

**CULTIVO PROTEGIDO E
AUTOMAÇÃO AGRÍCOLA:
IMPACTOS NO
DESENVOLVIMENTO DE
HORTALIÇAS FOLHOSAS
EM AMBIENTE
CONTROLADO**

**PROTECTED CULTIVATION AND AGRICULTURAL AUTOMATION: IMPACTS
ON THE DEVELOPMENT OF LEAFY VEGETABLES IN A CONTROLLED
ENVIRONMENT**

Ciências Agrárias, Engenharias • 26/07/2026

REGISTRO DOI: [10.70773/revistatopicos/784744821](https://doi.org/10.70773/revistatopicos/784744821)

Josué Marciel da Silva¹

Simone Campos Pinheiro²

Maryanne Oliveira Sousa³

Raiany Alexandra Fernandes Nunes⁴

Raffa Hellen Xavier Rabello da Silva⁵

Iranira Geminiano de Melo⁶

RESUMO

O artigo analisa os impactos do cultivo protegido associado à automação agrícola no desenvolvimento de hortaliças folhosas produzidas em ambiente controlado. A pesquisa parte da necessidade de reduzir a influência das variações climáticas sobre a produção e de ampliar a eficiência no uso de água, nutrientes e energia, diante das crescentes exigências por produtividade, qualidade e sustentabilidade. Com base em revisão da literatura, são apresentados os principais sistemas de cultivo protegido, como estufas, telados, hidroponia e fazendas verticais, bem como as tecnologias de automação empregadas no monitoramento e controle das condições ambientais e nutricionais, incluindo sensores, Internet das Coisas (IoT), sistemas automatizados de irrigação e fertirrigação, climatização, iluminação artificial e ferramentas baseadas em inteligência artificial. A análise evidencia que a integração dessas tecnologias contribui para maior estabilidade do microclima, melhoria da produtividade, uniformidade das plantas, qualidade comercial e nutricional das hortaliças, além de otimizar o uso de recursos hídricos e fertilizantes. Entretanto, ressalta que os benefícios dependem da correta calibração dos equipamentos, da manutenção dos sistemas, da capacitação dos operadores e da viabilidade econômica da implantação. Conclui-se que o cultivo protegido aliado à automação representa uma estratégia promissora para a horticultura moderna, desde que sua adoção seja acompanhada por planejamento técnico, gestão adequada e desenvolvimento de tecnologias acessíveis às diferentes escalas de produção.

Palavras-chave: Cultivo protegido; Automação agrícola; Hortaliças folhosas; Agricultura de precisão; Ambiente controlado.

ABSTRACT

This article analyzes the impacts of protected cultivation combined with agricultural automation on the development of leafy vegetables grown in controlled environments. The study is based on the need to reduce the influence of climate variability on production while improving the efficiency of water, nutrient, and energy use in response to increasing demands for productivity, quality, and sustainability. Based on a literature review, the main protected cultivation systems, including greenhouses, shade houses, hydroponics, and vertical farming, are presented, as well as automation technologies used for monitoring and controlling environmental and nutritional conditions. These technologies include sensors, the Internet of Things (IoT), automated irrigation and fertigation systems, climate control, artificial lighting, and artificial intelligence-based tools. The analysis demonstrates that the integration of these technologies contributes to greater microclimate stability, increased productivity, improved plant uniformity, enhanced commercial and nutritional quality of leafy vegetables, and optimized use of water and fertilizers. However, the study emphasizes that these benefits depend on proper equipment calibration, system maintenance, operator training, and the economic feasibility of implementation. It is concluded that protected cultivation combined with agricultural automation represents a promising strategy for modern horticulture, provided that its adoption is supported by technical planning, effective management, and the development of accessible technologies for different production scales.

Keywords: Protected cultivation; Agricultural automation; Leafy vegetables; Precision agriculture; Controlled environment.

1. INTRODUÇÃO

A produção de hortaliças folhosas ocupa posição estratégica nos sistemas alimentares por reunir elevada importância econômica, frequência de consumo e reconhecido valor nutricional, especialmente no caso de espécies como alface, rúcula, couve, espinafre e agrião. Ao mesmo tempo, a constituição morfofisiológica dessas culturas, marcada por tecidos tenros, elevada proporção de água e aproveitamento comercial concentrado na parte aérea, torna seu desempenho particularmente sensível às alterações de temperatura, umidade relativa, disponibilidade hídrica, radiação e composição nutricional do meio de cultivo. Guedes et al. (2024) demonstram que a produção em solo e em substrato, quando realizada sob proteção, exige compatibilização entre as características da estrutura, as propriedades do meio radicular e as necessidades específicas de cada cultura, pois a simples cobertura física não assegura condições adequadas de crescimento. Júnior, Guedes e Braga (2024) situam a implantação do cultivo protegido como decisão técnica que envolve localização, orientação da estrutura, materiais de cobertura, ventilação, irrigação e organização do espaço produtivo, elementos que condicionam diretamente o microclima e a resposta das plantas.

Essa discussão adquire maior relevância diante das transformações contemporâneas nos circuitos de produção, distribuição e consumo de alimentos. Wilkinson (2023) assinala que os sistemas alimentares estão sendo reorganizados por exigências de regularidade, qualidade, rastreabilidade e sustentabilidade, enquanto Barreiras (2023) evidencia que perdas e desperdícios não se restringem ao consumo final, mas também decorrem de falhas produtivas, instabilidade das colheitas, inadequações no manejo e dificuldades de conservação. Nesse contexto, a produção protegida de folhosas não deve ser compreendida apenas como técnica destinada a elevar

rendimentos, mas como estratégia capaz de reduzir oscilações na oferta, preservar a qualidade comercial e diminuir perdas decorrentes da exposição das culturas a chuvas intensas, ventos, calor excessivo, déficit hídrico e outros fatores ambientais que comprometem a uniformidade e a comercialização.

A ampliação do cultivo protegido decorre, portanto, da necessidade de reduzir a dependência direta das condições climáticas externas e de estabelecer sistemas produtivos mais eficientes no uso de água, nutrientes, energia e área disponível. Essa modalidade abrange desde estufas e túneis com controle parcial do ambiente até sistemas hidropônicos, fazendas verticais e instalações de maior complexidade, nas quais diferentes variáveis são monitoradas e reguladas continuamente. Lima e Gundim (2023) analisam a fazenda vertical como modelo de agricultura urbana no qual a sobreposição de camadas produtivas, o cultivo sem solo e o controle ambiental permitem intensificar o aproveitamento do espaço, aproximar a produção dos centros consumidores e reduzir determinadas perdas logísticas. Martins (2023), ao discutir o emprego de plásticos na Agricultura 4.0 e em ecoparques agroindustriais, chama atenção para o papel dos materiais de cobertura, condução e proteção na organização de ambientes tecnificados, embora sua utilização deva ser examinada também sob os critérios de durabilidade, descarte, eficiência térmica e impacto ambiental.

No interior desses sistemas, o manejo nutricional assume caráter decisivo. Petrucci (2025), ao investigar a marcha de absorção de nutrientes em cultivo hidropônico, reforça a necessidade de considerar que a demanda mineral se modifica ao longo do desenvolvimento vegetal, princípio aplicável às folhosas produzidas

em solução nutritiva ou substratos inertes. Oliveira (2023), por sua vez, aborda alternativas de adubação orgânica na cultura da alface, indicando que a sustentabilidade nutricional não depende apenas da substituição de insumos sintéticos, mas da capacidade de fornecer nutrientes em quantidades, formas e momentos compatíveis com a absorção da planta.

O cultivo protegido, desse modo, não elimina a complexidade agrônômica; ele a desloca para um ambiente no qual pequenas inadequações de irrigação, condutividade elétrica, pH, temperatura radicular ou ventilação podem produzir efeitos rápidos sobre a expansão foliar, a formação de biomassa e a qualidade final. A eficiência do sistema depende da articulação entre estrutura, cultivar, solução nutritiva, densidade de plantio, disponibilidade luminosa e manejo diário, e não apenas do isolamento físico em relação ao ambiente externo.

É nesse ponto que a automação agrícola se incorpora ao cultivo protegido como instrumento de observação, decisão e atuação sobre o ambiente produtivo. Sensores de temperatura e umidade do ar, umidade do solo ou substrato, luminosidade, pH e condutividade elétrica permitem transformar condições antes avaliadas de modo descontínuo em conjuntos de dados passíveis de acompanhamento sistemático. Salgado et al. (2025) apresentam uma solução baseada em Internet das Coisas voltada ao monitoramento e ao controle de parâmetros ambientais em cultivos sustentáveis residenciais, evidenciando a possibilidade de integrar sensores, comunicação remota e acionamento de dispositivos em estruturas de menor escala. Reis et al. (2024), ao investigarem o uso da Internet das Coisas no monitoramento da alface hidropônica em ambiente controlado, aproximam essa tecnologia das exigências específicas de uma

folhosa cuja resposta produtiva depende da estabilidade da solução nutritiva e do microclima.

