Revista Agro@mbiente On-line, v. 20, e8956, 2026
Centro de Ciências Agrárias - Universidade Federal de Roraima, Boa Vista, RR
https://revista.ufrr.br/agroambiente
http://dx.doi.org/10.18227/1982-8470ragro.v20i00.8956

Thematic Review Article
ISSN 1982-8470

Lettuce Production in Hydroponic and Soil Systems: Productive Efficiency, Plant Growth and Sustainability in Different Cultivation Systems

Produção de alface em hidroponia e solo: eficiência produtiva, crescimento vegetal e sustentabilidade em diferentes sistemas de cultivo

Debora Nathalia Camargo Amorim[1]*; Amadeu Cerezini de Souza Junior[1]; Silvana Fraga da Silva[2]

Abstract: Lettuce (*Lactuca sativa* L.) is among the leafy vegetables of greatest economic and nutritional importance, being cultivated in soil-based and soilless systems under varying levels of environmental control, and environments with varying levels of technological control. This study aimed to analyze and synthesize scientific evidence regarding differences in the agronomic performance of lettuce grown in hydroponic and soil-based cultivation systems, with emphasis on productivity, plant growth, and resource-use efficiency. This work consists of a narrative literature review conducted through a structured bibliographic search guided by an adaptation of the PICO strategy (Population, Intervention, Comparison, and Outcome) and supported by previously defined criteria for the search, selection, and qualitative synthesis of studies. The literature search was carried out in the CABI, Scopus, Web of Science, and SciELO databases, considering articles published and indexed from 2022 to April 2026, including publications made available in an online-first format up to the conclusion of the search phase. The studies analyzed demonstrate that lettuce performance varies according to the cultivation system, nutrient management, water availability, environmental conditions, and the level of environmental control in the production system. In general, hydroponics was associated with greater efficiency in water and nutrient use, whereas soil-based cultivation showed performance dependent on soil properties and the management practices adopted. The results indicate that both systems have agronomic potential, although each presents specific advantages and limitations. Therefore, the choice between them should consider production objectives, associated costs, available technological resources, and local growing conditions.

Key words: Agronomic performance. Water-use efficiency. Horticulture. Nutrient management. Production systems.

Resumo: A alface (*Lactuca sativa* L.) destaca-se entre as hortaliças folhosas de maior importância econômica e alimentar, sendo cultivada em solo ou em sistemas sem solo, como a hidroponia, sob diferentes níveis de controle ambienta. Neste estudo, objetivou-se analisar e sintetizar evidências científicas sobre diferenças no desempenho agronômico da alface cultivada em sistemas hidropônicos e em solo, com ênfase na produtividade, no crescimento vegetal e na eficiência no uso de recursos. Trata-se de uma revisão narrativa da literatura, conduzida por meio de busca bibliográfica estruturada, orientada por adaptação da estratégia PICO (População, Intervenção, Comparação e Desfecho) e apoiada em critérios previamente definidos para a busca, seleção e síntese qualitativa dos estudos. A pesquisa bibliográfica foi realizada nas bases CABI, Scopus, Web of Science e SciELO, considerando artigos publicados e indexados de 2022 até abril de 2026, incluindo publicações disponibilizadas em modalidade online first até o encerramento da etapa de busca. Os estudos analisados evidenciaram que o desempenho da alface varia conforme o sistema de cultivo, o manejo nutricional, a disponibilidade hídrica, as condições ambientais e o nível de controle do ambiente de cultivo. De modo geral, a hidroponia foi associada a maior eficiência no uso de água e nutrientes, enquanto o cultivo em solo apresentou desempenho condicionado às propriedades edáficas e às práticas de manejo adotadas. Os resultados indicam que ambos os sistemas apresentam potencial agronômico, embora possuam vantagens e limitações específicas, de modo que a escolha entre eles deve considerar os objetivos da produção, os custos envolvidos, o nível tecnológico disponível e as condições locais de cultivo.

Palavras-chave: Desempenho agronômico. Eficiência hídrica. Horticultura. Manejo nutricional. Sistemas de produção.

*Corresponding author

[1]Centro Universitário Aparício Carvalho - FIMCA, Departamento/Curso de Agronomia. Rua das Araras, n. 241, Bairro Eldorado, Porto Velho, RO, CEP: 76811-678, Brasil. E-mails: deboranathaliaamorim@gmail.com; juniorczn22@gmail.com;

[2]Universidade Federal do Ceará - UFC. E-mail: silvana.fraga2021@gmail.com.

