta limitações relacionadas à infraestrutura, conectividade e capacitação técnica (Silva; Santos, 2024; Favareto; Tolocka; Fonseca, 2024). Os novos paradigmas da gestão rural exigem uma mudança na forma como o produtor se relaciona com a informação. A tomada de decisão baseada apenas na experiência empírica passa a ser complementada por dados técnicos, econômicos e ambientais, ampliando a precisão e a previsibilidade das ações no campo (Kolling; Rampim, 2021; Parisoto *et al.*, 2023). A transformação digital também impacta a organização econômica da propriedade rural, especialmente por meio da informatização da contabilidade rural e do controle financeiro. Essas ferramentas contribuem para maior transparência na gestão dos recursos e para o planejamento de investimentos de forma mais sustentável (Campos *et al.*, 2025).

Além do aspecto econômico, a digitalização favorece a gestão ambiental da propriedade rural. Tecnologias digitais auxiliam no monitoramento do uso do solo, da água e dos insumos agrícolas, permitindo práticas mais eficientes e alinhadas à conservação dos recursos naturais (Ribeiro *et al.*, 2024; Sausen *et al.*, 2021). A adoção de tecnologias digitais no campo também fortalece a integração da propriedade rural com mercados e cadeias produtivas. Plataformas digitais ampliam o acesso a informações de preços, comercialização e certificações, contribuindo para a valorização da produção sustentável (Santos *et al.*, 2020; Sausen *et al.*, 2020). Entretanto, a transformação digital não ocorre de forma homogênea entre os produtores rurais. Diferenças regionais, sociais e econômicas influenciam diretamente o ritmo e a intensidade da adoção tecnológica, reforçando desigualdades no acesso aos benefícios da digitalização (Deponti, 2014; Favareto; Tolocka; Fonseca, 2024).

Nesse cenário, a gestão sustentável da propriedade rural passa a depender da articulação entre tecnologia, conhecimento local e políticas públicas. A tecnologia,

isoladamente, não garante sustentabilidade se não estiver integrada às realidades territoriais e às necessidades dos agricultores (Tagliapietra; Carniatto; Bertolini, 2021). A transformação digital também demanda novas competências por parte dos agricultores. O desenvolvimento de habilidades digitais torna-se essencial para que os produtores possam utilizar de forma crítica e eficiente as tecnologias disponíveis (Schneider *et al.*, 2025; Steding; Carniatto, 2017). Outro aspecto relevante diz respeito à governança e à segurança jurídica no uso de tecnologias digitais no campo. O monitoramento remoto e o uso de dados territoriais exigem atenção aos direitos dos produtores e à proteção das informações geradas na propriedade rural (Ghirotto; Queiroz, 2023; Stephanes; Silva, 2023).

Os novos paradigmas da gestão rural também influenciam a permanência das famílias no campo. A modernização da gestão, aliada às tecnologias digitais, pode tornar a atividade agrícola mais atrativa para as novas gerações, contribuindo para a sucessão rural (Santos; Pozzer, 2019). Além disso, a transformação digital favorece o surgimento de práticas inovadoras e empreendedoras no meio rural. Ferramentas digitais estimulam a diversificação das atividades produtivas e a criação de novos modelos de negócio no campo (Santos *et al.*, 2020; Parisoto *et al.*, 2023).

A transformação digital e os novos paradigmas da gestão rural configuram um processo contínuo, que exige adaptação constante dos produtores, das instituições e das políticas públicas. A consolidação de uma gestão rural sustentável depende da capacidade de integrar inovação tecnológica, inclusão social e responsabilidade ambiental (Massruhá *et al.*, 2020; Bizawu; Lúcio, 2023).

3. Tecnologias da informação e comunicação como suporte à sustentabilidade no campo

As tecnologias da informação e comunicação (TIC) têm assumido papel estratégico na promoção da sustentabilidade no campo, ao possibilitar novas formas de organização, gestão e acesso ao conhecimento nas propriedades rurais. Essas tecnologias ampliam a circulação de informações técnicas, econômicas e ambientais, contribuindo para decisões mais conscientes e alinhadas aos princípios do desenvolvimento sustentável (Bernardes *et al.*, 2015; Massruhá *et al.*, 2020). No contexto da agricultura familiar, as TIC favorecem a redução das assimetrias informacionais historicamente presentes no meio rural. O acesso a dispositivos móveis, aplicativos e plataformas digitais permite que agricultores

obtenham informações sobre mercados, políticas públicas e práticas sustentáveis, fortalecendo sua autonomia produtiva (Lizzoni; Feiden; Feiden, 2018; Silva; Santos, 2024).

A sustentabilidade no campo depende, entre outros fatores, da capacidade de planejar e monitorar o uso dos recursos naturais. Nesse sentido, as TIC auxiliam no acompanhamento de atividades produtivas, no controle do uso de insumos e na avaliação de impactos ambientais, promovendo maior eficiência e redução de desperdícios (Sausen *et al.*, 2021). As tecnologias da informação também desempenham papel relevante na difusão de práticas agroecológicas e sustentáveis. Por meio de redes digitais, agricultores compartilham experiências, conhecimentos locais e soluções adaptadas às realidades territoriais, fortalecendo processos coletivos de aprendizagem (Bizawu; Lúcio, 2023; Tagliapietra; Carniatto; Bertolini, 2021). Outro aspecto central refere-se à gestão econômica da propriedade rural. As TIC permitem o registro sistemático de dados produtivos e financeiros, favorecendo o planejamento de investimentos e a avaliação da viabilidade econômica das atividades agrícolas sob uma perspectiva sustentável (Campos *et al.*, 2025).

A incorporação das TIC no campo também contribui para a integração da propriedade rural às cadeias produtivas e aos mercados digitais. Plataformas de comercialização, aplicativos de gestão e sistemas de rastreabilidade ampliam as oportunidades de inserção econômica e valorização da produção sustentável (Santos *et al.*, 2020; Parisoto *et al.*, 2023). Entretanto, o uso das tecnologias da informação no meio rural ainda enfrenta desafios significativos, especialmente relacionados à conectividade. A precariedade da infraestrutura digital limita o acesso contínuo às ferramentas tecnológicas, comprometendo seu potencial como suporte à sustentabilidade no campo (Silva; Santos, 2024). Além da infraestrutura, a capacitação dos agricultores é um fator determinante para o uso efetivo das TIC. A ausência de formação adequada pode restringir o aproveitamento das tecnologias, reforçando a importância de ações educativas e extensionistas voltadas à inclusão digital no meio rural (Steding; Carniatto, 2017).

As políticas públicas de assistência técnica e extensão rural desempenham papel essencial na mediação entre TIC e sustentabilidade. Programas que incentivam o uso das tecnologias digitais fortalecem a gestão sustentável e ampliam o alcance das ações de desenvolvimento rural (Faria; Duenhas, 2019; Vieira; Bernardo; Lourenzani, 2015). Outro ponto relevante é a relação entre TIC e governança ambiental. O uso de sistemas de informação e geotecnologias no campo exige atenção às questões jurídicas, especialmente

no que se refere à proteção de dados e aos direitos dos produtores rurais (Ghirotto; Queiroz, 2023; Ribeiro *et al.*, 2024). As tecnologias da informação também contribuem para a permanência das famílias no campo, ao tornar a atividade agrícola mais atrativa e conectada às dinâmicas contemporâneas. Esse aspecto é fundamental para a sucessão rural e para a continuidade das práticas produtivas sustentáveis (Santos; Pozzer, 2019).

Do ponto de vista social, as TIC favorecem a inclusão e o fortalecimento das redes de cooperação entre agricultores, organizações sociais e instituições públicas. Essa articulação amplia o alcance das iniciativas sustentáveis e fortalece a gestão coletiva dos territórios rurais (Aguiar; Loureiro, 2014). A sustentabilidade no campo, mediada pelas tecnologias da informação, também se relaciona à valorização do conhecimento local. Quando integradas aos saberes tradicionais, as TIC potencializam soluções mais adequadas às condições ambientais e socioculturais das propriedades rurais (Tagliapietra; Carniatto; Bertolini, 2021). Assim, as tecnologias da informação e comunicação configuram-se como importantes aliadas da sustentabilidade no campo, desde que seu uso esteja associado à inclusão digital, à capacitação dos agricultores e a políticas públicas que reconheçam as especificidades do meio rural (Massruhá *et al.*, 2020; Bizawu; Lúcio, 2023).

4. Agricultura familiar, conhecimento local e inclusão na economia digital

A agricultura familiar desempenha papel central no desenvolvimento rural sustentável, sendo responsável não apenas pela produção de alimentos, mas também pela manutenção de práticas culturais, sociais e ambientais nos territórios rurais. Sua inserção na economia digital, contudo, ocorre de maneira desigual e condicionada a fatores estruturais, territoriais e institucionais (Deponti, 2014; Favareto; Tolocka; Fonseca, 2024).

O conhecimento local acumulado pelos agricultores familiares constitui um patrimônio fundamental para a sustentabilidade da produção rural. Esse saber, construído a partir da experiência prática e da relação direta com o ambiente, orienta decisões produtivas adaptadas às condições climáticas, edáficas e socioculturais de cada território (Tagliapietra; Carniatto; Bertolini, 2021). A integração entre conhecimento local e tecnologias digitais pode potencializar modelos de gestão mais eficientes e sustentáveis. Quando as ferramentas digitais dialogam com os saberes tradicionais, ampliam-se as possibilidades de inovação contextualizada, respeitando as especificidades da agricultura familiar (Bizawu; Lúcio, 2023).

Entretanto, a inclusão da agricultura familiar na economia digital enfrenta obstáculos significativos, especialmente relacionados às desigualdades de acesso à infraestrutura tecnológica. A limitação da conectividade no meio rural compromete o uso contínuo de plataformas digitais, aplicativos de gestão e sistemas de informação (Silva; Santos, 2024). As condições territoriais exercem influência direta sobre o grau de inserção digital das propriedades familiares. Regiões com maior isolamento geográfico tendem a apresentar menor acesso a serviços digitais, o que reforça disparidades regionais e limita as oportunidades de inovação no campo (Favareto; Tolocka; Fonseca, 2024).

Outro fator determinante para a inclusão digital da agricultura familiar é a capacitação técnica dos produtores. A ausência de formação adequada dificulta a apropriação das tecnologias disponíveis, tornando necessário o fortalecimento de ações educativas voltadas à alfabetização digital no meio rural (Steding; Carniatto, 2017). A sucessão rural também se relaciona diretamente com a digitalização da agricultura familiar. A incorporação de tecnologias digitais pode tornar a atividade agrícola mais atrativa para as novas gerações, contribuindo para a permanência dos jovens no campo e para a continuidade das unidades produtivas familiares (Santos; Pozzer, 2019). Nesse sentido, a economia digital apresenta potencial para estimular o empreendedorismo rural, ampliando o acesso a mercados, informações e redes de cooperação. Aplicativos e plataformas digitais favorecem novas formas de comercialização e agregação de valor à produção familiar (Santos *et al.*, 2020).

As políticas públicas de assistência técnica e extensão rural assumem papel estratégico na promoção da inclusão digital da agricultura familiar. Programas que articulam tecnologia, capacitação e apoio institucional são fundamentais para reduzir desigualdades e fortalecer a gestão sustentável das propriedades (Faria; Duenhas, 2019; Vieira; Bernardo; Lourenzani, 2015). Além disso, a economia digital pode fortalecer processos coletivos no campo, ao favorecer a organização de cooperativas, associações e redes de produtores. Essas estruturas ampliam a capacidade de negociação e facilitam o compartilhamento de tecnologias e conhecimentos (Aguiar; Loureiro, 2014).

Contudo, a inclusão digital não deve ser compreendida apenas como acesso à tecnologia, mas como um processo social que envolve autonomia, participação e capacidade de uso crítico das ferramentas digitais. Sem esse olhar, a digitalização pode aprofundar desigualdades já existentes no meio rural (Deponti, 2014). A valorização do conhecimento local é essencial para evitar modelos de digitalização excludentes. A

imposição de soluções tecnológicas descontextualizadas pode comprometer a sustentabilidade da agricultura familiar, ao desconsiderar suas práticas e saberes tradicionais (Tagliapietra; Carniatto; Bertolini, 2021).

Nesse contexto, a inclusão da agricultura familiar na economia digital deve ser orientada por princípios de equidade territorial, respeito à diversidade sociocultural e fortalecimento da autonomia dos produtores rurais (Bizawu; Lúcio, 2023). Assim, a articulação entre conhecimento local, sucessão rural e tecnologias digitais configura-se como elemento-chave para a inserção sustentável da agricultura familiar na economia digital, desde que acompanhada de políticas públicas, infraestrutura adequada e processos contínuos de capacitação (Massruhá *et al.*, 2020; Júnior *et al.*, 2024).

5. Políticas públicas, ATER e marcos jurídicos na era digital

As políticas públicas exercem papel central na promoção da gestão sustentável da propriedade rural, especialmente no contexto da transformação digital do campo. A incorporação de tecnologias digitais nas atividades agropecuárias demanda ações estatais que garantam acesso, capacitação e condições institucionais adequadas para sua adoção, sobretudo na agricultura familiar (Massruhá *et al.*, 2020; Silva Júnior *et al.*, 2024). A Assistência Técnica e Extensão Rural (ATER) constitui um dos principais instrumentos de mediação entre inovação tecnológica e realidade produtiva no campo. Historicamente, a ATER tem sido responsável por difundir práticas produtivas, orientar o manejo sustentável e apoiar a gestão das propriedades rurais (Vieira; Bernardo; Lourenzani, 2015).