Fonseca (2025) concentra-se no controle da condutividade elétrica em sistemas hidropônicos, variável que expressa a concentração iônica da solução e cuja inadequação pode indicar insuficiência nutricional ou excesso de sais. O monitoramento contínuo desse parâmetro permite intervenções mais precisas, mas exige calibração, manutenção e interpretação agrônômica, pois um valor isolado não informa quais nutrientes estão disponíveis nem se encontram em proporções equilibradas. No manejo hídrico, Da Silva et al. (2023) demonstram o potencial de sistemas automatizados de baixo custo para irrigação, alternativa particularmente relevante para pequenos produtores e unidades produtivas com restrição de capital. A automação pode reduzir o acionamento desnecessário de bombas e válvulas, evitar tanto o déficit quanto o excesso de água e diminuir a dependência de operações manuais.

Em níveis mais avançados, Leal et al. (2024) exploram o manejo de alface hidropônica por rede neural artificial convolucional, indicando a possibilidade de utilizar imagens e padrões visuais para reconhecer características do desenvolvimento e subsidiar decisões de cultivo. A iluminação artificial e suplementar também integra esse processo. Santos et al. (2024) demonstram que intensidade, duração e qualidade espectral da luz se relacionam com a produtividade vegetal, de modo que o emprego de luminárias não pode ser reduzido à simples extensão do fotoperíodo, devendo considerar respostas morfológicas, fotossintéticas e metabólicas.

Assim, sensores, controladores, irrigação e fertirrigação automatizadas, ventilação, climatização, iluminação e plataformas

digitais constituem componentes de um mesmo sistema, cuja efetividade depende da correspondência entre os dados coletados, os parâmetros estabelecidos e as exigências fisiológicas da cultura.

A adoção dessas tecnologias também envolve dimensões econômicas, operacionais, formativas e institucionais que impedem considerar a automação como solução autônoma ou universal. Frasson (2024), ao examinar potencialidades e limitações de um projeto STEAM com horta hidropônica em escola pública, mostra que a incorporação de tecnologias agrícolas depende de formação, integração entre áreas do conhecimento, disponibilidade de materiais e continuidade das ações. Darosci et al. (2022) relacionam pesquisa e extensão à construção de soluções contextualizadas, aspecto decisivo para que sistemas de monitoramento e controle sejam adaptados às condições locais, em vez de reproduzidos sem avaliação de viabilidade. Machado, Silva e Megguer (2025), ao recuperarem a trajetória da formação profissional em olericultura, permitem compreender que o avanço técnico da produção de hortaliças requer produção científica, qualificação de recursos humanos e aproximação entre pesquisa, ensino e setor produtivo. A calibração inadequada de sensores, a perda de comunicação entre dispositivos, a manutenção insuficiente, a definição incorreta de limites de acionamento, o consumo energético e o investimento inicial podem reduzir os benefícios esperados ou até provocar prejuízos ao desenvolvimento das plantas.

Por essa razão, a análise dos impactos da automação deve considerar indicadores de crescimento, produtividade, uniformidade, qualidade comercial e nutricional, eficiência hídrica, uso de fertilizantes, demanda energética e necessidade de mão de

obra, reconhecendo que seus resultados variam segundo a espécie, a cultivar, o sistema de cultivo e o nível tecnológico empregado.

Diante desse quadro, estabelece-se como problema de pesquisa a seguinte questão: de que maneira o cultivo protegido associado à automação agrícola influencia o crescimento, a produtividade e a qualidade de hortaliças folhosas produzidas em ambiente controlado? Este estudo tem como objetivo geral analisar os impactos do cultivo protegido e da automação agrícola sobre o desenvolvimento, a produtividade e a qualidade dessas culturas. Especificamente, busca-se caracterizar os principais sistemas de cultivo protegido utilizados na produção de folhosas; identificar as tecnologias aplicadas ao monitoramento e ao controle das condições ambientais e nutricionais; discutir os efeitos da regulação da temperatura, umidade, luminosidade, irrigação e fertirrigação sobre o desenvolvimento vegetal; analisar os benefícios da automação para a produtividade, a uniformidade e a qualidade das plantas; examinar suas limitações técnicas, econômicas, energéticas e operacionais; e apresentar perspectivas para a ampliação de tecnologias inteligentes acessíveis, confiáveis e agronomicamente ajustadas à horticultura em ambiente controlado.

2. CULTIVO PROTEGIDO E PRODUÇÃO DE HORTALIÇAS FOLHOSAS

2.1. Fundamentos e Modalidades de Cultivo Protegido

O cultivo protegido compreende um conjunto de estruturas e práticas destinadas a reduzir a exposição direta das plantas às oscilações climáticas e a modificar, em diferentes intensidades, o ambiente de produção. Diferentemente do cultivo convencional a

céu aberto, no qual chuva, vento, radiação, temperatura e umidade atuam com menor possibilidade de intervenção, as estruturas protegidas permitem atenuar esses fatores por meio de coberturas, ventilação, sombreamento e manejo hídrico. Júnior, Guedes e Braga (2024) assinalam que sua implantação depende de decisões relacionadas à localização, à orientação da estrutura, aos materiais empregados e à disponibilidade de água, uma vez que tais escolhas condicionam o microclima interno.

Guedes et al. (2024) acrescentam que o cultivo pode ocorrer diretamente no solo ou em substratos, com diferentes graus de controle e tecnificação. Essa modalidade também se distingue da agricultura integralmente controlada, praticada em câmaras de crescimento ou instalações fechadas, nas quais iluminação, temperatura, umidade, composição atmosférica e nutrição são reguladas artificialmente.

Zacarias et al. (2023), ao compararem cultivares de alface crespa em ambiente protegido e a céu aberto, demonstram que a proteção altera o desempenho produtivo, mas não elimina a influência do genótipo e do período de cultivo. Batista et al. (2023) confirmam essa relação ao verificarem respostas distintas entre cultivares conduzidas sob diferentes ambientes em sistema orgânico. Ferreira et al. (2025) reforçam que a produtividade resulta da interação entre ambiente, cultivar e manejo, enquanto Da Silva Borges et al. (2022) situam a adoção dessas estruturas entre as estratégias utilizadas pelo setor de hortaliças para enfrentar irregularidade produtiva, elevada perecibilidade e exigências crescentes de padronização comercial.

As modalidades de cultivo protegido distribuem-se em um contínuo que abrange túneis baixos, túneis altos, telados, casas de vegetação, estufas agrícolas, sistemas hidropônicos, cultivos em substrato, fazendas verticais e câmaras de crescimento. Túneis baixos oferecem proteção temporária e apresentam reduzida capacidade de intervenção interna, enquanto túneis altos e casas de vegetação permitem circulação de trabalhadores, instalação de sistemas hidráulicos e manejo prolongado das culturas.

Telados e estruturas com sombreamento atuam sobretudo sobre a radiação incidente e a carga térmica. Costa (2023) evidencia que as telas podem modificar o desenvolvimento e a produção das folhosas, razão pela qual sua escolha deve considerar espécie, época do ano e intensidade luminosa. Mascarenhas (2022) observa que o sombreamento altera simultaneamente temperatura, umidade e disponibilidade de luz, podendo reduzir o estresse térmico ou limitar a fotossíntese quando empregado de forma excessiva. Da Silva Gomes e Prins (2025) mostram que, mesmo em ambiente protegido, a variação sazonal interfere no perfil metabólico de mudas de alface, o que confirma que a cobertura não neutraliza completamente as condições externas.

Nos sistemas hidropônicos, o controle desloca-se também para a zona radicular, pois água e nutrientes são fornecidos por soluções formuladas. Amorim (2024) demonstra que linhagens de alface lisa e mimosa apresentam respostas agrônômicas distintas nos cultivos convencional e hidropônico, enquanto Aguiar, Santos e Viterbo (2023) identificam variações no desempenho de genótipos baby leaf submetidos a diferentes soluções nutritivas. Dantas (2023), ao analisar a formação de mudas em bandejas seguida de transplântio, evidencia que a proteção pode ser aplicada apenas às etapas iniciais,

favorecendo germinação, estabelecimento e uniformidade antes da transferência para o sistema definitivo.