Received 26.04.2026 Approved 02.05.2026 Published 14.11.2026
Editora: Sandra Catia Pereira Uchoa

INTRODUCTION

Lettuce (*Lactuca sativa* L.) is one of the most important leafy vegetables in terms of food consumption and economic value due to its short production cycle, broad market acceptance, and high consumption frequency. At the international level, the crop is included in the "lettuce and chicory" group monitored by the Food and Agriculture Organization of the United Nations statistics database (FAOSTAT), while sectoral surveys in Brazil indicate that lettuce is the most consumed leafy vegetable, with estimated production exceeding 1.5 million tons annually and generating approximately R$ 8 billion in retail sales (ABCSEM, 2015; FAOSTAT, 2025). Lettuce is cultivated under different production systems, including conventional soil cultivation, protected cultivation systems, and soilless systems, particularly hydroponics (SHATILOV *et al*., 2019; AHMED *et al*., 2021; LEBEDA *et al*., 2025; TADEVOSYAN *et al*., 2025). For historical and conceptual contextualization, references published prior to the structured search period were included, although these studies were not necessarily part of the final group of articles synthesized in the review.

The differences between hydroponic and soil-based cultivation involve key agronomic aspects such as plant growth, yield, nutrient uptake, water-use efficiency, and plant responses to environmental conditions. In hydroponic systems, the continuous and balanced supply of nutrient solution generally promotes greater growth uniformity, shorter production cycles, and improved control of nutritional and phytosanitary variables (AL MESELMANI, 2022; FATHIDAREHNIJEH *et al*., 2024; WANG *et al*., 2023). Conversely, soil cultivation remains widely adopted because of its lower initial cost, greater operational simplicity, and broad applicability across different production scales, although its performance depends on soil conditions, water availability, and management practices (FARIAS *et al*., 2017; GIRARDELLO *et al*., 2017; ZHA *et al*., 2024).

Recent literature presents divergent findings regarding productivity, growth performance, and resource-use efficiency between the two systems. Under controlled conditions, several studies associate hydroponics with higher yields, greater uniformity, and more efficient use of water and nutrients (WANG *et al*., 2023; GOH *et al*., 2023; KARIMZADEH *et al*., 2025). However, under commercial-scale conditions or in systems with lower technological inputs, soil cultivation may achieve competitive or even superior performance, particularly when limitations exist in nutrient-solution management, planting density, temperature regulation, and root-zone oxygenation (GUMISIRIZA *et al*., 2023; ZHA *et al*., 2024).

INTRODUÇÃO

A alface (*Lactuca sativa* L.) é uma das hortaliças folhosas de maior relevância alimentar e econômica, em razão do ciclo curto, da ampla aceitação comercial e da elevada frequência de consumo. Em escala internacional, a cultura integra o grupo "lettuce and chicory" monitorado pela FAOSTAT, enquanto no Brasil levantamentos setoriais indicam a alface como a folhosa mais consumida, com estimativas superiores a 1,5 milhão de toneladas anuais e movimentação aproximada de R$ 8 bilhões no varejo (ABCSEM, 2015; FAOSTAT, 2025). O cultivo ocorre em diferentes sistemas de produção, incluindo o convencional em solo, sistemas protegidos e sistemas sem solo, especialmente a hidroponia (SHATILOV *et al*., 2019; AHMED *et al*., 2021; LEBEDA *et al*., 2025; TADEVOSYAN *et al*., 2025). Para fins de contextualização histórica e conceitual, foram utilizadas referências anteriores ao recorte temporal da busca estruturada, sem que esses estudos compusessem obrigatoriamente o conjunto de artigos incluídos na síntese principal.

As diferenças entre hidroponia e cultivo em solo envolvem aspectos agronômicos centrais, como crescimento vegetal, produtividade, absorção de nutrientes, eficiência no uso da água e resposta das plantas às condições ambientais. Em sistemas hidropônicos, a oferta contínua e balanceada da solução nutritiva tende a favorecer maior uniformidade do crescimento, encurtamento do ciclo produtivo e melhor controle de variáveis nutricionais e fitossanitárias (AL MESELMANI, 2022; FATHIDAREHNIJEH *et al*., 2024; WANG *et al*., 2023). Em contrapartida, o cultivo em solo permanece amplamente adotado por apresentar menor custo inicial, maior simplicidade operacional e ampla aplicabilidade em diferentes escalas de produção, embora seu desempenho dependa das condições edáficas, da disponibilidade hídrica e do manejo adotado (FARIAS *et al*., 2017; GIRARDELLO *et al*., 2017; ZHA *et al*., 2024).

A literatura recente apresenta divergências sobre produtividade, crescimento e eficiência de uso de recursos entre os sistemas. Em condições controladas, parte dos estudos associa a hidroponia a maiores rendimentos, maior uniformidade e melhor uso da água e dos nutrientes (WANG *et al*., 2023; GOH *et al*., 2023; KARIMZADEH *et al*., 2025). Em escala comercial ou em sistemas de menor tecnificação, entretanto, o cultivo em solo pode alcançar desempenho competitivo ou superior, especialmente quando há limitações no controle da solução nutritiva, da densidade de plantio, da temperatura e da oxigenação radicular (GUMISIRIZA *et al*., 2023; ZHA *et al*., 2024).