No entanto, a Política Nacional de Assistência Técnica e Extensão Rural (Pnater) enfrenta desafios para acompanhar o ritmo da digitalização agrícola. Limitações estruturais, escassez de recursos e dificuldades de adaptação às novas tecnologias ainda restringem o alcance das ações extensionistas, especialmente junto à agricultura familiar (Faria; Duenhas, 2019). A digitalização da ATER representa uma oportunidade para ampliar seu impacto, por meio do uso de plataformas digitais, aplicativos e sistemas de informação que possibilitam atendimento remoto, monitoramento produtivo e compartilhamento de conhecimentos em tempo real (Bernardes *et al.*, 2015). Entretanto, a efetividade dessas ferramentas depende da superação de desigualdades territoriais relacionadas à conectividade e à capacitação dos agricultores. Sem políticas públicas

integradas, o uso de tecnologias digitais na ATER pode reforçar assimetrias regionais já existentes (Silva; Santos, 2024).

Além do papel da ATER, o direito agrário assume relevância crescente na era digital, ao regulamentar as relações jurídicas associadas ao uso da terra, à produção agrícola e à incorporação de novas tecnologias. A gestão da propriedade rural passa a envolver questões legais relacionadas à informação, aos dados e ao monitoramento remoto (Stephanes; Silva, 2023). O uso de geotecnologias, como imagens de satélite e sistemas de georreferenciamento, amplia a capacidade de planejamento e controle ambiental, mas também suscita debates jurídicos sobre privacidade, propriedade dos dados e segurança da informação no meio rural (Ghirotto; Queiroz, 2023). Nesse contexto, torna-se fundamental a construção de marcos jurídicos que acompanhem a evolução tecnológica, assegurando direitos aos produtores rurais e estabelecendo limites claros para o uso de dados territoriais e produtivos (Ribeiro *et al.*, 2024).

As políticas públicas de desenvolvimento rural sustentável precisam integrar dimensões tecnológicas, jurídicas e socioambientais. A ausência dessa articulação compromete a adoção segura e equitativa das tecnologias digitais na gestão das propriedades rurais (Xavier, 2017). Outro aspecto relevante refere-se à propriedade intelectual e à governança das inovações tecnológicas no campo. A digitalização da agricultura amplia o debate sobre acesso ao conhecimento, uso de softwares e dependência tecnológica dos produtores rurais (Liang *et al.*, 2025).

A atuação do Estado é essencial para garantir que a inovação digital não se restrinja a grandes produtores, mas alcance também a agricultura familiar, respeitando suas especificidades e promovendo justiça social no meio rural (Favareto; Tolocka; Fonseca, 2024). Nesse sentido, programas públicos voltados à inclusão digital rural devem articular infraestrutura, capacitação técnica, apoio jurídico e extensão rural, fortalecendo a autonomia dos agricultores e a sustentabilidade das propriedades (Sausen *et al.*, 2020).

A integração entre políticas públicas, ATER e marcos jurídicos contribui para a construção de um ambiente institucional mais favorável à inovação sustentável. Essa articulação é fundamental para orientar o uso responsável das tecnologias digitais no campo (Silva Júnior *et al.*, 2024). Assim, as políticas públicas, a assistência técnica e os marcos jurídicos configuram-se como pilares indispensáveis da gestão sustentável da propriedade rural na era digital, ao promoverem inclusão, segurança jurídica e equilíbrio

entre inovação tecnológica e desenvolvimento rural sustentável (Massruhá *et al.*, 2020; Stephanes; Silva, 2023).

6. Inovação, empreendedorismo rural e desafios da gestão sustentável

A inovação tem se consolidado como elemento estruturante da gestão sustentável da propriedade rural, especialmente diante das transformações produtivas e organizacionais impulsionadas pela digitalização do campo. Novas tecnologias, processos e modelos de negócio vêm redefinindo a forma como os produtores planejam, executam e avaliam suas atividades (Massruhá *et al.*, 2020; Silva Júnior *et al.*, 2024). O empreendedorismo rural emerge nesse contexto como uma estratégia para ampliar a autonomia econômica das propriedades, promovendo diversificação produtiva, agregação de valor e inserção em novos mercados. A adoção de soluções digitais fortalece iniciativas empreendedoras voltadas à sustentabilidade e à inovação no meio rural (Santos *et al.*, 2020).

As tecnologias digitais ampliam as possibilidades de inovação ao permitir maior controle sobre processos produtivos, custos e resultados. Ferramentas de gestão, aplicativos e plataformas digitais favorecem decisões mais precisas e reduzem incertezas associadas à atividade agrícola (Parisoto *et al.*, 2023). Nesse cenário, a contabilidade rural assume papel estratégico como instrumento de apoio à gestão sustentável. O registro sistemático de dados financeiros e produtivos contribui para o planejamento econômico da propriedade e para a avaliação da viabilidade das atividades agrícolas ao longo do tempo (Campos *et al.*, 2025). A inovação na gestão rural, entretanto, não se limita à adoção de tecnologias. Envolve também mudanças organizacionais, desenvolvimento de competências gerenciais e capacidade de adaptação às dinâmicas de mercado e às exigências ambientais (Deponti, 2014).

Os desafios econômicos enfrentados pelos produtores rurais permanecem significativos, especialmente em contextos de instabilidade de preços, aumento dos custos de produção e dependência de insumos externos. Esses fatores exigem estratégias inovadoras que conciliem eficiência econômica e sustentabilidade (Bizawu; Lúcio, 2023). Do ponto de vista social, a gestão sustentável da propriedade rural enfrenta desafios relacionados à sucessão rural, à permanência das famílias no campo e à valorização do trabalho agrícola. O empreendedorismo, aliado à inovação, pode contribuir para tornar a atividade rural mais atrativa às novas gerações (Santos; Pozzer, 2019).

A dimensão ambiental também impõe desafios à consolidação de uma gestão sustentável. A pressão sobre os recursos naturais exige práticas produtivas que reduzam impactos ambientais e promovam o uso racional da terra, da água e da biodiversidade (Xavier, 2017). As agrotecnologias disruptivas apresentam potencial para enfrentar esses desafios, ao integrar inovação tecnológica e sustentabilidade. No entanto, sua adoção requer capacitação técnica, acesso a crédito e apoio institucional adequado (Sausen *et al.*, 2020). A agricultura familiar, em particular, enfrenta limitações estruturais que dificultam a incorporação de inovações em larga escala. Desigualdades de acesso à tecnologia e ao financiamento ainda condicionam o alcance do empreendedorismo rural sustentável (Favareto; Tolocka; Fonseca, 2024). Nesse contexto, políticas públicas e programas de apoio ao empreendedorismo rural são fundamentais para estimular a inovação e reduzir riscos associados à adoção de novas tecnologias. A atuação do Estado contribui para criar um ambiente favorável à gestão sustentável (Vieira; Bernardo; Lourenzani, 2015).

A articulação entre inovação, contabilidade rural e empreendedorismo fortalece a capacidade de gestão das propriedades, promovendo maior controle econômico e transparência nas decisões produtivas (Campos *et al.*, 2025). Entretanto, a consolidação de uma gestão sustentável exige a superação de barreiras culturais e institucionais, incluindo resistência à mudança e limitações na formação técnica e gerencial dos produtores (Bernardes *et al.*, 2015). Assim, a inovação e o empreendedorismo rural configuram-se como caminhos estratégicos para a gestão sustentável da propriedade rural, desde que acompanhados por políticas públicas, capacitação contínua e integração entre dimensões econômicas, sociais e ambientais do desenvolvimento rural (Massruhá *et al.*, 2020; Silva Júnior *et al.*, 2024).

7. Conclusão

A gestão sustentável da propriedade rural na era digital revela-se como um processo complexo, que envolve a integração entre tecnologia, conhecimento local, políticas públicas e inovação organizacional. Ao longo do capítulo, evidenciou-se que a digitalização do campo não se limita à adoção de ferramentas tecnológicas, mas exige mudanças estruturais na forma de planejar, produzir e gerir os sistemas produtivos rurais. As tecnologias da informação e comunicação demonstram grande potencial para fortalecer a sustentabilidade no campo, ao ampliar o acesso à informação, melhorar a eficiência produtiva e apoiar a tomada de decisão. No entanto, sua efetividade depende

diretamente das condições de conectividade, da capacitação dos produtores e da adequação das soluções às realidades territoriais.

A agricultura familiar ocupa posição estratégica nesse cenário, especialmente pela valorização do conhecimento local e pela contribuição social e ambiental que exerce nos territórios rurais. A inserção desse segmento na economia digital deve considerar as desigualdades existentes, promovendo inclusão, equidade e respeito às especificidades socioculturais do meio rural. A sucessão rural e a permanência das novas gerações no campo aparecem como desafios centrais para a sustentabilidade da gestão das propriedades. A digitalização, quando bem orientada, pode tornar a atividade agrícola mais atrativa e conectada às dinâmicas contemporâneas, fortalecendo o empreendedorismo rural e a continuidade das unidades produtivas familiares.

As políticas públicas e a Assistência Técnica e Extensão Rural (ATER) mostraram-se fundamentais para viabilizar a adoção segura e equitativa das tecnologias digitais. A ausência de articulação entre políticas, capacitação e infraestrutura limita o potencial transformador da digitalização no campo. Os marcos jurídicos assumem importância crescente na gestão da propriedade rural digitalizada, especialmente diante do uso de geotecnologias, do monitoramento remoto e da circulação de dados. A segurança jurídica é condição essencial para garantir autonomia aos produtores e orientar o uso responsável das tecnologias no meio rural.

A inovação e o empreendedorismo rural emergem como caminhos estratégicos para enfrentar os desafios econômicos, sociais e ambientais da gestão sustentável. A integração entre tecnologias digitais, contabilidade rural e planejamento produtivo fortalece a viabilidade econômica das propriedades e contribui para decisões mais transparentes e eficientes. Conclui-se, portanto, que a gestão sustentável da propriedade rural na era digital requer uma abordagem integrada, que combine tecnologia, políticas públicas, conhecimento local e inovação. Somente a partir dessa articulação será possível promover um desenvolvimento rural verdadeiramente sustentável, inclusivo e socialmente justo, capaz de responder às demandas contemporâneas do campo.

Referências Bibliográficas

- AGUIAR, J. M.; LOUREIRO, C. F. Estratégias de ação política dos movimentos sociais na era digital: o discurso socioambiental do movimento dos trabalhadores rurais sem terra (MST) na luta pela reforma agrária popular. **Revista VITAS**, v. 4, n. 8, p. 1-25.
- BERNARDES, J. C. *et al.* O uso das tecnologias de informação e comunicação na agricultura familiar: um caminho para a sustentabilidade. **Periódico Eletrônico Fórum Ambiental da Alta Paulista**, v. 11, n. 9, p. 113-127, 2015.
- BIZAWU, K.; LÚCIO, A. S. Práticas agroecológicas no brasil: desafios de uma gestão sustentável. **Revista Interdisciplinar de Ensino, Pesquisa e Extensão**, v. 1, n. 2, 2023.
- CAMPOS, A. M. S. *et al.* Contabilidade rural como fator de inovação e sustentabilidade na agricultura: estudo de caso em uma família de agricultura rural. **Caderno Pedagógico**, v. 22, n. 7, p. e16763, 2025.
- DEPONTI, C. M. As agruras da gestão da propriedade rural pela Agricultura Familiar. **Redes. Revista do Desenvolvimento Regional**, v. 19, n. 1, p. 9-24, 2014.
- FARIA, A. A. R.; DUENHAS, R. A. A Política Nacional de Assistência Técnica e Extensão Rural (Pnater): um novo modelo de desenvolvimento rural ainda distante da agricultura familiar. **Revista Eletrônica Competências Digitais para Agricultura Familiar**, v. 5, n. 1, p. 137-167, 2019.
- FAVARETO, A. S.; TOLOCKA, J. V.; FONSECA, A. S. A. As condições territoriais de participação da agricultura familiar na economia digital. **Redes**, n. 29, 2024.
- GHIROTTTO, A. S. W.; QUEIROZ, R. C. Z. Reflexos jurídicos do uso de tecnologias de monitoramento remoto em propriedades rurais. **Revista do Instituto de Direito Constitucional e Cidadania**, v. 8, n. 1, p. e082, 2023.
- SILVA JÚNIOR, A. H. S. *et al.* Agricultura digital e a sustentabilidade no campo: status atual e tendências. **International Journal of Agrarian Sciences-PDVAGRO**, v. 4, n. 1, p. 1-17, 2024.
- KOLLING, C. E.; RAMPIM, L. Agricultura de precisão e digital: Perspectivas e desafios dos produtores rurais do estado do paraná. **Uningá Review**, v. 36, p. eURJ3981, 2021.
- LIANG, X. *et al.* Desenvolvimento sustentável de setores emergentes quanto a propriedade intelectual diante da globalização econômica e da Internet das Coisas. **Revista de Administração de Empresas**, v. 65, p. e2024-0250, 2025.
- LIZZONI, L.; FEIDEN, A.; FEIDEN, A. Sistemas de Informação como ferramenta de apoio à diversificação rural. **Revista Eletrônica Competências Digitais para Agricultura Familiar**, v. 4, n. 1, p. 51-70, 2018.