O grau de controle ambiental varia conforme a infraestrutura e a capacidade técnica de manejo. Em estruturas simples, a ventilação ocorre naturalmente pelas aberturas, o sombreamento permanece fixo e a irrigação é realizada manualmente ou por programação temporal. Em instalações intermediárias, bombas, válvulas e sensores auxiliam o manejo da água e da temperatura; nos sistemas mais tecnificados, climatização, iluminação artificial, fertirrigação, recirculação de soluções e monitoramento permanente permitem intervenções mais precisas.

Essa progressão, contudo, não significa que o aumento da complexidade tecnológica produza automaticamente melhores resultados, pois a resposta das culturas continua condicionada à articulação entre ambiente, genótipo, nutrição e manejo. Covolan, Ferreira e Gomes (2022) demonstram que a influência do ambiente protegido sobre a alface varia conforme o sistema de adubação, indicando que a estrutura não corrige desequilíbrios nutricionais ou práticas inadequadas. Santos et al. (2022) e Dos Santos e Junior (2024), ao estudarem a aplicação de urina de vaca em variedades de alface, mostram que fontes alternativas de nutrientes podem ser integradas ao cultivo protegido, mas seus efeitos dependem da dose e da forma de aplicação. Biafora (2025) amplia essa discussão ao abordar a biofortificação agronômica de hortaliças folhosas, cujo êxito requer controle da composição nutricional sem comprometer crescimento, produtividade ou segurança do alimento. Assim, o cultivo protegido deve ser compreendido como um arranjo técnico graduado, que vai da proteção física elementar ao controle integral do ambiente e cuja eficiência depende menos da quantidade de

equipamentos do que da adequação entre estrutura, cultura, condições regionais e capacidade de manejo.

2.2. Exigências Ambientais e Fisiológicas das Hortaliças Folhosas

O cultivo protegido compreende um conjunto de técnicas destinadas a modificar, em diferentes intensidades, as condições ambientais às quais as plantas estão submetidas, distinguindo-se tanto do cultivo convencional a céu aberto quanto dos sistemas integralmente controlados. No campo aberto, temperatura, precipitação, radiação, ventos e umidade relativa variam segundo a dinâmica climática local, limitando a capacidade de intervenção do produtor e ampliando a exposição das culturas a eventos adversos. Nas estruturas protegidas, a cobertura, o sombreamento, a ventilação e o manejo hídrico permitem atenuar parte dessas oscilações, embora não eliminem a influência externa. Júnior, Guedes e Braga (2024) ressaltam que a implantação dessas estruturas exige decisões relacionadas à localização, orientação, materiais de cobertura, ventilação e disponibilidade de água, pois tais componentes determinam a formação do microclima interno.

Guedes et al. (2024) acrescentam que o ambiente protegido pode abrigar cultivos em solo ou substrato, com diferentes níveis de tecnificação, desde túneis e telados simples até casas de vegetação equipadas com sistemas de irrigação e controle ambiental. Essa gradação tecnológica impede que o cultivo protegido seja tratado como categoria homogênea. Zacarias et al. (2023), ao compararem cultivares de alface crespa em ambiente protegido e a céu aberto durante o período chuvoso, evidenciam que a resposta produtiva decorre da interação entre genótipo e condição ambiental, enquanto Batista et al. (2023) demonstram que diferentes

ambientes de cultivo podem alterar o desempenho de cultivares conduzidas sob manejo orgânico. Covolan, Ferreira e Gomes (2022) também relacionam a proteção ambiental às respostas da alface submetida a adubações orgânica e convencional, indicando que o efeito da estrutura depende do manejo adotado. No plano produtivo mais amplo, Da Silva Borges et al. (2022) situam a modernização do cultivo de hortaliças entre os desafios do setor, especialmente diante da necessidade de regularidade da oferta, redução de perdas e adaptação das tecnologias às condições regionais.

As modalidades de cultivo protegido diferenciam-se pela arquitetura da estrutura, pelo meio de crescimento e pela capacidade de regular as variáveis ambientais. Túneis baixos oferecem proteção temporária contra chuvas e oscilações térmicas próximas ao solo, enquanto túneis altos e casas de vegetação permitem maior circulação de trabalhadores, instalação de equipamentos e condução prolongada das culturas. Telados e telas de sombreamento atuam principalmente sobre a quantidade e a distribuição da radiação incidente, modificando simultaneamente a temperatura e a umidade no interior do cultivo. Costa (2023) demonstra que a escolha da tela não constitui mera decisão construtiva, pois diferentes níveis de sombreamento alteram o desenvolvimento e a produção das folhosas. Mascarenhas (2022) reforça que as telas modificam o microclima da alface, podendo reduzir a carga térmica em períodos quentes, mas também limitar a disponibilidade luminosa quando selecionadas sem correspondência com a estação, a latitude e a exigência da cultivar.

Em sistemas hidropônicos, a proteção da parte aérea é combinada ao cultivo sem solo, no qual as raízes recebem água e nutrientes por meio de soluções formuladas. Amorim (2024), ao caracterizar

linhagens de alface lisa e mimosa em sistemas convencional e hidropônico, mostra que a modalidade produtiva interfere na expressão agrônômica dos materiais genéticos, não sendo possível atribuir superioridade universal a um único sistema. Aguiar, Santos e Viterbo (2023) verificam, em genótipos de alface baby leaf, que a resposta das plantas também varia segundo a composição da solução nutritiva empregada no ambiente protegido. O uso de bandejas e o posterior transplantio representam outra estratégia de proteção nas fases iniciais, permitindo maior controle sobre germinação e estabelecimento das mudas, como observado por Dantas (2023) na produção de rabanete. Assim, estufas, túneis, telados, cultivos em substrato e sistemas hidropônicos não correspondem apenas a formatos físicos distintos, mas a arranjos técnicos que redistribuem o controle sobre água, luz, temperatura, nutrição e desenvolvimento radicular.

A eficiência desses ambientes depende de sua adequação às exigências fisiológicas das hortaliças folhosas, cujas folhas constituem o principal órgão comercial e respondem rapidamente às alterações do microclima. A temperatura do ar regula processos como fotossíntese, respiração, expansão celular e duração do ciclo, enquanto a temperatura da zona radicular interfere na absorção de água e nutrientes. Valores excessivos podem acelerar o metabolismo respiratório, reduzir o acúmulo de biomassa e comprometer a qualidade das folhas, ao passo que temperaturas muito baixas retardam o crescimento. Da Silva Gomes e Prins (2025) mostram que a variação sazonal em região tropical modifica o perfil metabólico de mudas de alface produzidas em ambiente protegido, evidenciando que a cobertura não neutraliza integralmente as diferenças entre estações. Ferreira et al. (2025) também identificam efeitos combinados de ambiente, cultivar e manejo sobre a produção da

alface, indicando que a resposta vegetal emerge de relações multivariadas, e não da ação isolada de um único fator.

A umidade relativa e a circulação de ar participam dessa dinâmica ao condicionarem a transpiração, a temperatura foliar e a formação de gradientes de vapor entre a folha e a atmosfera. Em ambientes pouco ventilados, umidade elevada e condensação podem reduzir a transpiração, alterar o transporte de nutrientes e favorecer condições fitossanitárias desfavoráveis. A radiação solar e a iluminação determinam a disponibilidade de energia para a fotossíntese, mas sua influência depende da intensidade, da duração da exposição e do estágio fenológico. Costa (2023) e Mascarenhas (2022) convergem ao demonstrar que o sombreamento pode proteger contra excesso térmico, porém o bloqueio luminoso acima da necessidade da cultura restringe a assimilação de carbono e a expansão foliar. Dessa forma, o manejo do ambiente deve buscar equilíbrio entre redução do estresse térmico e preservação de níveis luminosos suficientes, considerando que as cultivares diferem em arquitetura, pigmentação, velocidade de crescimento e tolerância às oscilações ambientais.

A disponibilidade hídrica e nutricional completa o conjunto de fatores que condiciona o desenvolvimento das folhosas em ambiente protegido. O déficit de água reduz a turgescência, limita a expansão das folhas, compromete a condutância estomática e diminui a fotossíntese; o excesso, por sua vez, pode reduzir a oxigenação das raízes, favorecer desequilíbrios nutricionais e criar condições propícias ao desenvolvimento de doenças. Nos sistemas hidropônicos, a composição da solução, o pH e a condutividade elétrica determinam a disponibilidade dos elementos minerais e o potencial osmótico ao qual as raízes são expostas. Aguiar, Santos e

Viterbo (2023) demonstram que diferentes soluções nutritivas produzem respostas distintas entre genótipos de alface baby leaf, confirmando que a concentração de nutrientes precisa ser ajustada ao material vegetal e à fase de desenvolvimento.