In addition to differences in productivity, the two cultivation systems differ in leaf quality, nitrate accumulation, root architecture, operational costs, and energy requirements. This variability complicates the formulation of generalized conclusions regarding the absolute superiority of either cultivation model and highlights the need for a critical synthesis that distinguishes experimental evidence, commercial studies, reviews, and modeling approaches (GARTMANN *et al*., 2023; CASAMAYOR *et al*., 2024; MOHMED *et al*., 2025).

The relevance of this discussion is further amplified by increasing water scarcity, rising input costs, and the demand for more efficient and sustainable production systems, especially in tropical regions and horticultural supply chains that are highly dependent on the interaction between management practices, cultivation environments, and local soil and climatic constraints (CRUZ *et al*., 2026).

Given this scenario, the following research question was formulated: *What are the differences in the agronomic performance of lettuce cultivated in hydroponic and soil-based systems, with emphasis on productivity and plant growth?*

Therefore, the objective of this study was to analyze and synthesize scientific evidence regarding differences in the agronomic performance of lettuce cultivated in hydroponic systems compared with soil cultivation, considering productivity, plant growth, water- and nutrient-use efficiency, leaf quality, and sustainability-related aspects.

MATERIALS AND METHODS

This study consists of a narrative review with a systematized approach, developed through explicit criteria for literature searching, selection, and qualitative synthesis of studies. The methodological framework adopted systematized procedures to enhance transparency and reproducibility without characterizing the review as a formal systematic review or meta-analysis. Thus, the structure of identification, screening, eligibility, and inclusion was employed as an organizational framework for the literature search rather than as a full application of the PRISMA checklist.

Além das divergências produtivas, há diferenças relacionadas à qualidade das folhas, ao acúmulo de nitratos, à arquitetura radicular, aos custos operacionais e à demanda energética de cada sistema. Essa variabilidade dificulta a generalização de conclusões sobre superioridade absoluta de um modelo de cultivo e reforça a necessidade de uma síntese crítica que diferencie evidências experimentais, estudos comerciais, revisões e modelagens (GARTMANN *et al*., 2023; CASAMAYOR *et al*., 2024; MOHMED *et al*., 2025).

A relevância dessa discussão se amplia diante da restrição hídrica, do aumento dos custos de insumos e da busca por sistemas produtivos mais eficientes e sustentáveis, especialmente em regiões tropicais e em cadeias hortícolas fortemente dependentes da interação entre manejo, ambiente de cultivo e limitações edafoclimáticas locais (CRUZ *et al*., 2026).

Diante desse cenário, formula-se a seguinte pergunta de pesquisa: *quais são as diferenças no desempenho agronômico da alface cultivada em sistemas hidropônicos e em solo, com ênfase na produtividade e no crescimento vegetal?*

Assim, o presente estudo tem como objetivo analisar e sintetizar evidências científicas acerca das diferenças no desempenho agronômico da alface cultivada em sistema hidropônico em comparação ao cultivo em solo, considerando produtividade, crescimento vegetal, eficiência no uso de água e nutrientes, qualidade das folhas e aspectos de sustentabilidade.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo consiste em uma revisão narrativa com abordagem sistematizada, elaborada por meio de critérios explícitos de busca, seleção e síntese qualitativa dos estudos. A organização metodológica adotou procedimentos sistematizados para aumentar a transparência e a reprodutibilidade da revisão, sem caracterizá-la como revisão sistemática formal ou meta-análise. Dessa forma, a estrutura de identificação, triagem, elegibilidade e inclusão foi utilizada como recurso organizacional da busca bibliográfica, e não como aplicação integral do checklist PRISMA.

The research question was structured using the PICO strategy. The population (P) corresponded to lettuce (*Lactuca sativa* L.) cultivation under different production systems; the intervention (I) was defined as hydroponic cultivation; the comparison (C) involved conventional soil cultivation; and the outcomes (O) analyzed included productivity, plant growth, leaf quality, water- and nutrient-use efficiency, incidence of phytosanitary problems, and environmental sustainability aspects (HOSSEINI *et al*., 2024).

The literature search was conducted between December 2, 2025, and April 15, 2026, using the databases CABI, Scopus, Web of Science, and SciELO. The temporal scope included articles published and indexed between 2022 and April 15, 2026, including articles available as ahead-of-print publications up to the final search date.