LORA, M. I. *et al.* Tecnologias de Informação e Comunicação, o outro viés da sustentabilidade: um olhar para o rural do município de Saudade do Iguaçu (PR). **Estudos Sociedade e Agricultura**, v. 27, n. 1, p. 185-206, 2019.

MASSRUHÁ, S. M. F. S. *et al.* 1A transformação digital no campo rumo à agricultura sustentável e inteligente. **Agricultura Digital**, p. 20, 2020.

PARISOTO, G. J. *et al.* Adoção de inovações tecnológicas no meio rural brasileiro e principais fatores influenciadores dessa transformação. **International Journal of Scientific Management and Tourism**, v. 9, n. 3, p. 1727-1747, 2023.

RIBEIRO, A. P. *et al.* O Direito Agrário e o uso das geotecnologias: análise dos impactos ambientais sob as relações do Desenvolvimento Rural Sustentável (DRS) e a sadia qualidade de vida. **REVISTA DELOS**, v. 17, n. 54, 2024.

SANTOS, J. Q.; POZZER, R. Permanência no campo: as motivações do agricultor para investir na propriedade rural e as expectativas de sucessão. **Observatorio de la Economía Latinoamericana**, n. 11, p. 13, 2019.

SANTOS, L. D. V. *et al.* Aplicativo Empreenda Agro Sustentável: ferramenta condutora para o comportamento empreendedor. **Revista Eletrônica Competências Digitais para Agricultura Familiar**, v. 6, n. 2, p. 120-148, 2020.

SAUSEN, D. *et al.* Agrotecnologias disruptivas. **Revista Eletrônica Competências Digitais para Agricultura Familiar**, v. 6, n. 2, p. 41-68, 2020.

SAUSEN, D. *et al.* Tecnologias que auxiliam a produção sustentável de alimentos. **Revista Eletrônica Competências Digitais para Agricultura Familiar**, v. 7, n. 1, p. 16-42, 2021.

SCHNEIDER, I. *et al.* Adoção de tecnologias digitais para a apropriação de conhecimento, tecnologia e fonte de vantagem competitiva em propriedades rurais de gestão familiar. **Revista on line de Política e Gestão Educacional**, p. e025007, 2025.

SILVA, B. H. O.; SANTOS, B. S. Agricultura digital: desafio da conectividade no campo para o desenvolvimento da agricultura familiar. **Revista Mirante**, v. 17, n. 2, p. 140-163, 2024.

STEDING, A.; CARNIATTO, I. A Educação Ambiental aliada à tecnologia da informação na agricultura familiar. **REMEA-Revista Eletrônica do Mestrado em Educação Ambiental**, v. 34, n. 2, p. 76-96, 2017.

STEPHANES, G. V.; SILVA, D. M. O Direito Agrário brasileiro no contexto do desenvolvimento sustentável na era digital. **Revista Direito & Paz**, v. 1, n. 48, p. 60-81, 2023.

TAGLIAPIETRA, O. M.; CARNIATTO, I.; BERTOLINI, G. A importância do conhecimento local dos agricultores familiares e demais populações rurais para o desenvolvimento rural sustentável. **Revista Gestão e Desenvolvimento**, v. 18, n. 2, p. 178-199, 2021.

VIEIRA, S. C.; BERNARDO, C. H. C.; LOURENZANI, A. E. B. S. Política Pública de ATER para o desenvolvimento rural sustentável na Agricultura Familiar. **Revista Eletrônica Competências Digitais para Agricultura Familiar**, v. 1, n. 1, p. 1-22, 2015.

XAVIER, L. N. Reinterpretação conceitual do desenvolvimento sustentável em face do planejamento urbano e da economia circular. **Revista de Direito Econômico e Socioambiental**, v. 8, n. 1, p. 233-266, 2017.



CAPÍTULO 13

POLÍTICAS PÚBLICAS E INOVAÇÃO TECNOLÓGICA PARA SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL

Antônio Veimar da Silva

Thiago José Trindade Ferreira

Vinicius Braga Soares

Alexandre Moura Lima Neto

Fabíola de Pádua Melo Padilha

Carla Michelle da Silva

1. Introdução

A sustentabilidade ambiental consolidou-se como um dos principais desafios contemporâneos, exigindo respostas articuladas entre Estado, sociedade e setor produtivo. Nesse cenário, as políticas públicas assumem papel estratégico na mediação entre crescimento econômico, proteção ambiental e justiça social, buscando equilibrar interesses e promover práticas sustentáveis de longo prazo (Almeida; Scatena; Luz, 2017; Hayashi; Silva, 2015).

A construção de uma cultura de sustentabilidade depende não apenas de normas e diretrizes institucionais, mas também da percepção ambiental da sociedade e da capacidade dos governos de traduzirem demandas socioambientais em políticas efetivas.

A distância entre formulação e implementação das políticas públicas ainda representa um obstáculo significativo à consolidação de modelos sustentáveis de desenvolvimento (Almeida; Scatena; Luz, 2017; Nascimento; Nascimento; Van Bellen, 2013). Nesse contexto, a inovação tecnológica emerge como um vetor fundamental para enfrentar os limites ambientais do modelo produtivo tradicional. Tecnologias voltadas à eficiência energética, ao uso racional de recursos naturais e à redução de impactos ambientais ampliam as possibilidades de conciliar desenvolvimento econômico e sustentabilidade (Andrade, 2004; Casagrande, 2004).

A relação entre inovação tecnológica e sustentabilidade ambiental tem sido progressivamente incorporada às agendas públicas, especialmente por meio de políticas indutoras, incentivos econômicos e programas de fomento à pesquisa e ao desenvolvimento tecnológico. Essas iniciativas reconhecem a inovação como instrumento estratégico para a transição a modelos produtivos mais sustentáveis (Mazin; Ribeiro, 2019; Freitas *et al.*, 2012). Nos últimos anos, observa-se também a emergência do conceito de sustentabilidade digital, que associa o uso de tecnologias digitais ao fortalecimento das práticas sustentáveis. Sistemas de monitoramento ambiental, plataformas digitais e tecnologias emergentes ampliam a capacidade de gestão, fiscalização e avaliação das políticas ambientais (Caldeira *et al.*, 2024; Fernandes *et al.*, 2024).

O arcabouço jurídico-institucional desempenha papel central nesse processo, ao estabelecer marcos normativos que orientam o uso responsável das tecnologias e garantem segurança jurídica às iniciativas de inovação sustentável. A integração entre direito, tecnologia e sustentabilidade torna-se essencial para o monitoramento ambiental e a efetividade das políticas públicas (Engelmann; Nascimento; Sousa, 2020; Filho; Zaire; Costa, 2025). Além disso, políticas públicas voltadas à inovação sustentável têm se expandido para diferentes setores estratégicos, como energia, saneamento, resíduos sólidos, saúde e educação. Essas experiências demonstram que a sustentabilidade ambiental depende de abordagens integradas, capazes de articular tecnologia, governança e participação social (Duarte; Malheiros, 2015; Gomes; Zambam, 2018).

Diante desse panorama, este capítulo tem como objetivo analisar o papel das políticas públicas e da inovação tecnológica na promoção da sustentabilidade ambiental, discutindo seus fundamentos conceituais, instrumentos normativos, tecnologias emergentes e experiências setoriais, de modo a compreender como a articulação entre

Estado, inovação e sociedade pode contribuir para a construção de modelos sustentáveis de desenvolvimento.

2. Sustentabilidade ambiental e políticas públicas: fundamentos e desafios contemporâneos

A sustentabilidade ambiental constitui um conceito estruturante das políticas públicas contemporâneas, articulando a necessidade de proteção dos ecossistemas com as demandas sociais e econômicas do desenvolvimento. Sua incorporação às agendas governamentais reflete o reconhecimento de que os recursos naturais são finitos e que seu uso inadequado compromete o bem-estar das gerações presentes e futuras (Almeida; Scatena; Luz, 2017). Do ponto de vista conceitual, a sustentabilidade ambiental envolve a manutenção dos sistemas ecológicos, a preservação da biodiversidade e a gestão responsável dos recursos naturais. As políticas públicas desempenham papel central nesse processo, ao estabelecer diretrizes, normas e instrumentos capazes de orientar práticas sustentáveis em diferentes setores da sociedade (Nascimento; Nascimento; Van Bellen, 2013).

Entretanto, a efetividade dessas políticas está diretamente relacionada à forma como a sustentabilidade é compreendida e operacionalizada no âmbito institucional. Em muitos casos, observa-se uma dissociação entre o discurso normativo e a implementação prática das ações ambientais, o que fragiliza os resultados das políticas públicas (Almeida; Scatena; Luz, 2017). Historicamente, as políticas ambientais foram formuladas sob uma lógica corretiva, focada na mitigação de danos após sua ocorrência. Esse modelo mostrou-se insuficiente frente à complexidade dos problemas ambientais contemporâneos, que exigem abordagens preventivas e integradas (Hayashi; Silva, 2015).

A transição para políticas públicas orientadas pela sustentabilidade implica repensar os modelos de desenvolvimento adotados. Essa mudança demanda a incorporação de critérios ambientais nos processos de planejamento econômico e social, superando a visão fragmentada da gestão pública (Andrade, 2004). Nesse sentido, os instrumentos de políticas públicas assumem relevância estratégica. Mecanismos regulatórios, econômicos e institucionais podem induzir comportamentos sustentáveis, desde que sejam articulados de forma coerente e adaptados às realidades territoriais (Nascimento; Nascimento; Van Bellen, 2013). A governança ambiental surge como um dos pilares para o fortalecimento das políticas públicas de sustentabilidade. A participação

social, a transparência e a articulação entre diferentes níveis de governo contribuem para decisões mais democráticas e eficazes no enfrentamento dos desafios ambientais (Hayashi; Silva, 2015).

Apesar dos avanços normativos observados nas últimas décadas, o Brasil ainda enfrenta desafios estruturais na implementação de políticas ambientais. A fragilidade institucional, a descontinuidade administrativa e os conflitos de interesses econômicos limitam a consolidação de uma agenda ambiental robusta (Bezerra *et al.*, 2025). Outro desafio relevante refere-se à integração das políticas ambientais com outras políticas setoriais, como energia, transporte, indústria e agricultura. A ausência de articulação entre essas áreas compromete a efetividade das ações e pode gerar contradições nos objetivos governamentais (Duarte; Malheiros, 2015).

A dimensão econômica da sustentabilidade ambiental também impõe desafios às políticas públicas. A internalização dos custos ambientais nos processos produtivos ainda enfrenta resistência, exigindo instrumentos capazes de conciliar competitividade econômica e proteção ambiental (Mazin; Ribeiro, 2019). Além disso, a inovação tecnológica passa a ser reconhecida como aliada estratégica das políticas públicas ambientais. Tecnologias voltadas à eficiência, ao monitoramento e à redução de impactos ampliam as possibilidades de ação do Estado na gestão ambiental (Casagrande, 2004). No entanto, a incorporação da inovação às políticas públicas deve ser acompanhada de critérios éticos e sociais, evitando soluções tecnológicas excludentes ou descontextualizadas. A sustentabilidade ambiental pressupõe justiça social e equidade no acesso aos benefícios das políticas públicas (Engelmann; Nascimento; Sousa, 2020).

A construção de uma cultura de sustentabilidade depende, ainda, de processos educativos e formativos que promovam consciência ambiental e participação cidadã. As políticas públicas precisam incorporar estratégias de educação ambiental como componente transversal de suas ações (Vianna *et al.*, 2024). Nesse contexto, os desafios contemporâneos das políticas públicas ambientais exigem abordagens sistêmicas, capazes de integrar fundamentos conceituais, instrumentos institucionais e inovação tecnológica. A sustentabilidade ambiental deixa de ser um objetivo setorial e passa a configurar um princípio orientador da ação pública (Almeida; Scatena; Luz, 2017; Oliveira; Silva, 2023).

3. Inovação tecnológica como instrumento de promoção da sustentabilidade

A inovação tecnológica tem sido reconhecida como um dos principais instrumentos para a promoção da sustentabilidade ambiental, ao possibilitar a reconfiguração de processos produtivos, modelos de gestão e padrões de consumo. Sua incorporação às políticas públicas amplia a capacidade de resposta aos desafios ambientais contemporâneos (Andrade, 2004). Do ponto de vista conceitual, a inovação orientada à sustentabilidade busca não apenas ganhos de eficiência econômica, mas também a redução de impactos ambientais e a geração de benefícios sociais. Esse enfoque rompe com a lógica tradicional de crescimento baseada no uso intensivo de recursos naturais (Casagrande, 2004).

A ecoinovação surge nesse contexto como uma abordagem estratégica, integrando inovação tecnológica e sustentabilidade ambiental. Ela envolve o desenvolvimento de produtos, processos e serviços que contribuam para a diminuição da poluição, do consumo de energia e da degradação ambiental (Silva, 2023). As políticas públicas desempenham papel decisivo na indução da inovação sustentável, ao criar ambientes favoráveis por meio de incentivos econômicos, marcos regulatórios e apoio à pesquisa e ao desenvolvimento tecnológico. Esses mecanismos são essenciais para reduzir riscos e estimular investimentos em tecnologias ambientalmente responsáveis (Mazin; Ribeiro, 2019). A transferência tecnológica constitui outro elemento central da inovação para a sustentabilidade. A difusão de conhecimentos e tecnologias entre universidades, centros de pesquisa, empresas e governos favorece a ampliação do impacto das inovações sustentáveis (Freitas *et al.*, 2012).