Biafora (2025), ao discutir a biofortificação agronômica de hortaliças folhosas, evidencia que a manipulação nutricional pode ampliar determinados componentes de interesse, mas exige controle rigoroso para evitar toxicidade, antagonismos e perdas de produtividade. Em sistemas baseados em insumos orgânicos, Santos et al. (2022) e Dos Santos e Junior (2024) analisam a aplicação de urina de vaca na produção de alface em cultivo protegido, mostrando que fontes alternativas podem influenciar crescimento e rendimento, desde que a dose e a forma de aplicação sejam compatíveis com as exigências da cultura. Covolan, Ferreira e Gomes (2022) reforçam que o ambiente protegido não substitui o manejo nutricional, pois a resposta da alface varia segundo a fonte de adubação e as condições de cultivo. A concentração de dióxido de carbono também interfere na assimilação fotossintética, embora seu aproveitamento dependa de luz, temperatura, estado hídrico e disponibilidade mineral adequados.

2.3. Benefícios e Limitações Agronômicas do Ambiente Protegido

O cultivo protegido modifica a relação direta entre as hortaliças e as condições atmosféricas, reduzindo a exposição das plantas às chuvas intensas, aos ventos, ao granizo e às oscilações abruptas de temperatura que frequentemente comprometem o estabelecimento, o crescimento e a qualidade comercial das folhas. Júnior, Guedes e Braga (2024) situam a implantação dessas estruturas como uma decisão agronômica que envolve cobertura,

orientação, ventilação, irrigação e organização interna, de modo que a proteção obtida não decorre apenas da presença de uma barreira física, mas da adequação do projeto às condições climáticas locais e às exigências da cultura. Guedes et al. (2024) acrescentam que o cultivo em solo ou substrato sob ambiente protegido permite maior domínio sobre o manejo hídrico e nutricional, embora os resultados dependam da integração entre estrutura, material vegetal e sistema produtivo.

Durante períodos chuvosos, essa proteção pode evitar danos mecânicos às folhas, lixiviação de nutrientes, saturação do solo e redução da qualidade visual, aspectos particularmente relevantes para espécies comercializadas frescas. Zacarias et al. (2023), ao compararem cultivares de alface crespa em ambiente protegido e a céu aberto, evidenciam que o benefício da proteção não se manifesta de forma idêntica entre os materiais genéticos, pois a resposta produtiva permanece condicionada à cultivar e ao período de cultivo. Batista et al. (2023) também demonstram que o desempenho da alface sob manejo orgânico varia entre ambientes, indicando que a estrutura protegida deve ser compreendida como um componente do sistema, e não como garantia isolada de produtividade. Para Da Silva Borges et al. (2022), os desafios do agronegócio de hortaliças incluem a irregularidade da oferta, a perecibilidade e a necessidade de atender padrões comerciais, circunstâncias nas quais a redução dos danos climáticos e a maior previsibilidade da colheita assumem valor econômico. A possibilidade de produzir em épocas menos favoráveis amplia a continuidade do abastecimento, mas exige planejamento compatível com o comportamento sazonal das culturas, uma vez que a cobertura apenas atenua, sem eliminar, a influência do clima externo.

A maior uniformidade das plantas constitui um dos benefícios agronômicos mais relevantes do ambiente protegido, pois a redução das diferenças de umidade, temperatura e disponibilidade nutricional tende a diminuir a variabilidade dentro do lote. Essa uniformização favorece o planejamento da colheita, a padronização das unidades comercializadas e o aproveitamento da área, embora dependa da distribuição espacial dos recursos no interior da estrutura. Ferreira et al. (2025) mostram que a produção da alface resulta da interação entre ambiente, cultivar e manejo, o que impede atribuir a uniformidade exclusivamente à proteção física. Mesmo em estufas aparentemente homogêneas, podem ocorrer gradientes de radiação, temperatura e ventilação capazes de gerar diferenças entre as plantas localizadas nas bordas, no centro ou nas proximidades das aberturas. Costa (2023) demonstra que telas de sombreamento interferem no desenvolvimento das hortaliças folhosas ao alterar a quantidade de radiação recebida, podendo reduzir o estresse térmico e preservar a aparência das folhas em condições de elevada incidência solar. Mascarenhas (2022), contudo, observa que o sombreamento também modifica o microclima e pode limitar a assimilação fotossintética quando sua intensidade excede a necessidade da cultura, revelando que a proteção contra o excesso de radiação deve ser equilibrada com a manutenção de energia suficiente para o crescimento. Da Silva Gomes e Prins (2025) reforçam essa interpretação ao relacionarem a variação sazonal a mudanças no perfil metabólico de mudas de alface produzidas em ambiente protegido, sinalizando que as plantas continuam respondendo às estações mesmo sob cobertura. Dantas (2023), ao analisar a produção de rabanete semeado em bandejas e posteriormente transplantado, evidencia outra vantagem do cultivo protegido: o maior controle nas fases iniciais, quando a uniformidade da germinação e o estabelecimento das mudas

condicionam o desempenho posterior no campo ou na estrutura definitiva. Essa previsibilidade pode reduzir falhas de estande e encurtar o período de ocupação da área produtiva, mas não elimina a necessidade de selecionar recipientes, substratos, densidades e momentos de transplântio adequados. Desse modo, a regularidade da produção depende de decisões técnicas sucessivas, desde a formação das mudas até a condução final, e não apenas do isolamento das plantas em relação às intempéries.

O uso mais eficiente de água e fertilizantes decorre da possibilidade de direcionar esses insumos à zona radicular, ajustar frequências de aplicação e reduzir perdas por escoamento, lixiviação ou distribuição irregular. Nos sistemas hidropônicos, essa eficiência pode ser ampliada pela recirculação da solução nutritiva e pelo controle de sua composição, mas exige monitoramento rigoroso para evitar acúmulo de sais e desequilíbrios minerais. Aguiar, Santos e Viterbo (2023) demonstram que genótipos de alface baby leaf respondem de maneira distinta às soluções nutritivas em cultivo protegido, indicando que a eficiência não deve ser medida apenas pelo menor volume aplicado, mas pela correspondência entre concentração, demanda da planta e resposta agrônômica. Amorim (2024), ao comparar linhagens de alface lisa e mimosa em sistemas convencional e hidropônico, evidencia que o meio de cultivo modifica a expressão produtiva dos materiais, de modo que ganhos em uniformidade ou precocidade podem variar conforme o genótipo. Biafora (2025) acrescenta que estratégias de biofortificação de hortaliças folhosas dependem da manipulação criteriosa da nutrição, pois o aumento de determinados elementos ou compostos de interesse deve ser conciliado com produtividade, segurança e qualidade comercial. Em sistemas orgânicos ou de base agroecológica, a eficiência dos fertilizantes também se relaciona à

disponibilidade temporal dos nutrientes e ao controle das doses aplicadas. Santos et al. (2022) e Dos Santos e Junior (2024), ao investigarem o uso de urina de vaca na produção de alface em ambiente protegido, apontam a possibilidade de utilização de fontes alternativas, mas seus resultados reforçam a necessidade de adequar concentração, frequência e forma de aplicação às exigências da cultura. Covolan, Ferreira e Gomes (2022) mostram que os efeitos do ambiente protegido variam conforme o manejo da adubação orgânica ou convencional, confirmando que a estrutura não corrige automaticamente inadequações nutricionais. A eficiência hídrica e fertilizante, portanto, depende da capacidade de controlar a distribuição dos insumos sem criar condições de excesso. Irrigações frequentes e mal dimensionadas podem favorecer encharcamento, baixa oxigenação radicular e lixiviação, enquanto a fertirrigação concentrada ou a evaporação intensa podem elevar a condutividade elétrica e provocar estresse osmótico, redução da expansão foliar e perda de qualidade.

As mesmas estruturas que protegem as hortaliças contra eventos externos podem criar limitações internas capazes de comprometer o desempenho agrônomo. A retenção de radiação e a baixa renovação do ar elevam a temperatura, especialmente em regiões quentes, enquanto a transpiração das plantas e a evaporação da água aumentam a umidade relativa. Quando a ventilação é insuficiente, formam-se condições favoráveis à condensação sobre folhas, coberturas e componentes estruturais, ampliando o período de molhamento e os riscos fitossanitários. Mascarenhas (2022) ressalta que o manejo de telas deve considerar seus efeitos simultâneos sobre radiação, temperatura e umidade, pois a redução do aquecimento pode vir acompanhada de menor circulação de ar. Costa (2023) igualmente indica que a escolha do percentual de

sombreamento precisa ser ajustada à cultura e à época do ano, evitando tanto o excesso térmico quanto o alongamento, a redução da espessura foliar e a perda de produtividade por deficiência luminosa.