The CABI database was selected because of its relevance to Agronomy and Agricultural Sciences. In this database, free descriptors combined with Boolean operators were used in the *All Fields* search option according to the following search strategy: *(lactuca sativa OR lettuce OR alface) AND ((hydroponic OR "soilless culture" OR hidroponia) NEAR (soil OR "soil cultivation" OR "cultivo em solo")) AND (yield OR productiv* OR growth OR crescimento OR rendimento OR produtividade).**

Scopus, Web of Science, and SciELO were used as complementary sources because of their multidisciplinary nature and broad coverage of scientific literature. In each database, the syntax was adapted to the specific search tools available while maintaining the same descriptor-combination logic.

In Scopus, the following search expression was used:

TITLE-ABS-KEY((lactuca sativa OR lettuce OR alface) AND ((hydroponic* OR "soilless culture" OR hidroponia) W/5 (soil OR "soil cultivation" OR "cultivo em solo")) AND (yield* OR productiv* OR growth OR crescimento OR rendimento OR produtividade)).

Para a estruturação da questão de pesquisa, adotou-se a estratégia PICO: a população (P) correspondeu ao cultivo de alface (*Lactuca sativa* L.) em diferentes sistemas produtivos; a intervenção (I) foi definida como o cultivo em hidroponia; a comparação (C) envolveu o cultivo convencional em solo; e os desfechos (O) analisados incluíram produtividade, crescimento vegetal, qualidade das folhas, eficiência no uso da água e dos nutrientes, incidência de problemas fitossanitários e aspectos de sustentabilidade ambiental (HOSSEINI *et al*., 2024).

A busca bibliográfica foi realizada operacionalmente entre 02 de dezembro de 2025 e 15 de abril de 2026, nas bases CABI, Scopus, Web of Science e SciELO. O recorte temporal considerou artigos publicados e indexados entre 2022 e 15 de abril de 2026, incluindo artigos disponíveis em publicação antecipada (ahead of print) até a data final da busca.

A base CABI foi selecionada por sua relevância para Agronomia e Ciências Agrárias. Nessa base, foram empregados descritores livres combinados por operadores booleanos no campo All Fields, utilizando-se a seguinte estratégia de busca: (*lactuca sativa* OR *lettuce* OR alface) AND ((hydroponic OR "soilless culture" OR hidroponia) NEAR (soil OR "soil cultivation" OR "cultivo em solo")) AND (yield OR productiv* OR growth OR crescimento OR rendimento OR produtividade).

As bases Scopus, Web of Science e SciELO foram utilizadas como fontes complementares, em razão de seu caráter multidisciplinar e de sua ampla cobertura da literatura científica. Em cada base, a sintaxe foi adaptada às ferramentas próprias da plataforma, mantendo-se a mesma lógica de combinação dos descritores.

Na Scopus, foi utilizada a seguinte expressão de busca:

TITLE-ABS-KEY((lactuca sativa OR lettuce OR alface) AND ((hydroponic* OR "soilless culture" OR hidroponia) W/5 (soil OR "soil cultivation" OR "cultivo em solo")) AND (yield* OR productiv* OR growth OR crescimento OR rendimento OR produtividade)).

In Web of Science, the search expression was:

TS=((lactuca sativa OR lettuce OR alface) AND ((hydroponic OR "soilless culture" OR hidroponia) NEAR/5 (soil OR "soil cultivation" OR "cultivo em solo")) AND (yield* OR productiv* OR growth OR crescimento OR rendimento OR produtividade)).*

In SciELO, the search expression was:

(lactuca sativa OR lettuce OR alface) AND ((hydroponic OR "soilless culture" OR hidroponia) AND (soil OR "soil cultivation" OR "cultivo em solo")) AND (yield* OR productiv* OR growth OR crescimento OR rendimento OR produtividade).**

The inclusion criteria were: (i) full-text articles published in Portuguese, English, or Spanish; (ii) articles published and indexed between 2022 and April 15, 2026; (iii) studies directly comparing hydroponic and soil cultivation or providing agronomically relevant evidence for comparative interpretation of the systems; and (iv) studies addressing variables related to productivity, growth, quality, water use, nutrient use, energy consumption, or sustainability.

The exclusion criteria included duplicate studies, articles without access to the full text, publications outside the defined time frame of the primary search, studies lacking direct comparison or applicability to leafy vegetable performance, and materials without a minimum description of experimental design, cultivation conditions, or evaluated variables.

Study selection was conducted by a single reviewer, followed by a critical assessment of the final set of included studies. In cases of uncertainty, studies were retained for full-text evaluation to avoid premature exclusion. The qualitative assessment considered relevance to the research topic, clarity of the experimental design, description of experimental or commercial conditions, suitability of the evaluated variables, and consistency between results and conclusions.

A formal risk-of-bias assessment tool was not applied because this review was narrative in nature with a systematized approach. Nevertheless, the studies were critically classified according to the type of evidence provided, Distinguishing controlled experiments, commercial studies, review articles, meta-analyses, and modeling studies. The information was organized using Rayyan (OUZZANI *et al*., 2016), enabling the identification of patterns, advantages, and limitations associated with each production system.