No Brasil, políticas públicas voltadas à inovação tecnológica têm buscado integrar sustentabilidade como critério estratégico, especialmente em setores como energia, saneamento e indústria. Essas iniciativas refletem o reconhecimento da inovação como aliada do desenvolvimento sustentável (Bezerra *et al.*, 2025). As tecnologias emergentes ampliam significativamente o potencial da inovação sustentável. Soluções baseadas em dados, automação e sistemas inteligentes permitem maior controle dos processos produtivos e ambientais, contribuindo para a prevenção de danos e a eficiência no uso de recursos naturais (Fernandes *et al.*, 2024).

A inovação tecnológica também fortalece os sistemas de monitoramento ambiental, permitindo o acompanhamento contínuo de indicadores ambientais e a avaliação da efetividade das políticas públicas. Esse monitoramento contribui para

decisões mais informadas e para a transparência da gestão ambiental (Caldeira *et al.*, 2024). Entretanto, a adoção de inovações sustentáveis enfrenta desafios estruturais, como desigualdades de acesso à tecnologia, limitações de financiamento e resistência à mudança. Esses fatores podem comprometer a disseminação das soluções inovadoras (Nascimento; Nascimento; Van Bellen, 2013). Além disso, a inovação tecnológica deve ser acompanhada de critérios éticos e sociais, evitando soluções que reforcem desigualdades ou gerem novos impactos negativos. A sustentabilidade pressupõe equilíbrio entre eficiência, justiça social e proteção ambiental (Engelmann; Nascimento; Sousa, 2020).

O papel do Estado é fundamental para garantir que a inovação tecnológica esteja alinhada aos objetivos públicos de sustentabilidade. A ausência de coordenação governamental pode resultar em inovações desconectadas das reais necessidades socioambientais (Oliveira; Silva, 2023). A articulação entre inovação tecnológica e políticas públicas contribui para a consolidação de modelos produtivos mais resilientes e adaptáveis às mudanças ambientais. Essa integração fortalece a capacidade de resposta a crises ambientais e climáticas (Andrade, 2004).

A inovação sustentável também se relaciona à construção de novos paradigmas de desenvolvimento, nos quais a tecnologia é compreendida como meio e não como fim. O foco desloca-se para a promoção do bem-estar coletivo e da integridade ambiental (Casagrande, 2004). Assim, a inovação tecnológica configura-se como instrumento essencial para a promoção da sustentabilidade ambiental, desde que orientada por políticas públicas consistentes, marcos regulatórios adequados e compromissos éticos com o desenvolvimento sustentável (Silva, 2023; Bezerra *et al.*, 2025).

4. Instrumentos de políticas públicas e marcos normativos para a inovação sustentável

Os instrumentos de políticas públicas constituem mecanismos centrais para orientar e viabilizar a inovação tecnológica voltada à sustentabilidade ambiental. Por meio de normas, incentivos e programas específicos, o Estado pode induzir comportamentos e investimentos alinhados à proteção ambiental e ao desenvolvimento sustentável (Hayashi; Silva, 2015). Entre os instrumentos mais utilizados destacam-se os regulatórios, que estabelecem padrões, limites e obrigações ambientais. Esses mecanismos são fundamentais para corrigir falhas de mercado e assegurar que a inovação tecnológica

respeite critérios de responsabilidade ambiental (Nascimento; Nascimento; Van Bellen, 2013).

Os instrumentos econômicos também desempenham papel relevante na promoção da inovação sustentável. Incentivos fiscais, subsídios e linhas de financiamento direcionadas estimulam empresas e instituições a investir em tecnologias ambientalmente adequadas, reduzindo riscos e custos iniciais (Mazin; Ribeiro, 2019). A legislação ambiental brasileira apresenta avanços importantes ao incorporar a inovação como elemento estratégico da sustentabilidade. Normas relacionadas à gestão ambiental, ao licenciamento e à responsabilidade socioambiental têm ampliado o espaço para soluções tecnológicas inovadoras (Engelmann; Nascimento; Sousa, 2020). Os marcos normativos voltados à inovação sustentável buscam equilibrar proteção ambiental e desenvolvimento econômico. Essa articulação é essencial para evitar conflitos entre interesses produtivos e objetivos ambientais, promovendo segurança jurídica aos agentes envolvidos (Filho; Zaire; Costa, 2025).

Programas públicos de fomento à inovação têm se consolidado como instrumentos indutores da sustentabilidade. Iniciativas governamentais que direcionam recursos para pesquisa e desenvolvimento sustentável fortalecem a capacidade tecnológica do país (Schneider; Gianezzini; Yamaguchi, 2025). A integração entre políticas ambientais e políticas de ciência, tecnologia e inovação é outro aspecto fundamental. A ausência de articulação entre essas áreas pode comprometer a efetividade dos instrumentos públicos e limitar o alcance das inovações sustentáveis (Freitas *et al.*, 2012).

No campo jurídico, o direito ambiental e o direito econômico assumem papel complementar na regulação da inovação tecnológica. A análise econômica do direito contribui para avaliar os impactos das normas sobre a adoção de tecnologias sustentáveis (Engelmann; Nascimento; Sousa, 2020). Os instrumentos normativos também são essenciais para orientar o monitoramento ambiental digital. A regulamentação do uso de dados, sistemas de informação e tecnologias de controle ambiental fortalece a governança e a transparência das políticas públicas (Filho; Zaire; Costa, 2025). Entretanto, a complexidade normativa pode representar um desafio à inovação, especialmente quando há sobreposição de normas ou insegurança jurídica. A simplificação regulatória, sem prejuízo da proteção ambiental, é um tema recorrente no debate sobre inovação sustentável (Oliveira; Silva, 2023).

A participação social na formulação e no acompanhamento das políticas públicas amplia a legitimidade dos instrumentos normativos. Processos participativos contribuem para normas mais adequadas às realidades locais e aos interesses coletivos (Hayashi; Silva, 2015). Além disso, os instrumentos de políticas públicas precisam considerar as desigualdades regionais e setoriais. A inovação sustentável requer soluções adaptadas a diferentes contextos econômicos, ambientais e sociais (Bezerra *et al.*, 2025).

A avaliação contínua dos instrumentos públicos é fundamental para aprimorar sua efetividade. Indicadores de desempenho e monitoramento sistemático permitem ajustes e correções nas políticas de inovação sustentável (Nascimento; Nascimento; Van Bellen, 2013). Dessa forma, os instrumentos de políticas públicas e os marcos normativos configuram-se como pilares da inovação sustentável, ao estabelecerem condições institucionais, jurídicas e econômicas necessárias para alinhar tecnologia e sustentabilidade ambiental (Mazin; Ribeiro, 2019; Filho; Zaire; Costa, 2025).

5. Sustentabilidade digital, tecnologias emergentes e monitoramento ambiental

A sustentabilidade digital tem ganhado relevância no debate contemporâneo ao associar o uso estratégico das tecnologias digitais à promoção de práticas ambientalmente responsáveis. Esse conceito parte do reconhecimento de que a digitalização pode contribuir para a redução de impactos ambientais, desde que orientada por princípios de sustentabilidade (Caldeira *et al.*, 2024). As tecnologias emergentes ampliam significativamente as possibilidades de monitoramento ambiental, permitindo a coleta, o processamento e a análise de grandes volumes de dados em tempo real. Esses recursos fortalecem a capacidade de diagnóstico e acompanhamento das condições ambientais em diferentes escalas territoriais (Fernandes *et al.*, 2024).

O monitoramento ambiental digital configura-se como instrumento fundamental das políticas públicas, ao apoiar a fiscalização, o controle e a avaliação de impactos ambientais. Sistemas digitais aumentam a precisão das informações e reduzem custos operacionais da gestão ambiental (Hayashi; Silva, 2015). A integração entre tecnologias digitais e políticas públicas favorece maior transparência e eficiência na gestão ambiental. Plataformas digitais permitem o acesso público a dados ambientais, fortalecendo o controle social e a participação cidadã (Almeida; Scatena; Luz, 2017). Entre as tecnologias emergentes, destacam-se sistemas inteligentes aplicados à gestão ambiental, capazes de automatizar processos de monitoramento e apoiar a tomada de decisão. Essas soluções

ampliam a capacidade de resposta a riscos ambientais e eventos críticos (Fernandes et al., 2024).

A sustentabilidade digital também se relaciona à racionalização do uso de recursos naturais. Tecnologias de informação possibilitam o controle mais eficiente do consumo de energia, água e matérias-primas, contribuindo para práticas produtivas mais sustentáveis (Caldeira *et al.*, 2024). No âmbito urbano, o uso de tecnologias digitais tem sido associado ao conceito de cidades inteligentes, que integram inovação tecnológica e sustentabilidade ambiental. Sistemas de monitoramento urbano auxiliam no planejamento ambiental e na gestão de serviços públicos (Gomes; Zambam, 2018; Leal *et al.*, 2025). Entretanto, a adoção de tecnologias digitais para fins ambientais também apresenta desafios. A dependência de infraestrutura tecnológica e a desigualdade de acesso podem limitar os benefícios da sustentabilidade digital, especialmente em regiões menos desenvolvidas (Nascimento; Nascimento; Van Bellen, 2013).

Outro aspecto relevante refere-se à governança dos dados ambientais. O uso intensivo de informações digitais exige marcos normativos que assegurem a confiabilidade, a proteção e o uso ético dos dados coletados (Filho; Zaire; Costa, 2025). A sustentabilidade digital demanda, ainda, capacitação técnica dos agentes públicos e privados envolvidos na gestão ambiental. A ausência de formação adequada pode comprometer a efetividade das tecnologias e limitar seu potencial transformador (Vianna *et al.*, 2024). As tecnologias emergentes também contribuem para a inovação nos instrumentos de avaliação ambiental, permitindo análises mais integradas e dinâmicas dos impactos das políticas públicas. Essa capacidade fortalece a gestão adaptativa e a melhoria contínua das ações ambientais (Freitas *et al.*, 2012).

No setor produtivo, a sustentabilidade digital favorece a adoção de práticas mais responsáveis, ao integrar monitoramento ambiental aos processos de gestão empresarial. Essa integração reforça a conformidade regulatória e a responsabilidade socioambiental (Oliveira; Silva, 2023). Apesar dos avanços, a sustentabilidade digital não deve ser compreendida como solução isolada para os problemas ambientais. Seu êxito depende da articulação com políticas públicas consistentes, marcos normativos adequados e participação social ativa (Engelmann; Nascimento; Sousa, 2020). Assim, a sustentabilidade digital e as tecnologias emergentes configuram-se como ferramentas estratégicas para o monitoramento ambiental e a efetivação das políticas públicas, desde

que integradas a uma governança ambiental orientada pelos princípios do desenvolvimento sustentável (Caldeira *et al.*, 2024; Fernandes *et al.*, 2024).

6. Setores estratégicos, ecoinovação e políticas públicas aplicadas

A aplicação das políticas públicas de sustentabilidade ambiental ganha maior efetividade quando direcionada a setores estratégicos da economia, nos quais os impactos ambientais são mais intensos e as oportunidades de inovação são significativas. Nesses setores, a ecoinovação emerge como abordagem capaz de articular ganhos econômicos, eficiência produtiva e redução de impactos ambientais (Oliveira; Silva, 2023).

O setor energético destaca-se como área prioritária para políticas públicas de inovação sustentável, especialmente no incentivo às energias renováveis. A transição energética requer tecnologias limpas e marcos normativos que promovam a solidariedade intergeracional e a redução das emissões de gases de efeito estufa (Boff; Boff, 2017). No saneamento ambiental, a inovação tecnológica tem sido fundamental para ampliar o acesso a serviços básicos e reduzir a degradação ambiental. Políticas públicas voltadas à modernização do saneamento favorecem soluções eficientes no tratamento de resíduos e no uso racional da água (Vargas; Schiavini; Schreiner, 2012).

A gestão de resíduos sólidos constitui outro setor estratégico para a sustentabilidade ambiental. A incorporação de tecnologias inovadoras e a implementação da logística reversa dependem de políticas públicas consistentes e de incentivos à responsabilidade compartilhada entre poder público e setor privado (Gomes; Carminha; Memória, 2019; Silva; Silva, 2024). No contexto industrial, especialmente no setor sucroenergético, as políticas públicas têm buscado integrar inovação tecnológica e sustentabilidade por meio de instrumentos regulatórios e programas de fomento. Essas iniciativas visam reduzir impactos ambientais e promover eficiência nos processos produtivos (Duarte; Malheiros, 2015; Santos, 2008). As políticas de incentivo à ecoinovação reconhecem que setores produtivos com maior intensidade ambiental demandam soluções tecnológicas específicas. A adaptação dessas políticas às realidades setoriais amplia sua eficácia e contribui para a sustentabilidade de longo prazo (Mazin; Ribeiro, 2019).