Zacarias et al. (2023) e Batista et al. (2023) demonstram, em diferentes condições de produção, que a superioridade do ambiente protegido não é absoluta, uma vez que determinadas cultivares podem responder de modo desigual ao microclima estabelecido. Ferreira et al. (2025) confirma que os efeitos produtivos são multivariados, resultantes da combinação entre ambiente, material genético e manejo. Somam-se a esses limites a salinização de solos e substratos, o acúmulo de nutrientes decorrente da menor lixiviação natural, a concentração de patógenos em áreas continuamente cultivadas e a necessidade de manutenção de coberturas, telas, sistemas hidráulicos e estruturas de sustentação. Júnior, Guedes e Braga (2024) observam que a viabilidade do cultivo protegido depende da qualidade da implantação, enquanto Guedes et al. (2024) associam seu desempenho à condução técnica contínua dos sistemas em solo e substrato. Os custos de aquisição, instalação e reposição de materiais precisam, assim, ser confrontados com produtividade, preço de venda, duração da estrutura e capacidade de manejo do produtor. Da Silva Borges et al. (2022) inserem essa discussão no contexto dos desafios regionais da horticultura, nos quais disponibilidade de capital, assistência técnica, logística e acesso ao mercado condicionam a adoção tecnológica.

3. AUTOMAÇÃO AGRÍCOLA E IMPACTOS NO DESENVOLVIMENTO DAS HORTALIÇAS

3.1. Tecnologias de Monitoramento e Controle Ambiental

O monitoramento ambiental constitui a base operacional do cultivo automatizado, pois converte condições físicas, químicas e biológicas do ambiente em dados utilizáveis para o manejo das hortaliças. Sensores de temperatura e umidade do ar permitem acompanhar a formação do microclima e identificar situações de aquecimento, ressecamento ou saturação atmosférica capazes de interferir na transpiração e no crescimento foliar. No solo ou no substrato, sensores capacitivos ou resistivos indicam a disponibilidade hídrica e subsidiam decisões de irrigação baseadas na condição efetiva da zona radicular, em lugar de intervalos temporais rígidos. Junior et al. (2025) demonstram essa lógica ao integrar um microcontrolador Arduino, um sensor de umidade do solo e um sensor de temperatura e umidade do ar ao acionamento automático da aspersão em hortaliças. Guimaraes et al. (2026) também associam a irrigação automática em ambiente protegido à leitura das condições de cultivo, enquanto Rossatto (2025) destaca o emprego de microcontroladores como unidades capazes de receber sinais, compará-los com parâmetros previamente definidos e comandar dispositivos hidráulicos.

Em sistemas hidropônicos, o monitoramento amplia-se para variáveis diretamente relacionadas à solução nutritiva. Oliveira et al. (2025) situam a hidroponia como uma fronteira de desenvolvimento agrícola dependente do controle técnico da água e da nutrição, ao passo que Cardoso, De Souza e De Oliveira (2025) mostram que as diferenças entre o cultivo hidropônico e o tradicional decorrem, entre outros fatores, do domínio exercido sobre o ambiente radicular. Medidores de pH e condutividade elétrica tornam-se, nesse contexto, instrumentos indispensáveis para verificar a disponibilidade e a concentração global de sais, embora suas leituras somente adquiram significado quando interpretadas em conjunto

com a temperatura da solução, o estágio de desenvolvimento e as exigências da espécie cultivada.

A coleta de dados precisa estar integrada a uma arquitetura de controle que processe as informações e execute respostas coerentes com os limites agronômicos estabelecidos. Cruz et al. (2023), ao desenvolverem um projeto de automação para o cultivo de hortaliças, evidenciam que a função do sistema não se encerra na medição, mas depende da articulação entre sensores, lógica de programação, controladores e atuadores. Essa estrutura pode comandar bombas, válvulas solenoides, ventiladores, exaustores, nebulizadores, cortinas, telas de sombreamento e luminárias, formando ciclos de controle nos quais cada ação modifica o ambiente e produz novos dados. Rodrigues e Meurer (2024) aplicam essa lógica à automatização da irrigação e da adubação por controlador lógico programável, tecnologia apropriada para operações que exigem estabilidade, repetibilidade e coordenação entre diferentes equipamentos.

Em unidades de menor escala, Souza (2024) demonstra a viabilidade de uma horta inteligente de baixo custo para alface, salsa e cebolinha, indicando que sistemas simplificados podem ajustar o fornecimento de água sem exigir infraestrutura industrial. David et al. (2024), no desenvolvimento de uma miniestufa automatizada, reforçam que a integração entre estrutura protegida e controle eletrônico permite acompanhar e modificar o ambiente de cultivo em espaços reduzidos. Já Silva et al. (2025) aproximam a automação hidropônica das particularidades climáticas do Amazonas, evidenciando que a programação dos limites de acionamento precisa considerar as condições regionais. A mesma temperatura que exige ventilação ou nebulização em determinado contexto

pode não justificar igual resposta em outro, de modo que a automação não deve operar com valores universais, mas com parâmetros compatíveis com a cultura, o sistema produtivo, a fase fenológica e o microclima local.

A Internet das Coisas amplia essa arquitetura ao conectar sensores, controladores e plataformas digitais, permitindo que os dados sejam transmitidos, armazenados e visualizados fora do ambiente de cultivo. Salgado et al. (2025) apresentam uma solução IoT voltada ao monitoramento e ao controle de parâmetros ambientais em cultivos sustentáveis residenciais, mostrando que a conectividade pode associar produção de pequena escala, acompanhamento remoto e acionamento automatizado. Ferlin et al. (2026) empregam tecnologias IoT no monitoramento ambiental de hortaliças, perspectiva que favorece a construção de séries temporais e a identificação de variações que dificilmente seriam percebidas por inspeções ocasionais. Do Nascimento e Bálsamo (2024) situam o fluxo de dados como elemento estruturante da agricultura digital, pois a informação percorre etapas de geração, transmissão, processamento, armazenamento e interpretação antes de subsidiar uma decisão agrônômica.

Aplicativos e plataformas remotas podem, assim, apresentar valores atuais, históricos, alertas e registros de acionamento, oferecendo ao produtor maior rastreabilidade sobre o funcionamento do sistema. De Castilho e De Castro Filho (2025) relacionam as estufas inteligentes ao monitoramento contínuo da temperatura, da umidade e da luminosidade, destacando que a automação reduz a dependência de ajustes manuais e favorece decisões fundamentadas em informações acumuladas. Essa conectividade, entretanto, somente melhora o manejo quando os dados possuem

qualidade metrológica, periodicidade adequada e correspondência com a realidade espacial da estufa. Um único sensor mal posicionado pode representar apenas uma fração do microclima, enquanto falhas de transmissão, atrasos no envio ou registros incompletos podem produzir interpretações equivocadas. A digitalização do cultivo, portanto, exige protocolos de calibração, redundância em pontos críticos e mecanismos de segurança capazes de manter operações essenciais mesmo durante interrupções de rede.

Os sistemas de visão computacional, inteligência artificial e modelagem preditiva representam um nível adicional de automação, no qual a análise deixa de se limitar a valores pontuais e passa a reconhecer padrões de crescimento, estresse ou alteração ambiental. Veiga (2025), ao revisar tendências da automação e da robótica na Agricultura 4.0, insere câmeras, algoritmos e equipamentos autônomos entre os recursos capazes de ampliar a precisão do manejo e reduzir intervenções repetitivas. Imagens captadas periodicamente podem subsidiar estimativas de cobertura vegetal, área foliar, coloração, uniformidade e velocidade de desenvolvimento, desde que os modelos sejam treinados com dados representativos da espécie, da cultivar e das condições luminosas do ambiente. Bolignani e De Lucca Filho (2024) observam que a integração tecnológica oferece oportunidades de eficiência, mas também enfrenta obstáculos relacionados a custos, compatibilidade entre equipamentos, capacitação dos usuários e manutenção. Esses limites tornam-se particularmente relevantes quando sensores, câmeras, controladores e serviços em nuvem pertencem a plataformas distintas, dificultando a comunicação entre dispositivos e a continuidade operacional. De Castilho e De Castro Filho (2025) associam a inteligência das estufas à capacidade

de monitorar e ajustar continuamente as condições internas, enquanto Veiga (2025) indica que modelos preditivos podem antecipar necessidades de irrigação, ventilação ou iluminação com base no comportamento anterior do sistema.