Na Web of Science, as expreções pesquisadas foram:

TS=((lactuca sativa OR lettuce OR alface) AND ((hydroponic* OR "soilless culture" OR hidroponia) NEAR/5 (soil OR "soil cultivation" OR "cultivo em solo")) AND (yield* OR productiv* OR growth OR crescimento OR rendimento OR produtividade)).

Na Scielo, as expressões pesquisadas foram:

(lactuca sativa OR lettuce OR alface) AND ((hydroponic* OR "soilless culture" OR hidroponia) AND (soil OR "soil cultivation" OR "cultivo em solo")) AND (yield* OR productiv* OR growth OR crescimento OR rendimento OR produtividade).

Os critérios de inclusão foram: artigos completos publicados em português, inglês ou espanhol; artigos publicados e indexados entre 2022 e 15 de abril de 2026; estudos que abordassem diretamente a comparação entre hidroponia e cultivo em solo, ou que apresentassem evidências agronômicas relevantes para interpretação comparativa dos sistemas; e trabalhos com variáveis relacionadas à produtividade, crescimento, qualidade, uso de água, uso de nutrientes, energia ou sustentabilidade.

Foram excluídos estudos duplicados, trabalhos sem acesso ao texto completo, publicações fora do recorte temporal da busca principal, estudos sem comparação direta ou sem aplicabilidade ao desempenho de hortaliças folhosas, além de materiais sem descrição mínima de delineamento, condições de cultivo ou variáveis avaliadas.

A seleção foi conduzida por um revisor, com conferência crítica posterior do conjunto final de estudos incluídos. Nos casos de dúvida, o estudo foi mantido para leitura completa, evitando exclusões prematuras. A avaliação qualitativa considerou aderência ao tema, clareza do delineamento, descrição das condições experimentais ou comerciais, pertinência das variáveis avaliadas e coerência entre resultados e conclusões.

Não foi aplicado instrumento formal de risco de viés, por se tratar de revisão narrativa com abordagem sistematizada; entretanto, os estudos foram classificados criticamente quanto ao tipo de evidência, distinguindo experimentos controlados, estudos comerciais, revisões, meta-análises e modelagens. As informações foram organizadas no Rayyan (OUZZANI *et al*., 2016), permitindo identificar padrões, vantagens e limitações de cada sistema.

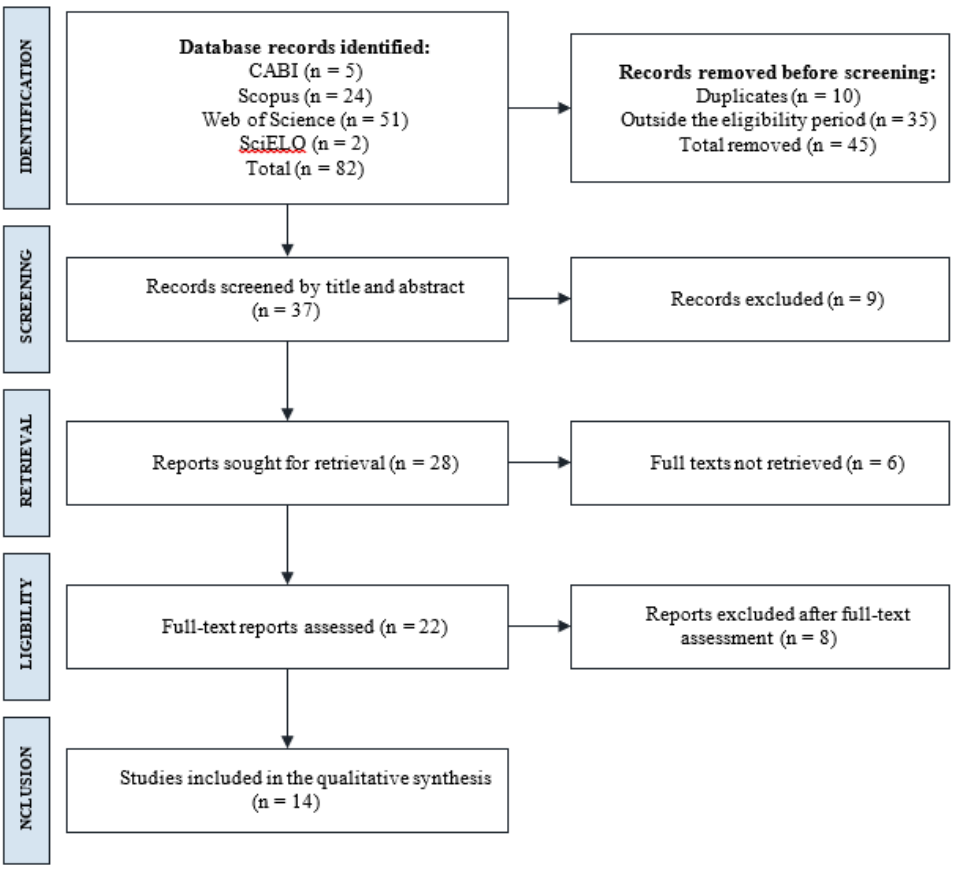

Figure 1 - Flowchart of the literature search and study selection process for the narrative review conducted using a systematized approach