O setor urbano também se configura como espaço estratégico para a aplicação de políticas públicas inovadoras. Tecnologias voltadas à mobilidade, à gestão de resíduos e ao uso eficiente de recursos fortalecem a sustentabilidade das cidades contemporâneas

(Gomes; Zambam, 2018). As cidades inteligentes representam uma expressão concreta da articulação entre inovação tecnológica e políticas públicas ambientais. Por meio de sistemas digitais e soluções integradas, essas iniciativas buscam enfrentar os desafios ambientais associados à urbanização (Leal *et al.*, 2025). No campo da saúde coletiva, a inovação tecnológica tem sido aplicada para promover sustentabilidade ambiental e melhoria da qualidade de vida. Políticas públicas que integram tecnologia, saúde e meio ambiente ampliam o alcance das ações sustentáveis (Gomes *et al.*, 2025).

A educação configura-se como setor estratégico para a difusão da cultura da sustentabilidade e da inovação. Políticas públicas que articulam educação, tecnologia e sustentabilidade contribuem para a formação de cidadãos críticos e conscientes (Vianna *et al.*, 2024). A ecoinovação, quando aplicada de forma setorial, exige coordenação entre diferentes níveis de governo e atores institucionais. A ausência dessa articulação pode comprometer a efetividade das políticas públicas e limitar os impactos das inovações sustentáveis (Hayashi; Silva, 2015).

Outro desafio refere-se à avaliação dos resultados das políticas públicas setoriais. Indicadores de sustentabilidade e sistemas de monitoramento são essenciais para mensurar os efeitos das inovações tecnológicas aplicadas (Nascimento; Nascimento; Van Bellen, 2013). A transferência tecnológica entre setores também fortalece a disseminação da ecoinovação. Experiências bem-sucedidas podem ser adaptadas a diferentes contextos produtivos, ampliando o alcance das políticas públicas (Freitas *et al.*, 2012). Assim, a atuação das políticas públicas em setores estratégicos, aliada à promoção da ecoinovação, revela-se fundamental para a consolidação da sustentabilidade ambiental. A integração entre inovação tecnológica, governança pública e especificidades setoriais constitui caminho promissor para modelos de desenvolvimento sustentáveis (Bezerra *et al.*, 2025; Oliveira; Silva, 2023).

7. Conclusão

Ao longo deste capítulo, evidenciou-se que a sustentabilidade ambiental constitui um desafio estrutural das sociedades contemporâneas, demandando respostas articuladas entre políticas públicas, inovação tecnológica e governança institucional. As políticas públicas assumem papel central nesse processo ao orientar ações coletivas voltadas à preservação ambiental e à promoção de modelos de desenvolvimento mais equilibrados. Os fundamentos conceituais da sustentabilidade ambiental demonstram

que sua efetivação depende da superação de abordagens setoriais e reativas, exigindo políticas integradas, preventivas e alinhadas às dimensões econômica, social e ambiental do desenvolvimento. A distância entre discurso e prática ainda representa um dos principais desafios à consolidação de uma cultura de sustentabilidade.

A inovação tecnológica mostrou-se um instrumento estratégico para a promoção da sustentabilidade ambiental, ao possibilitar a reconfiguração de processos produtivos, sistemas de gestão e padrões de consumo. A incorporação da ecoinovação às políticas públicas amplia a capacidade de conciliar eficiência econômica e redução de impactos ambientais. Os instrumentos de políticas públicas e os marcos normativos revelaram-se fundamentais para induzir a inovação sustentável, garantindo segurança jurídica, incentivos adequados e coordenação institucional. A articulação entre direito, tecnologia e sustentabilidade é condição indispensável para orientar o uso responsável das inovações ambientais.

A sustentabilidade digital e as tecnologias emergentes ampliaram significativamente as possibilidades de monitoramento ambiental, transparência e controle social. No entanto, seus benefícios dependem da existência de infraestrutura adequada, capacitação técnica e governança dos dados ambientais. A análise dos setores estratégicos evidenciou que a aplicação das políticas públicas de inovação sustentável precisa considerar as especificidades produtivas, territoriais e institucionais de cada área. Energia, saneamento, resíduos sólidos, educação e saúde destacam-se como campos prioritários para a consolidação da ecoinovação.

Ainda persistem desafios relacionados à desigualdade de acesso às tecnologias, à fragmentação das políticas públicas e à necessidade de maior articulação entre os diferentes níveis de governo. Esses fatores limitam o alcance das inovações e exigem estratégias públicas mais integradas e inclusivas. Conclui-se, portanto, que a sustentabilidade ambiental depende de uma ação pública orientada pela inovação tecnológica, mas sustentada por marcos normativos sólidos, participação social e visão sistêmica do desenvolvimento. A articulação entre políticas públicas, inovação e sustentabilidade configura-se como caminho essencial para enfrentar os desafios ambientais contemporâneos e promover um futuro ambientalmente responsável e socialmente justo.

Referências Bibliográficas

- ALMEIDA, R.; SCATENA, L.; LUZ, M. S. Percepção ambiental e políticas públicas-dicotomia e desafios no desenvolvimento da cultura de sustentabilidade. **Ambiente & sociedade**, v. 20, p. 43-64, 2017.
- ANDRADE, T. Inovação tecnológica e meio ambiente: a construção de novos enfoques. **Ambiente & sociedade**, v. 7, p. 89-105, 2004.
- BEZERRA, F. W. C. B. *et al.* Políticas públicas de sustentabilidade no brasil: uma revisão narrativa. **Revista Políticas Públicas & Cidades**, v. 14, n. 8, p. e2701-e2701, 2025.
- BOFF, S. O.; BOFF, V. A. Inovação tecnológica em energias renováveis no Brasil como imperativo da solidariedade intergeracional. **Revista de Direito Econômico e Socioambiental**, v. 8, n. 2, p. 282-302, 2017.
- CALDEIRA, V. M. M. *et al.* Sustentabilidade digital: como a tecnologia pode impulsionar práticas sustentáveis. **Revista Políticas Públicas & Cidades**, v. 13, n. 1, p. e720-e720, 2024.
- CASAGRANDE, E. F. J. R. Inovação tecnológica e sustentabilidade: possíveis ferramentas para uma necessária interface. **Revista Educação & Tecnologia**, n. 8, 2004.
- DUARTE, C. G.; MALHEIROS, T. F. Sustentabilidade e Políticas Públicas para o setor sucroenergético: uma análise dos temas abordados. **Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade: GeAS**, v. 4, n. 3, p. 122-138, 2015.
- ENGELMANN, W.; NASCIMENTO, H. C. P.; SOUSA, V. A. A inovação tecnológica e suas influências na sustentabilidade ambiental à luz da análise econômica do direito. **Revista Percurso**, v. 5, n. 36, 2020.
- FERNANDES, A. B. *et al.* Tecnologias Emergentes E Sustentabilidade: Tendências E Perspectivas Futuras. **Revista Políticas Públicas & Cidades**, v. 13, n. 1, p. e722-e722, 2024.
- FILHO, A. F. N.; ZAIRE, F. S.; COSTA, H. R. Direito, sustentabilidade e inovação tecnológica: o marco normativo do sustentador como instrumento jurídico para o monitoramento digital ambiental. **Revista DCS**, v. 22, n. 83, p. e3436-e3436, 2025.
- FREITAS, C. C. G. *et al.* Transferência tecnológica e inovação por meio da sustentabilidade. **Revista de Administração Pública**, v. 46, p. 363-384, 2012.
- GOMES, A. B. *et al.* Inovação tecnológica e saúde coletiva a serviço da sustentabilidade: “caminhos para um futuro mais verde”. **Revista Políticas Públicas & Cidades**, v. 14, n. 9, p. e2713-e2713, 2025.
- GOMES, A. V. M.; CARMINHA, U.; MEMÓRIA, C. V. A Destinação dos Resíduos Sólidos das Empresas Inovadoras: a Lei do Bem eo seu papel na sustentabilidade ambiental e social. **Sequência (Florianópolis)**, n. 82, p. 120-145, 2019.

GOMES, D.; ZAMBAM, N. J. Sustentabilidade do espaço urbano: novas tecnologias e políticas públicas urbanístico-ambientais. **Revista de Direito da Cidade**, v. 10, n. 1, p. 310-334, 2018.

HAYASHI, C.; SILVA, L. H. A. Instrumentos de políticas públicas em gestão ambiental e sustentabilidade no Brasil. **Periódico Eletrônico Fórum Ambiental da Alta Paulista**, v. 11, n. 7, p. 52-64, 2015.

LEAL, S. T. *et al.* Cidades Inteligentes: inovação e sustentabilidade como respostas aos desafios da urbanização contemporânea. **Caderno Pedagógico**, v. 22, n. 9, p. e18221-e18221, 2025.

MAZIN, M.; RIBEIRO, M. F. Políticas indutoras e a sustentabilidade promovida pelas inovações tecnológicas. **Revista de Direito Internacional Econômico e Tributário**, v. 14, n. 1, Jan/Jun, p. 179-211, 2019.

NASCIMENTO, V. M.; NASCIMENTO, M.; VAN BELLEN, H. M. Instrumentos de políticas públicas e seus impactos para a sustentabilidade. **Gestão & Regionalidade**, v. 29, n. 86, p. 77-87, 2013.

OLIVEIRA, S. R. S. L.; SILVA, V. S. Sustentabilidade ambiental e inovação tecnológica: caminhos à ecoinovação. **Revista de Direito Econômico e Socioambiental**, v. 14, n. 1, p. 1, 2023.

SANTOS, N. Inovações tecnológicas e políticas públicas: análises sociais e ambientais no contexto das atividades industriais sucroalcooleiras no Brasil. **Revista Internacional Interdisciplinar INTERthesis**, 2008.

SCHNEIDER, M. D.; GIANEZINI, M.; YAMAGUCHI, C. K. Política pública para sustentabilidade e inovação: a destinação dos recursos do programa inovagro. **Revista Políticas Públicas & Cidades**, v. 14, n. 6, p. e2337, 2025.

SILVA, G. S. Ecoinovação: sustentabilidade ambiental, inovação tecnológica e seus desafios. **Revista GeoAmazônia**, v. 13, n. 26, p. 08-37.

SILVA, K. S. *et al.* Tecnologias assistivas e sustentabilidade pedagógica: estratégias inclusivas no ensino de ciências ambientais. **Revista Tópicos**, v. 3, n. 26, p. 1-13, 2025.

SOUZA, H. R.; ANDRIOLA, W. B.; PONTES, H. L. J. Políticas públicas e sustentabilidade ambiental: potencialidades e desafios à gestão de resíduos eletroeletrônicos no Brasil. **Revista Eletrônica Acta Sapientia**, v. 12, n. 1, 2025.

VARGAS, K. S.; SCHIAVINI, J. M.; SCHREINER, J. S. R. Inovação tecnológica como forma de desenvolvimento sustentável no setor de saneamento ambiental. **Revista Espacios**, v. 33, n. 11, 2012.

VIANNA, P. H. F. *et al.* Políticas públicas para a integração da educação, tecnologia e sustentabilidade no ensino básico e superior. **Revista Campo da História**, v. 9, n. 2, p. e317, 2024.



CAPÍTULO 14

FORMAÇÃO DO PROFISSIONAL DAS CIÊNCIAS AGRÁRIAS NA ERA DAS TECNOLOGIAS DIGITAIS

Carla Michelle da Silva

Antônio Veimar da Silva

1. Introdução

A formação do profissional das Ciências Agrárias vem sendo progressivamente impactada pelas transformações tecnológicas que atravessam os processos produtivos, científicos e educacionais no contexto contemporâneo. A digitalização do campo, a ampliação do uso de tecnologias de informação e comunicação e a emergência de novas dinâmicas de produção do conhecimento exigem uma reconfiguração dos modelos tradicionais de formação profissional (Pereira; Alves; Silva, 2022). Nesse cenário, as Ciências Agrárias assumem papel estratégico ao articular dimensões técnicas, econômicas, sociais e ambientais, demandando profissionais capazes de compreender a complexidade dos sistemas produtivos e das relações socioambientais. A formação acadêmica passa a requerer não apenas domínio técnico, mas também competências digitais, pensamento crítico e capacidade de adaptação a contextos em constante transformação (Bambini; Bonacelli, 2024).

As tecnologias digitais têm ampliado as possibilidades pedagógicas no ensino superior, especialmente por meio de ambientes virtuais de aprendizagem, recursos audiovisuais, plataformas colaborativas e metodologias mediadas por tecnologias. Essas ferramentas possibilitam novas formas de ensinar e aprender nas Ciências Agrárias, favorecendo a integração entre teoria e prática (Pinheiro; Guimarães, 2017; Pinto; Prais, 2025). Entretanto, a incorporação dessas tecnologias também evidenciou desafios significativos, como desigualdades de acesso, limitações de infraestrutura e lacunas na formação docente para o uso pedagógico das ferramentas digitais. Tais desafios tornaram-se ainda mais visíveis durante o período pandêmico, quando o ensino remoto emergencial expôs fragilidades estruturais e formativas no ensino agrário (Caldas *et al.*, 2023; Cruz *et al.*, 2024).

A formação do profissional das Ciências Agrárias precisa, portanto, considerar os diferentes contextos educacionais e territoriais, incluindo a Educação do Campo, a agroecologia e os sistemas produtivos locais. Nesses espaços, as tecnologias digitais podem atuar como mediadoras do processo formativo, desde que respeitem os saberes tradicionais e as especificidades socioculturais dos territórios rurais (Silva; Teixeira; Adão, 2023). Além disso, o avanço das tecnologias digitais tem impactado a produção científica, a extensão rural e a inovação no setor agropecuário, exigindo que os futuros profissionais desenvolvam competências relacionadas à pesquisa, ao uso de dados, à comunicação científica e ao empreendedorismo sustentável (Nascimento; Souza; Luna, 2025; Santos *et al.*, 2020).