3.2. Automação da Irrigação, Fertirrigação e Climatização

A automação da irrigação em ambientes protegidos modifica a lógica convencional de fornecimento hídrico ao substituir decisões baseadas exclusivamente em horários fixos por sistemas capazes de responder às condições efetivas do solo, do substrato e da atmosfera. A programação temporal ainda pode ser útil em estruturas simples, sobretudo quando associada a ciclos produtivos conhecidos, mas apresenta limitações por não considerar variações diárias de temperatura, radiação, umidade relativa e demanda evaporativa. Junior et al. (2025) demonstram que o uso de Arduino, sensores de umidade e válvulas solenoides permite acionar a irrigação somente quando o conteúdo hídrico atinge limites previamente estabelecidos, reduzindo aplicações desnecessárias e evitando a dependência da observação manual. Guimaraes et al. (2026) também relacionam a irrigação automática em abrigos à maior regularidade no fornecimento de água, enquanto Rossatto (2025) destaca a função dos microcontroladores na leitura dos sinais ambientais e no comando de bombas e válvulas.

Em hortas de pequena escala, Souza (2024) evidencia que sistemas de baixo custo podem atender cultivos de alface, salsa e cebolinha, desde que os sensores sejam instalados em posições representativas e os limites de acionamento sejam ajustados às características do meio radicular. Cruz et al. (2023) reforçam que a eficiência do projeto depende da integração entre leitura, processamento e atuação, pois

a simples presença de um sensor não assegura manejo adequado. O controle da vazão, da frequência e da duração dos pulsos de irrigação precisa considerar a capacidade de retenção do substrato, a profundidade efetiva das raízes e a fase de desenvolvimento das plantas, evitando tanto o déficit hídrico, que reduz a expansão foliar, quanto o excesso de água, que diminui a aeração e compromete a atividade radicular.

Na fertirrigação, a automação amplia o controle sobre a oferta de nutrientes ao permitir que água e fertilizantes sejam aplicados de maneira coordenada, segundo parâmetros previamente definidos ou atualizados por sensores. Rodrigues e Meurer (2024) mostram que controladores lógicos programáveis podem integrar irrigação e adubação em estufas, comandando dosadores, bombas e válvulas com maior repetibilidade operacional. Em sistemas hidropônicos, essa precisão assume importância adicional, pois a solução nutritiva constitui simultaneamente o meio hídrico e a principal fonte mineral das plantas. Oliveira et al. (2025) situam a produção hidropônica entre os sistemas agrícolas de maior dependência do controle de pH, condutividade elétrica, temperatura e circulação da solução, uma vez que pequenas alterações nesses parâmetros podem modificar rapidamente a disponibilidade de nutrientes. Cardoso, De Souza e De Oliveira (2025) observam que o desempenho superior ou inferior da hidroponia em relação ao cultivo tradicional depende menos da ausência de solo e mais da qualidade do manejo exercido sobre o ambiente radicular.

A correção automática do pH pode ser realizada por dosagem controlada de soluções acidificantes ou alcalinizantes, enquanto a condutividade elétrica orienta a reposição de nutrientes ou a diluição da solução. Silva et al. (2025), ao adaptarem um sistema

hidropônico automatizado às condições climáticas do Amazonas, evidenciam que a frequência de recirculação, a temperatura da água e a oxigenação precisam ser ajustadas ao contexto ambiental. A automação favorece a estabilidade da solução nutritiva, mas não identifica isoladamente quais elementos estão em deficiência ou excesso, razão pela qual pH e condutividade devem ser interpretados em conjunto com a composição da solução, o consumo de água, a fase fenológica e os sintomas apresentados pelas plantas.

A climatização automatizada complementa o manejo hídrico e nutricional ao regular temperatura, umidade relativa, circulação do ar e disponibilidade luminosa no interior das estruturas. De Castilho e De Castro Filho (2025) associam as estufas inteligentes à atuação coordenada de ventiladores, exaustores, nebulizadores, cortinas e sistemas de iluminação, permitindo ajustar o microclima com menor dependência de operações manuais. Em períodos de aquecimento excessivo, a ventilação natural ou forçada pode ser combinada ao resfriamento evaporativo, desde que a elevação da umidade não ultrapasse limites capazes de favorecer condensação e doenças. David et al. (2024), no desenvolvimento de uma miniestufa automatizada, mostram que mesmo estruturas de pequena escala podem integrar controle térmico, umidificação e monitoramento contínuo.

Salgado et al. (2025) ampliam essa lógica ao utilizar Internet das Coisas para transmitir parâmetros ambientais e permitir intervenções remotas, enquanto Ferlin et al. (2026) demonstram que o monitoramento ambiental conectado possibilita acompanhar tendências e não apenas valores instantâneos. A iluminação artificial com lâmpadas LED pode complementar a radiação natural, ampliar

o fotoperíodo ou manter níveis mínimos de luz em ambientes fechados, mas sua programação deve considerar intensidade, duração e efeito térmico. Veiga (2025) insere os sistemas de climatização e iluminação entre as aplicações centrais da Agricultura 4.0, especialmente quando associados a modelos capazes de antecipar alterações ambientais. A atuação simultânea sobre ventilação, nebulização, sombreamento e luz exige lógica de controle integrada, pois o acionamento isolado de um equipamento pode produzir efeitos indesejados sobre outras variáveis, como redução da temperatura acompanhada de aumento excessivo da umidade.

A eficiência agronômica desses sistemas depende, contudo, da qualidade da calibração, da programação e da manutenção, e não apenas do nível de sofisticação tecnológica instalado. Bolignani e De Lucca Filho (2024) observam que a integração de tecnologias de automação enfrenta desafios relacionados à compatibilidade entre equipamentos, custos, capacitação dos usuários e confiabilidade operacional. Do Nascimento e Bálsamo (2024) acrescentam que o fluxo de dados somente sustenta decisões consistentes quando as informações são coletadas com precisão, transmitidas sem interrupções e interpretadas segundo critérios agronômicos. Sensores descalibrados podem subestimar a umidade do substrato e provocar irrigação excessiva, enquanto erros na leitura da condutividade elétrica podem induzir reposições inadequadas de fertilizantes. Falhas em bombas, válvulas ou sistemas de recirculação podem interromper o suprimento hídrico, concentrar sais ou reduzir a oxigenação da solução, produzindo estresse radicular e perda de biomassa. Junior et al. (2025) indicam que a proteção física dos componentes e o acompanhamento do funcionamento são indispensáveis em sistemas expostos à água e às variações

ambientais. Cruz et al. (2023) reforçam que os parâmetros de controle devem ser revisados após a instalação, pois o comportamento do sistema em bancada não reproduz integralmente as condições da estufa. Oliveira et al. (2025) e Silva et al. (2025) mostram que a recirculação da solução nutritiva oferece ganhos de eficiência, mas também pode disseminar desequilíbrios ou problemas fitossanitários quando não há monitoramento adequado.

3.3. Efeitos Sobre Crescimento, Produtividade, Qualidade e Sustentabilidade

Os efeitos do cultivo automatizado sobre o desenvolvimento das hortaliças folhosas resultam, inicialmente, da maior regularidade no fornecimento de água, nutrientes e condições microclimáticas, fatores que interferem diretamente no número de folhas, na altura, no diâmetro da parte aérea, na expansão foliar e na formação do sistema radicular. Junior et al. (2025) demonstram que a irrigação acionada por sensores de umidade pode manter a disponibilidade hídrica em níveis mais estáveis, evitando oscilações capazes de restringir a turgescência e o crescimento das folhas. Guimaraes et al. (2026) e Rossatto (2025) também associam o emprego de controladores e microcontroladores à maior regularidade da irrigação em ambientes protegidos, embora o efeito agrônômico dependa da calibração dos sensores e da definição adequada do tempo de acionamento. Em sistemas hidropônicos, Oliveira et al. (2025) situam o controle da solução nutritiva como elemento decisivo para o acúmulo de massa fresca e seca, uma vez que a planta depende diretamente da composição, da circulação e da oxigenação do meio radicular.

Cardoso, De Souza e De Oliveira (2025) observam que o desenvolvimento das hortaliças em hidroponia não decorre apenas da ausência de solo, mas do domínio exercido sobre água e nutrientes ao longo do ciclo. Silva et al. (2025), ao discutirem um sistema automatizado adaptado às condições climáticas do Amazonas, reforçam que temperatura, umidade e manejo da solução precisam ser ajustados ao contexto ambiental, pois respostas inadequadas podem limitar o crescimento radicular, acelerar a perda de água ou reduzir a absorção mineral. A automação pode, portanto, aumentar a velocidade de crescimento e reduzir interrupções fisiológicas, mas somente quando os parâmetros de controle correspondem às exigências da espécie, da cultivar e da fase de desenvolvimento. A produtividade por unidade de área e a uniformidade do lote dependem da capacidade de reduzir diferenças espaciais e temporais no interior do ambiente protegido. Cruz et al. (2023) mostram que a automação do cultivo de hortaliças exige articulação entre sensores, lógica de programação e atuadores, pois o desempenho produtivo é condicionado pela resposta do sistema às mudanças ambientais.