Figura 1 - Fluxograma da busca bibliográfica e seleção dos estudos incluídos na revisão narrativa com abordagem sistematizada

RESULTS

Table 1 presents a synthesis of the principal studies analyzed, organized according to system type, experimental design, evaluated variables, quantitative or qualitative results, and main conclusions. Because the included studies exhibited heterogeneous methodological designs, the interpretation of the findings considered the relative weight of each type of evidence, distinguishing among controlled experiments, commercial-scale studies, reviews, meta-analyses, and modeling approaches.

This organization prevents methodologically distinct forms of evidence from being treated as equivalent and allows for an objective assessment that hydroponic systems generally demonstrate greater water-use efficiency and productivity when adequate system control is maintained. However, their overall feasibility depends on factors such as energy costs, technological requirements, and management practices.

RESULTADOS

A Tabela 1 apresenta uma síntese dos principais estudos analisados, organizada por tipo de sistema, delineamento, variáveis avaliadas, resultados quantitativos ou qualitativos e conclusão principal. Como os estudos incluídos apresentam delineamentos heterogêneos, a interpretação dos resultados considerou o peso relativo de cada tipo de evidência, distinguindo experimentos controlados, estudos comerciais, revisões, meta-análises e modelagens.

Essa organização evita tratar evidências metodologicamente distintas como equivalentes e permite visualizar, de forma objetiva, que a hidroponia tende a apresentar maior eficiência hídrica e produtiva quando há controle adequado do sistema, embora sua viabilidade dependa do custo energético, do nível tecnológico e do manejo adotado.

Table 1 - Synthesis of studies on hydroponic and soil-based cultivation systems, emphasizing lettuce agronomic performance and complementary aspects of production systems

Tabela 1 - Síntese de estudos sobre sistemas de cultivo hidropônico e em solo, com ênfase no desempenho agronômico da alface e em aspectos complementares dos sistemas de produção

Author/ Year	Country/ Region	System evaluated	Study context	Outcomes	Main findings/ synthesis	Overall interpretation
Casamayor *et al.* (2024)	Spain	Human-powered hydroponics	Environmental and economic assessment	Energy, cost, environmental impacts	Manually powered systems reduce reliance on electricity	Feasibility depends on the energy source
Gartmann *et al.* (2023)	Switzerland	Bioponics, hydroponics, and soil	Closed-loop production	Yield, quality, nitrate	Higher yield in hydroponics; lower nitrate in bioponics	Alternative systems involve yield–quality trade-offs
Gebreegziher (2023)	Global	Soilless vs. soil cultivation	Review focused on drylands	Water, land, yield	Up to 95% lower water use reported for selected systems	Potential in water-scarce regions
Goh *et al.* (2023)	Global	Hydroponics and other systems	Meta-analysis	Crop yield	Higher yields in controlled environments	Outcomes depend on production conditions
Góis *et al.* (2024)	Brazil	Hydroponic systems	Different nutrient solutions	Growth, yield	Performance varies with nutrient concentration	Nutrient management is a key factor
Gumisiriza *et al.* (2023)	Uganda	Hydroponic vs. soil systems	Simplified urban production	Growth, establishment, yield	Higher success under soil-based cultivation in the evaluated setting	Hydroponics requires appropriate management
Karimzadeh *et al.* (2025)	Global	Soil vs. hydroponics	Global modelling	Water, nutrients, energy	Greater water and nutrient efficiency in modelled hydroponics	Trade-off with energy requirements
Mohmed *et al.* (2025)	Global	Hydroponics	AI-based modelling	Fertilizer use	Potential reductions in nutrient inputs	Optimization may improve efficiency
Qureshi *et al.* (2026)	China	Aeroponics, hydroponics, and soil	Controlled environment	Growth, N uptake, quality	Highest performance under plasma-enhanced aeroponics	Technology level affects outcomes
Santos *et al.* (2022)	Portugal	Drainage from soilless production systems	Reuse of drainage	Ecotoxicity, soil effects	Potential salt accumulation following drainage reuse	Reuse requires appropriate drainage and soil management
Sia *et al.* (2026)	Malaysia	Hydroponic vs. soil-grown choy sum (not lettuce)	Quality comparison; other species	Nutrients, antioxidants	Findings concern Brassica rapa, not lettuce	Contextual evidence only; not a direct lettuce comparison
Wang *et al.* (2023)	China	Hydroponics vs. soil	Commercial greenhouse	Yield, growth	Hydroponic yield up to 134% higher in the study conditions	Advantage depends on the controlled growing conditions
Zaidi *et al.* (2025)	Pakistan	Hydroponics vs. soil	Climatic stress	Growth, physiology	Higher growth under hydroponics in selected treatments	Responses depend on environmental conditions
Zha *et al.* (2024)	China	Hydroponics vs. soil	Commercial production	Yield, profitability	Soil-based cultivation was more profitable in some scenarios	Economic viability depends on system and management