Nesse contexto, o letramento digital e o desenvolvimento de competências tecnológicas tornam-se elementos centrais da formação profissional, envolvendo não apenas habilidades técnicas, mas também aspectos éticos, sociais e críticos relacionados ao uso das tecnologias na agricultura e na educação (Costa *et al.*, 2022). Diante dessas transformações, o objetivo deste capítulo é analisar a formação do profissional das Ciências Agrárias na era das tecnologias digitais, discutindo os impactos das tecnologias no ensino, na prática docente, no desenvolvimento de competências profissionais e na construção de uma formação crítica, inclusiva e alinhada às demandas contemporâneas do campo e da sustentabilidade.

2. Tecnologias digitais e a formação profissional em Ciências Agrárias

A incorporação das tecnologias digitais na formação profissional em Ciências Agrárias tem provocado mudanças significativas nos modos de ensinar, aprender e produzir conhecimento. Essas tecnologias ampliam as possibilidades pedagógicas ao permitir maior acesso à informação, interação entre sujeitos e integração entre teoria e prática, aspectos essenciais para uma formação alinhada às demandas contemporâneas do setor agropecuário (Silva; Olave, 2020).

No ensino superior, as tecnologias digitais têm se consolidado como mediadoras do processo formativo, especialmente por meio de plataformas virtuais, recursos audiovisuais e ambientes colaborativos. Essas ferramentas favorecem metodologias mais ativas e participativas, contribuindo para o desenvolvimento da autonomia discente e para a construção de aprendizagens mais contextualizadas nas Ciências Agrárias (Pinto; Prais, 2025).

A formação profissional nesse campo exige a compreensão de sistemas produtivos complexos, que envolvem dimensões ambientais, econômicas e sociais. Nesse sentido, o uso de tecnologias digitais possibilita simulações, análises de dados e visualizações de cenários produtivos, ampliando a capacidade analítica dos estudantes e aproximando o ensino da realidade do campo (Pereira; Alves; Silva, 2022). As experiências formativas mediadas por tecnologias também têm demonstrado potencial para fortalecer a articulação entre ensino, pesquisa e extensão. Recursos digitais permitem maior circulação do conhecimento científico, estimulam a produção acadêmica e facilitam o diálogo entre universidades, produtores rurais e comunidades, fortalecendo a função social da formação em Ciências Agrárias (Nascimento; Souza; Luna, 2025).

Entretanto, a inserção das tecnologias digitais no processo formativo não ocorre de maneira homogênea. Estudos apontam que há diferenças significativas quanto ao acesso, à familiaridade e ao uso pedagógico dessas ferramentas entre estudantes e docentes, o que pode gerar desigualdades no processo de aprendizagem (Santos; Resende; Kotsko, 2005; Caldas *et al.*, 2023). A prática docente assume papel central nesse contexto, uma vez que o uso efetivo das tecnologias depende da intencionalidade pedagógica e da formação dos professores. A ausência de preparo específico para integrar tecnologias digitais às práticas educativas pode limitar seu potencial formativo, reduzindo-as a meros instrumentos de transmissão de conteúdo (Carvalho *et al.*, 2025).

Durante o período pandêmico, essas fragilidades tornaram-se ainda mais evidentes, especialmente nos cursos das Ciências Agrárias, tradicionalmente marcados por atividades práticas e presenciais. A necessidade de adaptação ao ensino remoto evidenciou tanto o potencial quanto as limitações das tecnologias digitais na formação profissional (Leitholdt; Rossa; Alberto, 2023; Cruz *et al.*, 2024). Apesar dos desafios, as experiências desenvolvidas nesse período também impulsionaram inovações pedagógicas e estimularam a reflexão sobre novos formatos de formação, mais flexíveis e híbridos. Essas experiências contribuíram para ampliar a compreensão sobre o papel estratégico das tecnologias digitais na educação agrária (Oliveira *et al.*, 2022).

Outro aspecto relevante refere-se à necessidade de desenvolver competências digitais que ultrapassem o domínio técnico das ferramentas. A formação profissional deve contemplar o uso crítico, ético e responsável das tecnologias, considerando seus impactos sociais, ambientais e produtivos no contexto rural (Costa *et al.*, 2022). Além disso, a integração das tecnologias digitais à formação em Ciências Agrárias dialoga diretamente com as transformações do setor produtivo, marcado pela digitalização do campo, pela agricultura de precisão e pela adoção de sistemas inteligentes. Dessa forma, a formação acadêmica precisa preparar profissionais capazes de atuar em ambientes tecnologicamente avançados (Bambini; Bonacelli, 2024).

A formação inicial, portanto, deve ser pensada de modo a articular conteúdos técnicos, competências digitais e compreensão crítica da realidade socioambiental. Essa articulação contribui para a construção de perfis profissionais mais completos, capazes de responder aos desafios da sustentabilidade e da inovação no campo (Silva; Ribeiro; Vasconcelos, 2024). Assim, as tecnologias digitais configuram-se como elementos estruturantes da formação profissional em Ciências Agrárias, desde que integradas de forma planejada, contextualizada e alinhada aos objetivos educacionais. Sua utilização consciente pode fortalecer a qualidade da formação, ampliar oportunidades de aprendizagem e contribuir para o desenvolvimento sustentável do setor agropecuário (Pinheiro; Guimarães, 2017).

3. Tecnologias digitais no ensino superior e na formação docente em Ciências Agrárias

A inserção das tecnologias digitais no ensino superior tem provocado mudanças estruturais nos processos de formação profissional, especialmente nas Ciências Agrárias,

área marcada pela articulação entre teoria, prática e contexto socioprodutivo. Essas tecnologias ampliam as possibilidades pedagógicas ao diversificar linguagens, suportes didáticos e formas de interação no processo ensino-aprendizagem (Pinheiro; Guimarães, 2017). No âmbito dos cursos de Ciências Agrárias, o uso de recursos audiovisuais, plataformas educacionais e ambientes virtuais de aprendizagem tem favorecido a adoção de metodologias mais ativas e participativas. Essas ferramentas possibilitam maior autonomia discente, estímulo à investigação e aproximação entre conteúdos acadêmicos e realidades do campo (Pinto; Prais, 2025).

As tecnologias digitais também contribuem para a reorganização curricular no ensino superior, permitindo a integração de conteúdos interdisciplinares e o desenvolvimento de competências digitais essenciais à atuação profissional contemporânea. Essa reorganização é particularmente relevante em um setor agropecuário cada vez mais marcado pela inovação tecnológica (Silva; Olave, 2020). Entretanto, a efetividade da inserção das tecnologias digitais no ensino superior depende diretamente da formação docente. Não basta a disponibilidade de ferramentas tecnológicas, sendo fundamental que os professores desenvolvam competências pedagógicas para seu uso crítico, reflexivo e intencional (Caldas *et al.*, 2023).

Diversos estudos apontam que muitos docentes das Ciências Agrárias enfrentam dificuldades relacionadas à capacitação para o uso pedagógico das tecnologias digitais. Essas dificuldades incluem lacunas formativas, resistência a mudanças metodológicas e insegurança quanto à mediação didática em ambientes virtuais (Carvalho *et al.*, 2025). Além da formação pedagógica, questões estruturais também impactam o uso das tecnologias digitais no ensino superior. A precariedade de infraestrutura tecnológica, a instabilidade da conectividade e a ausência de suporte institucional adequado são desafios recorrentes, sobretudo em instituições públicas (Caldas *et al.*, 2023).

A pandemia da COVID-19 evidenciou de forma contundente essas fragilidades, ao exigir a rápida transição para o ensino remoto emergencial. Nos cursos de Ciências Agrárias, essa transição revelou tensões entre a necessidade de continuidade formativa e as limitações para o desenvolvimento de atividades práticas mediadas por tecnologias digitais (Leitholdt; Rossa; Alberto, 2023). Ao mesmo tempo, as experiências formativas vivenciadas durante esse período demonstraram o potencial das tecnologias digitais como mediadoras do ensino, desde que associadas a práticas pedagógicas planejadas e contextualizadas. O uso de vídeos de campo, aulas síncronas interativas e materiais

digitais passou a integrar o repertório docente (Cruz *et al.*, 2024). Essas experiências também impulsionaram reflexões sobre o papel do professor no ensino superior em Ciências Agrárias. A mediação docente mostrou-se central para garantir a qualidade do processo formativo, especialmente na contextualização dos conteúdos e na articulação entre teoria e prática (Leitholdt; Rossa; Alberto, 2023).

A formação docente continuada emerge, nesse contexto, como elemento estratégico para a consolidação do uso pedagógico das tecnologias digitais. Programas de capacitação voltados ao ensino superior devem considerar não apenas o domínio técnico das ferramentas, mas também seus fundamentos pedagógicos e epistemológicos (Silva; Ribeiro; Vasconcelos, 2024). Outro aspecto relevante refere-se à necessidade de alinhar o uso das tecnologias digitais aos princípios da educação crítica e emancipatória. No ensino das Ciências Agrárias, isso implica problematizar os modelos produtivos, os impactos socioambientais e as desigualdades presentes no meio rural (Pereira; Alves; Silva, 2022).

As tecnologias digitais, quando utilizadas de forma crítica, podem favorecer a construção de espaços formativos mais democráticos e inclusivos. Elas ampliam o acesso à informação, estimulam a colaboração e fortalecem o diálogo entre saberes científicos e conhecimentos locais (Nascimento; Souza; Luna, 2025). Entretanto, é preciso reconhecer que a incorporação das tecnologias digitais não ocorre de maneira homogênea entre docentes e instituições. Diferenças geracionais, contextuais e institucionais influenciam diretamente a forma como essas tecnologias são apropriadas no ensino superior (Santos; Resende; Kotsko, 2005).

Nesse sentido, a consolidação das tecnologias digitais no ensino superior das Ciências Agrárias requer políticas institucionais consistentes, investimento em infraestrutura e valorização da formação docente. Esses elementos são fundamentais para que as tecnologias contribuam efetivamente para a qualidade da formação profissional (Bambini; Bonacelli, 2024). Assim, as tecnologias digitais no ensino superior e na formação docente em Ciências Agrárias configuram-se como ferramentas estratégicas para a inovação pedagógica, desde que articuladas a práticas reflexivas, formação contínua e compromisso com uma educação crítica, contextualizada e socialmente referenciada (Pinheiro; Guimarães, 2017).

4. Educação do campo, agroecologia e mediações tecnológicas

A Educação do Campo constitui-se como um projeto político-pedagógico comprometido com a valorização dos sujeitos do meio rural, de seus saberes, territórios e modos de vida. Nas Ciências Agrárias, essa perspectiva rompe com modelos formativos homogêneos e tecnicistas, ao reconhecer a centralidade da agricultura familiar, da agroecologia e da sustentabilidade socioambiental (Pereira; Alves; Silva, 2022). A agroecologia, nesse contexto, assume papel estruturante na formação do profissional das Ciências Agrárias, pois articula princípios científicos, práticas produtivas sustentáveis e conhecimentos tradicionais. Sua inserção nos processos formativos fortalece uma visão crítica sobre os sistemas agroalimentares e sobre os impactos sociais e ambientais do modelo agrícola convencional (Pinheiro; Guimarães, 2017).

As mediações tecnológicas passam a integrar esse cenário como instrumentos que podem potencializar a Educação do Campo, desde que utilizadas de forma contextualizada e crítica. Tecnologias digitais, plataformas educacionais e recursos audiovisuais permitem ampliar o acesso à informação e favorecer processos formativos mais dialógicos e participativos (Silva; Teixeira; Adão, 2023). No entanto, a incorporação das tecnologias digitais na Educação do Campo exige atenção às especificidades do território rural. Desigualdades de acesso à conectividade, limitações de infraestrutura e restrições socioeconômicas ainda constituem desafios significativos para a efetiva mediação tecnológica nesses contextos (Silva; Ribeiro; Vasconcelos, 2024).

A formação de professores para atuar na Educação do Campo demanda, portanto, competências pedagógicas que integrem tecnologias digitais e princípios agroecológicos. Essa formação deve considerar o uso das tecnologias como meio de fortalecimento da autonomia dos sujeitos do campo, e não como instrumento de reprodução de modelos urbanos e descontextualizados (Cruz *et al.*, 2024). Experiências desenvolvidas em cursos de Licenciatura em Ciências Agrárias e Ciências Agrícolas demonstram que o uso de tecnologias digitais pode favorecer a articulação entre teoria e prática agroecológica. Recursos como vídeos de experiências produtivas, registros audiovisuais de práticas agrícolas e ambientes virtuais colaborativos ampliam as possibilidades de aprendizagem significativa (Leitholdt; Rossa; Alberto, 2023). Durante o período pandêmico, essas mediações tecnológicas tornaram-se ainda mais evidentes, ao permitir a continuidade das atividades formativas na Educação do Campo. Apesar das limitações, as experiências

revelaram a importância da mediação docente e da adaptação metodológica para garantir a contextualização dos conteúdos (Cruz *et al.*, 2024).