Salgado et al. (2025) indicam que soluções baseadas em Internet das Coisas permitem acompanhar simultaneamente diferentes parâmetros e realizar intervenções remotas, enquanto Ferlin et al. (2026) destacam a utilidade do monitoramento contínuo para reconhecer tendências que não seriam percebidas em observações pontuais. Essa capacidade de acompanhamento pode favorecer maior sincronização do crescimento, reduzir plantas subdesenvolvidas e tornar a colheita mais previsível. De Castilho e De Castro Filho (2025) relacionam as estufas inteligentes ao controle integrado de temperatura, umidade, luminosidade, irrigação e ventilação, condições que interferem na duração do ciclo e na

padronização das plantas. David et al. (2024), ao desenvolverem uma miniestufa automatizada, evidenciam que estruturas de pequena escala também podem coordenar variáveis ambientais e reduzir a dependência de ajustes manuais. Em hortas com menor grau de tecnificação, Souza (2024) demonstra a possibilidade de empregar soluções de baixo custo no cultivo de alface, salsa e cebolinha, indicando que a uniformidade produtiva não está necessariamente vinculada a equipamentos de elevada complexidade. Entretanto, a estabilidade do ambiente não deve ser confundida com homogeneização absoluta, pois diferenças de radiação, circulação de ar, posição dos sensores e distribuição hidráulica podem produzir variações internas mesmo em sistemas automatizados.

A qualidade das hortaliças folhosas envolve atributos visuais, fisiológicos e composicionais que respondem ao manejo ambiental durante todo o ciclo. O controle hídrico adequado tende a preservar a expansão, a firmeza e a aparência das folhas, enquanto excessos ou déficits podem provocar redução do tamanho, alterações de coloração e perda de valor comercial. Rodrigues e Meurer (2024) mostram que a integração entre irrigação e adubação por controlador lógico programável permite coordenar a disponibilidade de água e nutrientes, aspecto diretamente relacionado à formação de biomassa e à qualidade do tecido vegetal. A regulação da solução nutritiva também pode influenciar o teor de clorofila, a intensidade da coloração e a concentração de compostos bioativos, embora esses efeitos dependam da composição mineral, da intensidade luminosa, da temperatura e do material genético. Veiga (2025) situa sensores ópticos, câmeras e sistemas de visão computacional entre as tecnologias capazes de acompanhar alterações morfológicas e visuais ao longo do desenvolvimento, permitindo estimar área foliar,

uniformidade e sinais de estresse antes que as perdas se tornem evidentes.

Do Nascimento e Bálsamo (2024) destacam que a agricultura digital depende da organização do fluxo de dados, desde a coleta até a interpretação, para que os registros tenham utilidade na decisão agrônômica. O histórico de temperatura, irrigação, luminosidade e condutividade pode, nesse sentido, ser relacionado à qualidade obtida na colheita e ao comportamento posterior das folhas. Condições equilibradas durante o cultivo podem favorecer tecidos mais uniformes e com menor incidência de danos, contribuindo para a conservação pós-colheita, mas níveis excessivos de água, sais ou umidade atmosférica podem aumentar a fragilidade, reduzir a vida útil e comprometer a aparência comercial.

No plano da sustentabilidade, os benefícios da automação precisam ser examinados pela relação entre produtividade obtida e recursos consumidos, e não apenas pelo aumento do rendimento físico. Junior et al. (2025) associam a irrigação automatizada à redução do desperdício hídrico e da necessidade de intervenção diária, enquanto Rodrigues e Meurer (2024) mostram que o controle conjunto da irrigação e da adubação pode diminuir aplicações desnecessárias e melhorar a precisão operacional. Oliveira et al. (2025) apontam que a recirculação da solução nutritiva constitui uma das vantagens dos sistemas hidropônicos, embora exija acompanhamento para evitar concentração de sais, desequilíbrios e problemas de oxigenação. Veiga (2025) relaciona automação e robótica à redução de tarefas repetitivas, mas também à elevação da dependência de energia, conectividade e manutenção especializada. Bolignani e De Lucca Filho (2024) ressaltam que a integração tecnológica enfrenta limitações ligadas ao investimento,

à compatibilidade entre dispositivos, à capacitação dos operadores e à continuidade operacional. De Castilho e De Castro Filho (2025) acrescentam que estufas inteligentes podem otimizar água e energia, porém seu desempenho depende da adequação dos equipamentos ao sistema produtivo.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise desenvolvida permitiu compreender que o cultivo protegido associado à automação agrícola constitui uma estratégia tecnológica capaz de influenciar positivamente o crescimento, a produtividade e a qualidade das hortaliças folhosas. A redução da exposição às variações climáticas, aliada ao monitoramento contínuo das condições ambientais, favorece maior estabilidade produtiva e possibilita ajustar o manejo às exigências fisiológicas das plantas. O controle integrado da temperatura, umidade, luminosidade, irrigação e solução nutritiva contribui para o uso mais eficiente de água e fertilizantes, redução de perdas, maior uniformidade dos lotes e melhoria dos atributos comerciais e nutricionais das folhas. Entretanto, os benefícios observados não decorrem exclusivamente da adoção tecnológica, mas da interação entre equipamentos, conhecimento agrônomo e capacidade de manejo, exigindo calibração adequada dos sensores, definição precisa dos parâmetros operacionais, manutenção dos sistemas e capacitação dos usuários.

Apesar das potencialidades identificadas, a adoção de sistemas automatizados permanece condicionada a fatores econômicos, operacionais e estruturais, como custos de implantação, consumo energético, disponibilidade de infraestrutura, conectividade e riscos associados às falhas técnicas. Dessa forma, estudos futuros devem

ampliar a avaliação desses sistemas considerando indicadores agronômicos, econômicos e ambientais, comparando diferentes níveis de tecnificação e escalas produtivas. Também se destacam como perspectivas de investigação a aplicação de inteligência artificial, visão computacional, energias renováveis e sensores de baixo custo, especialmente no desenvolvimento de soluções acessíveis para pequenos e médios produtores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, Emily; SANTOS, João Vitor; VITERBO, Christian. DESEMPENHO DE GENÓTIPOS DE ALFACEBABY LEAF SUBMETIDOS A SOLUÇÕES NUTRITIVAS EM CULTIVO PROTEGIDO (AGRONOMIA). **Repositório Institucional**, v. 1, n. 1, 2023.

AMORIM, Frederico Costa. Caracterização agronômica de linhagens de alface lisa e mimosa em cultivo convencional e hidropônico. 2024.

BARREIRAS, Vinicius Reis. O desperdício de alimentos no Brasil e possíveis soluções. 2023.

BATISTA, Claynne Cristina de Melo et al. Avaliação de cultivares de alface crespa sob diferentes ambientes de cultivo, em sistema de produção orgânica no Vale do Açu-RN. 2023.

BIAFORA, Murilo Rabelo. BIOFORTIFICAÇÃO AGRONÔMICA DE HORTALIÇAS FOLHOSAS: CENÁRIOS ATUAIS E POTENCIALIDADES. 2025.

BOLIGNANI, Erick Aparecido; DE LUCCA FILHO, João. INTEGRAÇÃO DE TECNOLOGIAS DE AUTOMAÇÃO NA AGRICULTURA: desafios e

oportunidades. **Revista Interface Tecnológica**, v. 21, n. 1, p. 150-159, 2024.

CARDOSO, Ana Paula Noletto; DE SOUZA, Elaine Costa; DE OLIVEIRA, Rosângela Ap Pereira. O desenvolvimento de hortaliças em cultivo hidropônico comparado ao cultivo tradicional. **Revista Novos Desafios**, v. 5, n. 1, p. 42-51, 2025.

COSTA, Mariana Caroline Veiga. Influência de telas de sombreamento no desenvolvimento e produção de hortaliças folhosas: estudo exploratório. 2023.

COVOLAN, Almir Rogério; FERREIRA, Tatiane Cristovam; GOMES, Edilson Ramos. INFLUÊNCIA DO AMBIENTE PROTEGIDO NO CULTIVO DA ALFACE EM ADUBAÇÃO ORGÂNICA E CONVENCIONAL. **ENERGIA NA AGRICULTURA**, v. 37, n. 1, p. 76-84, 2022.

CRUZ, Carlos Henrique Santana da et al. Desenvolvimento de projeto para automação do cultivo de hortaliças. 2023.

DA SILVA BORGES, Luciana et al. Agronegócio das hortaliças, seus desafios e tendências no Estado Pará. **Ciências Agrárias: o avanço da ciência no Brasil**, v. 4, p. 393-411, 2022.