In addition to productivity per production cycle, crop cycle duration is an important factor when comparing cultivation systems. In well-managed hydroponic systems, faster growth, greater plant uniformity, and the possibility of harvesting at shorter intervals can increase the number of harvests per year, thereby enhancing annual productivity even when the yield advantage per cycle is not absolute (GOH *et al*., 2023; WANG *et al*., 2023).

The body of literature analyzed provides methodologically diverse evidence regarding the performance of lettuce cultivated in hydroponic and soil-based systems. The dataset includes experimental studies, commercial evaluations, reviews, meta-analyses, and modeling approaches conducted in countries such as China, Uganda, Switzerland, and Brazil (GARTMANN *et al*., 2023; GOH *et al*., 2023; GOIS *et al*., 2024; WANG *et al*., 2023; ZHA *et al*., 2024; QURESHI *et al*., 2026).

As this study constitutes a narrative review with a systematized approach, no independent statistical analyses were performed. When source studies presented aggregated estimates, these were treated as secondary evidence and interpreted cautiously.

A predominant focus on the Nutrient Film Technique (NFT) was observed, although emerging technologies such as plasma-assisted aeroponics (QURESHI *et al*., 2026) and bioponics, which utilizes organic waste streams in closed-loop systems, were also included (GARTMANN *et al*., 2023). The studies encompassed open-field conditions, conventional greenhouses, and controlled environment agriculture (CEA) systems, employing cultivars such as Salanova, Butterhead, Batavia, and loose-leaf lettuce varieties (WANG *et al*., 2023; GÓIS *et al*., 2024; ZAIDI *et al*., 2025).

Because these investigations were conducted across different countries and production contexts, the interpretation of results must account for substantial variation in climate, cultivar, planting density, nutrient solution formulation, light availability, management practices, and technological level. These factors directly influence lettuce performance and limit broad generalizations regarding the superiority of one production system over another.

Além da produtividade por ciclo, a redução do ciclo da cultura é um ponto relevante para a comparação entre os sistemas. Em sistemas hidropônicos bem manejados, o crescimento mais rápido, a uniformidade das plantas e a possibilidade de colheitas em intervalos menores podem ampliar o número de colheitas ao longo do ano, aumentando a produtividade anual mesmo quando a vantagem por ciclo não é absoluta (GOH *et al*., 2023; WANG *et al*., 2023).

A base documental analisada reúne evidências metodologicamente distintas sobre o desempenho de alface em hidroponia e em solo. O conjunto inclui estudos experimentais, avaliações comerciais, revisões, meta-análises e modelagens, realizados em países como China, Uganda, Suíça e Brasil (GARTMANN *et al*., 2023; GOH *et al*., 2023; GÓIS *et al*., 2024; WANG *et al*., 2023; ZHA *et al*., 2024; QURESHI *et al*., 2026).

Por se tratar de revisão narrativa com abordagem sistematizada, não foram realizados testes estatísticos próprios; quando os estudos de origem apresentaram estimativas agregadas, estas foram tratadas como evidências secundárias e interpretadas com cautela.

Observa-se um foco predominante na Técnica de Lâmina de Nutrientes (NFT), mas com a inclusão de tecnologias emergentes como a aeroponia assistida por plasma (QURESHI *et al*., 2026) e a bioponia, que utiliza fluxos de resíduos orgânicos em sistemas de circuito fechado (GARTMANN *et al*., 2023). Os estudos variam entre condições de campo aberto, estufas convencionais e ambientes controlados (CEA), utilizando cultivares distintas como Salanova, Butterhead, Batavia e variedades de folha solta (WANG *et al*., 2023; GÓIS *et al*., 2024; ZAIDI *et al*., 2025).

Por se tratar de pesquisas realizadas em diferentes países e contextos produtivos, a interpretação dos resultados deve considerar a ampla variação de clima, cultivar, densidade de plantio, formulação da solução nutritiva, luminosidade, manejo e nível tecnológico, fatores que influenciam diretamente o desempenho da alface e limitam generalizações sobre a superioridade de um sistema em relação ao outro.