A agroecologia, mediada por tecnologias digitais, também se beneficia do intercâmbio de saberes entre comunidades, instituições de ensino e movimentos sociais do campo. Plataformas digitais podem funcionar como espaços de socialização de experiências agroecológicas, fortalecendo redes de aprendizagem coletiva (Pinheiro; Guimarães, 2017). Nesse sentido, as tecnologias digitais podem contribuir para a valorização dos conhecimentos tradicionais, ao registrar, sistematizar e difundir práticas agroecológicas desenvolvidas localmente. Essa valorização reforça a identidade camponesa e amplia o reconhecimento do protagonismo dos agricultores familiares (Nascimento; Souza; Luna, 2025). Entretanto, é fundamental evitar uma abordagem tecnocêntrica na Educação do Campo. A tecnologia não deve substituir o vínculo com o território, a vivência comunitária e a experimentação prática, elementos centrais da formação agroecológica (Pereira; Alves; Silva, 2022).

A mediação tecnológica eficaz na Educação do Campo pressupõe planejamento pedagógico intencional e alinhamento com os princípios da agroecologia. Isso inclui a problematização dos conteúdos, o estímulo à reflexão crítica e a articulação entre saber científico e saber popular (Silva; Olave, 2020). Além disso, a formação discente em Ciências Agrárias, orientada pela agroecologia, deve promover o desenvolvimento de competências para o uso ético e sustentável das tecnologias digitais no campo. Essas competências são essenciais para enfrentar os desafios contemporâneos da produção agrícola e da gestão ambiental (Bambini; Bonacelli, 2024).

A Educação do Campo mediada por tecnologias também contribui para a democratização do acesso ao ensino superior, ao possibilitar formatos híbridos e estratégias pedagógicas mais flexíveis. Isso favorece a permanência de estudantes do meio rural nos cursos de Ciências Agrárias (Santos; Resende; Kotsko, 2005). A integração entre Educação do Campo, agroecologia e mediações tecnológicas reafirma a necessidade de uma formação profissional comprometida com a justiça social, a sustentabilidade ambiental e o desenvolvimento territorial. Quando utilizadas de forma crítica e contextualizada, as tecnologias digitais fortalecem práticas educativas emancipadoras no campo (Silva; Teixeira; Adão, 2023).

5. Competências digitais, inclusão e letramento tecnológico

O desenvolvimento de competências digitais tornou-se elemento central na formação do profissional das Ciências Agrárias, especialmente em um contexto marcado pela intensificação do uso de tecnologias digitais no ensino, na pesquisa e na extensão. Essas competências envolvem não apenas habilidades técnicas, mas também capacidades cognitivas, críticas e éticas relacionadas ao uso da tecnologia (Costa *et al.*, 2022). No âmbito educacional, o letramento tecnológico refere-se à capacidade de compreender, utilizar e avaliar criticamente as tecnologias digitais nos processos de ensino-aprendizagem. Nas Ciências Agrárias, esse letramento é fundamental para que estudantes e docentes possam integrar ferramentas digitais às práticas formativas e profissionais de maneira significativa (Pinto; Prais, 2025).

A inclusão digital assume papel estratégico nesse processo, pois o acesso desigual às tecnologias ainda constitui um obstáculo à formação equitativa. Estudantes oriundos de contextos rurais e periféricos frequentemente enfrentam limitações relacionadas à conectividade, à disponibilidade de equipamentos e ao domínio de ferramentas digitais (Silva; Ribeiro; Vasconcelos, 2024). Nesse cenário, a promoção de competências digitais no ensino superior deve considerar as desigualdades sociais e territoriais que marcam o acesso às tecnologias. A inclusão digital não se restringe à oferta de infraestrutura, mas envolve políticas institucionais voltadas à formação continuada e ao apoio pedagógico (Caldas *et al.*, 2023).

O letramento tecnológico, quando articulado à formação crítica, permite que futuros profissionais das Ciências Agrárias utilizem as tecnologias digitais como instrumentos de análise, planejamento e tomada de decisão. Isso é particularmente relevante diante da crescente digitalização do setor agropecuário (Silva; Olave, 2020). A formação docente também desempenha papel fundamental na promoção das competências digitais. Professores letrados tecnologicamente são capazes de planejar estratégias pedagógicas que integrem recursos digitais de forma intencional, evitando usos superficiais ou meramente instrumentais da tecnologia (Silva; Ribeiro; Vasconcelos, 2024).

Estudos apontam que muitos docentes ainda apresentam dificuldades no uso pedagógico das tecnologias digitais, o que impacta diretamente o desenvolvimento das competências digitais dos estudantes. Essas dificuldades decorrem, em grande parte, de lacunas na formação inicial e continuada (Caldas *et al.*, 2023). A inclusão digital no ensino

das Ciências Agrárias também está relacionada à ampliação de espaços formativos híbridos e flexíveis. Ambientes virtuais de aprendizagem, plataformas educacionais e recursos audiovisuais contribuem para diversificar as estratégias didáticas e atender a diferentes perfis de estudantes (Pinheiro; Guimarães, 2017). Além disso, o letramento tecnológico favorece a autonomia discente, ao estimular a busca ativa por informações, a análise crítica de dados e o uso responsável das tecnologias. Essas competências são essenciais para a atuação profissional em contextos agroambientais complexos (Pereira; Alves; Silva, 2022).

A inclusão de grupos historicamente marginalizados no acesso às tecnologias digitais também deve ser considerada na formação em Ciências Agrárias. Experiências voltadas à inclusão educacional, digital e social demonstram que o uso planejado das tecnologias pode reduzir desigualdades e ampliar oportunidades formativas (Barbosa; Carvalho; López, 2018). No contexto da Educação do Campo, o letramento tecnológico assume características próprias, pois precisa dialogar com os saberes locais e com as condições reais de uso da tecnologia no meio rural. Isso exige abordagens pedagógicas contextualizadas e sensíveis às especificidades territoriais (Nascimento; Souza, 2024). As competências digitais também se relacionam à capacidade de utilizar tecnologias para fins sustentáveis, como monitoramento ambiental, gestão da produção e comunicação de práticas agroecológicas. Nesse sentido, o letramento tecnológico contribui para a formação de profissionais comprometidos com o desenvolvimento sustentável (Silva; Teixeira; Adão, 2023).

A consolidação dessas competências demanda ações institucionais integradas, incluindo investimentos em infraestrutura, formação docente e políticas de inclusão digital. Tais ações são fundamentais para garantir que a tecnologia atue como aliada da qualidade formativa e não como fator de exclusão (Bambini; Bonacelli, 2024). As competências digitais, a inclusão e o letramento tecnológico configuram-se como pilares da formação do profissional das Ciências Agrárias na era digital. Quando integrados a uma perspectiva crítica e socialmente referenciada, esses elementos fortalecem práticas educativas inclusivas, inovadoras e alinhadas às demandas contemporâneas do campo (Costa et al., 2022).

6. Inovação, empreendedorismo e formação integral nas Ciências Agrárias

A formação do profissional das Ciências Agrárias, na contemporaneidade, demanda uma abordagem que integre inovação, empreendedorismo e desenvolvimento humano. A complexidade dos desafios enfrentados pelo setor agropecuário exige profissionais capazes de articular conhecimentos técnicos, científicos, sociais e ambientais de forma integrada (Pereira; Alves; Silva, 2022). A inovação assume papel central nesse processo formativo, uma vez que o avanço das tecnologias digitais, biotecnológicas e informacionais redefine práticas produtivas, cadeias de valor e modelos de gestão no meio rural. A formação acadêmica precisa, portanto, preparar o estudante para lidar com ambientes inovadores e em constante transformação (Bambini; Bonacelli, 2024).

O empreendedorismo, por sua vez, emerge como competência estratégica para os profissionais das Ciências Agrárias, especialmente diante da necessidade de geração de renda, permanência no campo e diversificação das atividades produtivas. A formação empreendedora contribui para a autonomia profissional e para a sustentabilidade econômica das propriedades rurais (Santos *et al.*, 2020). Nesse contexto, iniciativas educacionais voltadas ao empreendedorismo rural têm buscado estimular atitudes inovadoras, criatividade e capacidade de planejamento. O uso de aplicativos, plataformas digitais e projetos integradores amplia as possibilidades de aprendizagem prática e contextualizada (Oliveira *et al.*, 2022).

A formação integral, entretanto, vai além da aquisição de competências técnicas e empreendedoras. Ela envolve o desenvolvimento de valores éticos, responsabilidade socioambiental e compromisso com o desenvolvimento sustentável. As Ciências Agrárias, por sua natureza interdisciplinar, favorecem essa abordagem formativa ampliada (Silva; Teixeira; Adão, 2023). A integração entre ensino, pesquisa e extensão constitui um dos principais caminhos para a promoção da formação integral. Projetos extensionistas e experiências práticas permitem que os estudantes compreendam as realidades do campo, dialoguem com produtores e apliquem conhecimentos de forma socialmente relevante (Cruz *et al.*, 2024). O uso das tecnologias digitais potencializa essas experiências formativas ao facilitar a comunicação, o acesso à informação e o desenvolvimento de soluções inovadoras para problemas locais. Assim, a inovação tecnológica passa a ser compreendida como meio para o fortalecimento da formação integral e não como um fim em si mesma (Silva; Olave, 2020).

A formação empreendedora também contribui para a valorização da interdisciplinaridade, ao articular conhecimentos das áreas agrárias, econômicas, sociais e ambientais. Essa articulação favorece a construção de soluções mais eficientes e sustentáveis para os desafios do setor agropecuário (Santos; Pedroso; Oliveira, 2021). Estudos indicam que estudantes das Ciências Agrárias percebem positivamente iniciativas formativas que estimulam a inovação e o empreendedorismo, especialmente quando essas ações estão vinculadas a problemas reais do território. Isso reforça a importância de currículos flexíveis e contextualizados (Santos; Resende; Kotsko, 2005). A formação integral também pressupõe o desenvolvimento de competências socioemocionais, como trabalho em equipe, liderança e comunicação. Essas competências são fundamentais para a atuação profissional em contextos colaborativos e interdisciplinares, cada vez mais presentes no agronegócio e na agricultura familiar (Costa *et al.*, 2022).

No âmbito institucional, a promoção da inovação e do empreendedorismo requer políticas acadêmicas que incentivem projetos interdisciplinares, incubadoras, startups acadêmicas e parcerias com o setor produtivo. Tais iniciativas ampliam as oportunidades de aprendizagem e inserção profissional dos estudantes (Nascimento; Souza; Luna, 2025). A formação integral nas Ciências Agrárias também está relacionada à construção de uma identidade profissional comprometida com a sustentabilidade e com a justiça social. A inovação, nesse sentido, deve estar alinhada a princípios éticos e ao respeito às diversidades culturais e territoriais (Pereira; Alves; Silva, 2022).

Ao integrar inovação e empreendedorismo à formação acadêmica, os cursos de Ciências Agrárias contribuem para a formação de profissionais capazes de atuar de forma crítica, criativa e responsável. Essa integração fortalece a capacidade de adaptação às transformações do setor agropecuário (Bambini; Bonacelli, 2024). A articulação entre inovação, empreendedorismo e formação integral configura-se como eixo estruturante da formação do profissional das Ciências Agrárias na era digital. Essa perspectiva amplia horizontes formativos, promove o protagonismo discente e fortalece práticas educativas alinhadas às demandas contemporâneas do campo (Oliveira *et al.*, 2022).

7. Conclusão

A formação do profissional das Ciências Agrárias na era das tecnologias digitais exige uma reconfiguração dos processos educativos, orientada pela integração entre conhecimentos técnicos, científicos, pedagógicos e sociais. Ao longo do capítulo,

evidenciou-se que a incorporação das tecnologias digitais não representa apenas uma mudança instrumental, mas um redirecionamento das práticas formativas frente às transformações do setor agropecuário e das demandas contemporâneas do desenvolvimento sustentável.

Os debates apresentados demonstram que o uso pedagógico das tecnologias digitais no ensino superior amplia possibilidades de ensino-aprendizagem, favorecendo metodologias ativas, ambientes virtuais, recursos audiovisuais e práticas interdisciplinares. No entanto, a efetividade dessas estratégias está diretamente relacionada à formação docente crítica e à superação de desafios estruturais, institucionais e metodológicos que ainda marcam muitos contextos educacionais.

A valorização da Educação do Campo, da agroecologia e das mediações tecnológicas reforça a necessidade de uma formação contextualizada, sensível às realidades territoriais e aos saberes locais. Nesse sentido, as tecnologias digitais, quando articuladas a práticas pedagógicas inclusivas, contribuem para fortalecer processos educativos comprometidos com a justiça social, a sustentabilidade ambiental e a permanência qualificada no campo.

O desenvolvimento de competências digitais, aliado à inclusão e ao letramento tecnológico, mostrou-se fundamental para a formação de profissionais capazes de atuar de forma crítica, ética e autônoma. A redução das desigualdades de acesso, a promoção da inclusão digital e o fortalecimento das capacidades formativas emergem como condições indispensáveis para que a tecnologia se consolide como aliada do processo educativo nas Ciências Agrárias.

Em suma, a articulação entre inovação, empreendedorismo e formação integral evidencia que o profissional das Ciências Agrárias deve ser preparado para enfrentar desafios complexos, atuar em contextos dinâmicos e contribuir para modelos produtivos sustentáveis. A formação integral, orientada pela integração entre ensino, pesquisa, extensão e tecnologia, constitui um caminho estratégico para consolidar práticas educativas alinhadas às transformações digitais e às demandas sociais do campo contemporâneo.