DA SILVA GOMES, Lia Mara; PRINS, Cláudia Lopes. PERFIL METABÓLICO DE MUDAS DE ALFACE EM FUNÇÃO DA VARIAÇÃO SAZONAL EM AMBIENTE PROTEGIDO EM REGIÃO DE CLIMA TROPICAL. **ARACÊ**, v. 7, n. 8, p. e7277-e7277, 2025.

DA SILVA, Wilton Batista et al. Proposta de um sistema de automação de baixo custo para irrigação. **OBSERVATÓRIO DE LA ECONOMÍA LATINOAMERICANA**, v. 21, n. 6, p. 5454-5469, 2023.

DANTAS, Leticia Livia Bevenuto. Produção de rabanete semeado em bandejas com posterior transplântio no Vale do Açu: um estudo de caso. 2023.

DAROSCI, Adriano Antonio Brito et al. Pesquisa e Extensão no IF Goiano-Campus Posse: primeiros passos. 2022.

DAVID, David Donizeti Araújo et al. Hortatec: desenvolvimento de mini estufa automatizada para o cultivo sustentável de morangos. 2024.

DE CASTILHO, Marco Antonio; DE CASTRO FILHO, Carlos Pereira. AUTOMAÇÃO EM ESTUFAS INTELIGENTES: O Futuro da Agricultura. **Revista Interface Tecnológica**, v. 22, n. 1, p. 37-45, 2025.

DO NASCIMENTO, Danilo Carvalho; BÁLSAMO, Rayane. Agricultura digital e fluxo de dados no desenvolvimento sustentável do agronegócio (agronomia). **Repositório Institucional**, v. 2, n. 2, 2024.

DOS SANTOS, Nielva Juliana Cezar; JUNIOR, Raimundo Nonato Gomes. Produção de alface sob efeito da aplicação da urina de vaca em ambiente protegido. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 19, n. 2, p. 122-127, 2024.

FERLIN, Emília et al. Monitoramento Ambiental de Hortaliças Utilizando Tecnologias IoT. **Anais do Computer on the Beach**, v. 17, p. 686-688, 2026.

FERREIRA, Luiz Leonardo et al. AMBIENTE, CULTIVAR E MANEJO DE REGULADOR: EFEITOS MULTIVARIADOS NA PRODUÇÃO DA ALFACE. **Anais da Semana Universitária e Encontro de Iniciação Científica (ISSN: 2316-8226)**, v. 1, n. 1, 2025.

FONSECA, William Machado. Sistema IoT para hidroponia: monitoramento e controle de condutividade elétrica. 2025.

FRASSON, Alexandre Ribeiro. Potencialidades e limitações da implementação de um projeto STEAM com horta hidropônica em uma escola pública. 2024.

GUEDES, IMR et al. Cultivo protegido de hortaliças em solo e em substrato. 2024.

GUIMARAES, Fabio Luís Alvarenga et al. IRRIGAÇÃO AUTOMÁTICA EM ABRIGO. **Área Engenharias e Exatas-4º Seminário de Ensino e Extensão**, n. 01, 2026.

JÚNIOR, F.; GUEDES, Ítalo Moraes Rocha; BRAGA, M. Implantação de cultivo protegido para produção de hortaliças. 2024.

JUNIOR, João Roberto Cordioli et al. AUTOMAÇÃO COM SISTEMA ARDUÍNO PARA ASPERSÃO HÍDRICA EM HORTALIÇAS: UMA EXPERIÊNCIA INTERDISCIPLINAR. **Revista InterAgro**, v. 3, n. 1, p. 47-52, 2025.

LEAL, Eduardo Ribeiro Pereira et al. **Desenvolvimento de manejo de alface em hidroponia por rede neural artificial convolucional**. 2024. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

LIMA, Renata Priore Lima Priore; GUNDIM, Lady Laura Soares. FAZENDA VERTICAL COMO MODELO SUSTENTÁVEL DE AGRICULTURA URBANA. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 12, n. 1, p. e18784-e18784, 2023.

MACHADO, Túlio de Almeida; SILVA, Rodrigo Vieira da; MEGGUER, Clarice Aparecida. OLERICULTURA: UMA HISTÓRIA DOS 10 ANOS DO PRIMEIRO PROGRAMA Stricto Sensu PROFISSIONAL DO INSTITUTO FEDERAL GOIANO. 2025.

MARTINS, Thyago Sebinelli. **Potencial Técnico para o Uso de Plásticos na Agricultura 4.0 e em Eco Parques Agroindustriais (EPA).** [sn], 2023.

MASCARENHAS, Nágela Maria Henrique. Microclima na produção de alface em ambiente protegido com diferentes telas de sombreamento: uma revisão. **Revista Ambientale**, v. 14, n. 4, p. 9-18, 2022.

OLIVEIRA, Erasto Gonçalves de. **Uso de Macrófita como alternativa de adubação orgânica na cultura da alface.** 2023. Tese de Doutorado.

OLIVEIRA, Ricardo Daher et al. PRODUÇÃO HIDROPÔNICA, A NOVA FRONTEIRA DO DESENVOLVIMENTO NO SETOR AGRÍCOLA. **LUMEN ET VIRTUS**, v. 16, n. 50, p. 9365-9382, 2025.

PETRUCCI, Vitória Prates. Marcha de absorção de nutrientes no milho granífero em cultivo hidropônico. 2025.

REIS, Rayllon Rodrigues Sousa et al. **Uso da internet das coisas no monitoramento da alface hidropônica em ambiente controlado.** 2024. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

RODRIGUES, Igor Gustavo; MEURER, Sabrina. **Automatização de irrigação e adubação de estufa agrícola com controlador lógico**

programável: cultivo sustentável e eficiente. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

ROSSATTO, Maicon Mazzonetto. Sistema de irrigação para estufas hortícolas usando microcontroladores. 2025.

SALGADO, José Francisco Resende et al. SOLUÇÃO IoT PARA MONITORAMENTO E CONTROLE DE PARÂMETROS AMBIENTAIS DO CULTIVO SUSTENTÁVEL EM RESIDÊNCIAS. 2025.

SANTOS, Jailma da Silva et al. APLICAÇÃO DE LUZ ARTIFICIAL E SUPLEMENTAR E SUA RELAÇÃO COM A PRODUTIVIDADE VEGETAL: REVISÃO DE LITERATURA. 2024.

SANTOS, Nielba Juliana Cézar dos et al. Efeito da urina de vaca no crescimento e produção de variedades de alface em cultivo protegido. 2022.

SILVA, Alex Santana da et al. Sistema automatizado para hidroponia sustentável: uma abordagem aplicada ao clima do Amazonas. 2025.

SOUZA, Karoline Santos de. Horta inteligente de baixo custo para plantio de alface, salsa e cebolinha. 2024.

VEIGA, Weslen de Oliveira da. Tendências e aplicações na automação e robótica na agricultura 4.0: uma revisão. 2025.

WILKINSON, John. **O Mundo dos Alimentos em Transformação-Finalista Prêmio Jabuti Acadêmico 2024.** Editora Appris, 2023.

ZACARIAS, Maria Evanira Araújo Silva et al. Desempenho de cultivares de alface crespa, em ambiente protegido e a céu aberto,

em sistema de produção agroecológica, no período chuvoso. 2023.

¹ Discente do Mestrado Profissional em Educação Profissional e Tecnológica (ProfEPT) no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia (IFRO), Campus Porto Velho Calama. Graduado em Gestão Pública e licenciado em Letras – Língua Portuguesa. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#).

² Graduada em Administração de Empresas. Pós-graduada (MBA) em Licitações e Contratos pelo Instituto de Ensino Polis Civitas. Servidora efetiva no cargo de Assistente de Alunos do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia (IFRO), Campus Porto Velho Calama. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

³ Discente do 3º ano do Curso Técnico em Informática Integrado ao Ensino Médio no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia (IFRO), Campus Porto Velho Calama. Pesquisadora bolsista em projeto de pesquisa. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#).

⁴ Discente do 3º ano do Curso Técnico em Informática Integrado ao Ensino Médio no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia (IFRO), Campus Porto Velho Calama. Pesquisadora bolsista em projeto de pesquisa. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#).

⁵ Discente do 3º ano do Curso Técnico em Informática Integrado ao Ensino Médio no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia (IFRO), Campus Porto Velho Calama. Pesquisadora

colaboradora em projeto de pesquisa. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail.](#)

⁶ Docente do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia (IFRO), Campus Porto Velho Calama. Doutora em Educação Escolar pela Universidade Federal de Rondônia (UNIR) e mestra em Educação Agrícola pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ). E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail.](#)