Referências Bibliográficas

- CRUZ, L. P. *et al.* Uma experiência na formação de professores para a Educação do Campo em tempos de Pandemia: o Estágio Supervisionado na Licenciatura em Ciências Agrícolas/Agrárias. **Revista Brasileira de Educação do Campo**, v. 9, p. e16317-e16317, 2024.
- PINHEIRO, R. O.; GUIMARÃES, G. M. Tecnologias educacionais em rede como mediadoras do ensino-aprendizagem da Agroecologia: produção e uso do audiovisual nas ciências agrárias. **Extensão Rural**, v. 24, n. 3, p. 104-121, 2017.
- CALDAS, R. T. *et al.* Desafios dos professores da rede pública de ensino para a implementação das Tecnologias Digitais da Informação e Comunicação. **Revista Triângulo**, v. 16, n. 2, p. 78-94, 2023.
- CARVALHO, L. Q. *et al.* Tecnologias digitais e sua inserção na prática docente em contextos pandêmicos. **Ensino & Pesquisa**, v. 23, n. 3, p. 8-22, 2025.
- SILVA, M. R. S.; OLAVE, M. E. L. Contribuições das tecnologias digitais associadas à indústria 4.0 para a formação profissional. **Revista Gestão e Desenvolvimento**, v. 17, n. 2, p. 82-110, 2020.
- OLIVEIRA, V. C. S. *et al.* Aprimoramento profissional para discentes das ciências agrárias Professional improvement for students of agrarian sciences. **Brazilian Journal of Development**, v. 8, n. 1, p. 2155-2161, 2022.
- PEREIRA, P. G.; ALVES, H. S.; SILVA, A. S. L. As ciências agrárias: entre a educação, economia e meio ambiente. **Revista Inter-Ação**, v. 47, n. 1, p. 155-170, 2022.
- PINTO, D. M.; PRAIS, J. L. S. Tecnologias digitais na Educação Superior: perspectivas para o ensino e aprendizagem de Ciências Biológicas. **Ensino e Tecnologia em Revista**, v. 9, n. 2, p. 1-20, 2025.
- BAMBINI, M. D.; BONACELLI, M. B. M. Revolução digital no setor agropecuário e transformação da dinâmica inovativa: novos atores e relacionamentos. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, p. e27359-e27359, 2024.
- SILVA, V. M.; RIBEIRO, A. P. M.; VASCONCELOS, F. H. L. O uso das tecnologias digitais para a formação de professores de Matemática: Uma revisão sistemática de literatura. **Revista Sociedade Científica**, v. 7, n. 1, p. 1193-1220, 2024.
- LEITHOLDT, L. C.; ROSSA, U. B.; ALBERTO, S. A prática pedagógica dos docentes em formação no ensino agrícola em tempos de pandemia. **Revista Dynamis**, v. 29, n. 1, p. 164-178, 2023.
- NASCIMENTO, D. S. A.; SOUZA, R. F.; LUNA, I. A produção científica em Ciências Agrárias: uma análise a partir da Plataforma Lattes. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 63, p. e287368, 2025.

HASNER, C.; WINTER, E. Indicadores de ciência e tecnologia no setor de ciências agrárias no Brasil: investimento público e produtividade científica e técnica. **Revista GEINTEC, Aracaju**, v. 8, n. 2, p. 4419-4429, 2018.

MARTINS, C. E. N.; JÚNIOR, J. M. O.; RAMOS, L. F. P. Desenvolvimento da cadeia de carne bovina em Sata Catarina. **Extensão Tecnológica: Revista de Extensão do Instituto Federal Catarinense**, v. 11, n. 22, p. 149-160, 2024.

PEDROSA, E. F. *et al.* Análise Estatística Implicativa e o Uso das Tecnologias Digitais na Formação de Professores de Matemática. **Revista Semiárido De Visu**, p. 130-143, 2025.

NASCIMENTO, S. R. R.; SOUZA, J. Tecnologias digitais e o ensino de botânica na Amazônia: análises das práticas docentes. **Caderno Pedagógico**, v. 21, n. 12, p. e10194-e10194, 2024.

SILVA, W. B.; TEIXEIRA, Z. D.; ADÃO, J. M. Educação, tecnologias digitais e transdisciplinaridade moriniana. **Revista Contemporânea**, v. 3, n. 6, p. 6832-6852, 2023.

SAMPAIO, C. L. G. S.; SILVA, C. N. N. A plataforma eduCAPES e sua contribuição para a formação integral: conhecimento e uso das tecnologias digitais por parte dos professores do Ensino Médio Integrado. **Revista Brasileira da Educação Profissional e Tecnológica**, v. 1, n. 20, p. e10314-e10314, 2021.

SANTOS, E. M; RESENDE, J. T. V.; KOTSKO, E. G. S. Perfil dos Acadêmicos do curso de ciências licenciatura plena de acordo com as tecnologias de informação. **AMBIÊNCIA**, v. 1, n. 1, p. 47-57, 2005.

COSTA, M. R. M. *et al.* Tecnologias digitais na educação contemporânea: letramento digital em perspectiva no século XXI. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 15, p. e598111538190-e598111538190, 2022.

SOUZA, D. N. *et al.* Efetividade de um curso online para o desenvolvimento de práticas sustentáveis na aquicultura de Pirarucu. **Cuadernos de Educación y Desarrollo**, v. 16, n. 11, p. e6205-e6205, 2024.

SANTOS, L. D. V. *et al.* Aplicativo Empreenda Agro Sustentável: ferramenta condutora para o comportamento empreendedor. **Revista Eletrônica Competências Digitais para Agricultura Familiar**, v. 6, n. 2, p. 120-148, 2020.

SANTOS, M. M.; PEDROSO, I. G. F.; OLIVEIRA, S. C. Percepção discente sobre cursos de graduação em Ciências Agrárias e Humanidades da UNESP. **Educação e Pesquisa**, v. 47, 2021.

BARBOSA, R. C.; CARVALHO, M. E. P.; LÓPEZ, A. M. Inclusão educacional, digital e social de mulheres no interior da Paraíba: uma experiência na UFPB. **Revista Brasileira de Estudos Pedagógicos**, v. 99, n. 251, p. 148-171, 2018.

CURRÍCULO DOS ORGANIZADORES

Carla Michelle da Silva



Doutora em Fitotecnia (UFV). Mestre em Agronomia/Fitotecnia (UFPI). Especialista em Gestão Ambiental (FINOM), Biologia e Química (URCA), Consultoria e Licenciamento Ambiental (Faculdade Unica de Ipatinga) e Geoprocessamento e Georreferenciamento (Faculdade INESP). Graduada em Ciências Biológicas (Universidade Iguaçu), Engenharia Agrônômica (UESPI) e Pedagogia (Faculdade Unica de Ipatinga). Atualmente é diretora do Instituto Educacional Invictus. E-mail: carlinha.picos@gmail.com. Lattes: <https://lattes.cnpq.br/4723228892619038>

Talys Moratti Lemos de Oliveira



Mestre em Agricultura Tropical (UFES). Especialista em Educação Especial. Graduado em Licenciatura em Ciências Agrícolas (IFES) Atualmente é pesquisador e técnico em agropecuária no Instituto Federal do Espírito Santo. E-mail: talys.lemos@gmail.com. Lattes: <http://lattes.cnpq.br/0975242379824855>

Keithy Juliane de Oliveira



Doutoranda em Desenvolvimento Territorial e Meio Ambiente (UNIARA / Bolsista CAPES-Prosop). Mestre em Desenvolvimento Territorial e Meio Ambiente (UNIARA). Especialista em Teoria da relação com o saber e da teoria da biografização (UFSCar), Educação Especial (FCE), Educação Inclusiva (FCE), Gestão Escolar (FCE) e Geografia (UNIFRAN). Graduada em Geografia (ASSER), Pedagogia (UNINOVE) e História (UNAR). Atua como Professora Efetiva nas Redes Estadual (São Paulo) e Municipal (São Carlos) de Educação. Integrante da Equipe GEO/CEAM - Núcleo de Pesquisa e Documentação Rural (UNIARA) sob o Processo CNPq n 409692/2023-9. Faz parte do grupo de pesquisa e da Coordenação Associada da Rede de Escola-Outra da Universidade Federal de São Carlos/UFSCar. E-mail: keithy.oliveira@uniara.edu.br. Lattes: <http://lattes.cnpq.br/8177935835962612>

Airton Kleber Gomes Matos



Especialista em Fertilidade, Manejo de Solos e Nutrição de Plantas (Faculdade Iguaçu-PR), Docência do Ensino Superior (Faculdade Iguaçu-PR), Segurança do Trabalho e Gestão Ambiental (UCAM-RJ). Graduado em Engenharia Agrônoma (UFPI). Atualmente é Engenheiro Agrônomo da Secretaria da Assistência Técnica e Defesa Agropecuária do Estado do Piauí - SADA. E-mail: airton_agronomo@yahoo.com. Lattes: <http://lattes.cnpq.br/7870635551154461>

Antônio Veimar da Silva



Doutor em Agronomia (UFPB). Mestre em Ensino de Ciências e Matemática (UNICSUL). Especialista em Gestão Escolar; Psicopedagogia Clínica e Institucional; ABA – Análise do Comportamento Aplicado (Faculdade Prominas); Engenharia de Segurança no Trabalho (Faculdade Unica); Ensino de Matemática (FINON); Docência do Ensino Superior (ISEPRO); Fitotecnia (IFPI) e Proteção de Plantas (UFV). Graduado em Pedagogia (UFPI), Matemática e Engenharia Agrônômica (UESPI). Graduando em Psicologia (FAMEP). Atualmente é professor. E-mail: veimar74185@gmail.com.

CURRÍCULO DOS AUTORES

- **Alexandre Moura Lima Neto**

Doutorando em Direito (UNISINOS). Mestre em Direito (UniCEUMA). Mestre em Cultura e Sociedade (UFMA). Professor Universitário. E-mail: alexandrenetoadv@hotmail.com. Lattes: <http://lattes.cnpq.br/1706282255569486>.

- **Diego Fernando Daniel**

Doutorando em Agronomia pelo Programa de Pós-graduação em Agronomia (PPGAG) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Engenheiro Agrônomo e Mestre em Ambiente e Sistemas de Produção Agrícola pela Universidade do Estado de Mato Grosso (UNEMAT). Professor do Curso de Agronomia da Universidade do Oeste de Santa Catarina (UNOESC). E-mail: diego.daniel@unoesc.edu.br. Lattes: <http://lattes.cnpq.br/8569666464325369>

- **Erine Natalie Bortot**

Mestranda em Desenvolvimento Regional pelo Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Regional (PPGDR) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Graduação em Administração e Especialização em Educação a Distância pela Universidade Norte do Paraná (UNOPAR). E-mail: erinenataliebortot@gmail.com. Lattes: <http://lattes.cnpq.br/6087516295353529>.

- **Fabíola de Pádua Melo Padilha**

MBA em Gestão Pública (Faculdade UniBF). Graduada em Engenharia Florestal (UFMT) e Ciências Biológicas (UNIVAG). Atualmente é servidora pública do quadro técnico efetivo da Fundação Universidade Federal de Rondônia - UNIR. E-mail: fabiola.padilha@unir.br. Lattes: <http://lattes.cnpq.br/6774177644547939>

- **Jefferson Santos de Amorim**

Jefferson Santos de Amorim - Mestre em Ciência e Tecnologia Ambiental e Doutorando em Engenharia Ambiental (UEPB). Graduado em Ciências Biológicas (UEPB) e Gestão Ambiental (Unipe). E-mail: bio_jefferson20@hotmail.com

- **Lucas Santos Campos**

Lucas Santos Campos - Graduando em Agronomia (UFPB). E-mail: lucassantoscamos4@gmail.com. Lattes: <http://lattes.cnpq.br/3087505901196901>

- **Michelle dos Santos Oliveira**

Mestre em Recursos Genéticos Vegetais (UFRB). Especialista em Agricultura de Precisão (Faculdade Iguaçu – FI) e em Fisiologia Vegetal, Nutrição e Desenvolvimento de Plantas (ESALQ/USP). E-mail: michelledoliveira95@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4885-7340>.

- **Rayane Feitosa de carvalho**

Mestre em Água e solo (UFERSA). Graduada em tecnologia Agroecologia (UFPB). atualmente é estudante de doutorado (UFPB). E-mail: enayarc@gmail.com. Lattes: <https://lattes.cnpq.br/4729263406540228>.

- **Thiago José Trindade Ferreira**

Graduado em Zootecnia Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA). Email: thiagotrindadelattesurg@gmail.com. Lattes: <http://lattes.cnpq.br/9804904634120275>.

- **Vinicius Braga Soares**

Mestrando em Gestão e Estratégia (UFRRJ). Especialista em Sistemas de Gestão Integrados (Faculdade Iguaçu). Especialista em Educação Profissional e Tecnologia (Faculdade Iguaçu). Graduado em Engenharia Mecânica (UNIAN), Administração (UniFatecie) e Tecnólogo em Mecânica (CEFET-RJ). Técnico em Segurança do Trabalho (IETAAM) e Eletrotécnica (IBC). Atualmente é Diretor na Airmarine Engenharia. E-mail: vbraso@yahoo.com.br. Lattes: <http://lattes.cnpq.br/7294360924197610>.