The literature generally converges on the conclusion that hydroponics has greater productive potential than soil cultivation when managed under optimized conditions. WANG *et al*. (2023), working in commercial greenhouse systems, reported a yield of 68.1 t ha^{-1} in hydroponics, compared with 29.1 t ha^{-1} under soil cultivation. However, these values should be interpreted with caution, as they reflect specific conditions involving cultivar selection, planting density, protected environments, nutrient management, and crop cycle duration, and therefore should not be generalized as universal yield levels for a single lettuce crop. Under more intensive technological conditions, QURESHI *et al*. (2026) reported higher fresh biomass per plant in plasma-assisted aeroponic systems, reinforcing the notion that substantial productivity gains depend on the degree of environmental control and technological sophistication employed.

Conversely, when commercial-scale production is considered, this apparent superiority is challenged by findings such as those reported by ZHA *et al*. (2024). The authors observed higher unit productivity in soil-grown lettuce under certain commercial scenarios, attributing the results to planting density limitations and chlorosis of older leaves in hydroponic systems. Similar findings were reported by GUMISIRIZA *et al*. (2023), in which conventional cultivation achieved higher success rates than simplified hydroponic systems, highlighting that the advantages of hydroponics are strongly dependent on management quality and technological inputs.

Lettuce development tends to be faster in hydroponic systems due to the immediate availability of water and nutrients. This characteristic is particularly relevant in tropical regions, such as Northern and Northeastern Brazil, where protected and hydroponic cultivation can reduce the impact of intense rainfall, seasonal variability, and periods less favorable for leafy vegetable production, thereby contributing to more stable year-round production. In a synthesis of available evidence, GOH *et al*. (2023) reported shorter production cycles in hydroponic systems, with harvests frequently occurring between 35 and 40 days, especially under controlled environmental conditions. Morphologically, hydroponically grown plants may exhibit greater height, a higher number of leaves, and increased fresh weight, although these responses vary according to cultivar, nutrient solution composition, and environmental conditions (GARTMANN *et al*., 2023; ZAIDI *et al*., 2025).

Existe uma convergência na literatura indicando que a hidroponia possui potencial produtivo superior ao cultivo em solo quando conduzida em condições otimizadas. Wang *et al*. (2023), em estufas comerciais, registraram produtividade de 68,1 t ha^{-1} em hidroponia, valor superior aos 29,1 t ha^{-1} obtidos no solo. Entretanto, esses valores devem ser interpretados com cautela, pois refletem condições específicas de cultivar, densidade de plantio, ambiente protegido, manejo nutricional e duração do ciclo, não devendo ser generalizados como produtividade universal de uma única safra de alface. Em tecnologias mais intensivas, Qureshi *et al*. (2026) observaram maior biomassa fresca por planta em aeroponia assistida por plasma, reforçando que ganhos expressivos dependem do nível de controle do ambiente e da tecnologia empregada.

Em contrapartida, quando se analisa a escala comercial real, essa aparente superioridade é confrontada por achados como os de Zha *et al*. (2024). Os autores observaram produtividade unitária superior no solo em determinados cenários comerciais, associada a problemas de densidade de plantio e clorose em folhas velhas no sistema hidropônico. Resultado semelhante foi relatado por Gumisiriza *et al*. (2023), em que o cultivo convencional apresentou maior taxa de sucesso que sistemas hidropônicos simplificados, reforçando que a vantagem da hidroponia depende do manejo e do nível tecnológico empregado.

O desenvolvimento da alface tende a ser mais acelerado em sistemas hidropônicos devido ao acesso imediato à água e aos nutrientes. Essa característica é especialmente relevante em regiões tropicais, como Norte e Nordeste do Brasil, nas quais o cultivo protegido e hidropônico pode reduzir a interferência de chuvas intensas, variações sazonais e períodos menos favoráveis ao cultivo de folhosas, contribuindo para maior regularidade de produção ao longo do ano. Em síntese de evidências, Goh *et al*. (2023) indicaram ciclos mais curtos em cultivos hidropônicos, com colheitas frequentemente relatadas entre 35 e 40 dias, especialmente em ambientes controlados. Em termos morfológicos, plantas cultivadas em hidroponia podem apresentar maior altura, maior número de folhas e maior peso fresco, embora esses resultados variem conforme a cultivar, a solução nutritiva e as condições ambientais (GARTMANN *et al*., 2023; ZAIDI *et al*., 2025).

Regarding root architecture, soil cultivation generally promotes longer roots due to the need for physical exploration of the soil profile, whereas hydroponic systems may favor greater total root biomass because of the immediate availability of water and nutrients. Nutritional quality also exhibits variable responses. Nitrate accumulation in hydroponically grown lettuce may be enhanced by the high availability of nitrate-nitrogen in the nutrient solution and reduced nitrate reductase activity under certain light conditions. However, management strategies such as bioponics and the replacement of nutrient solution with water prior to harvest can reduce nitrate concentrations (GARTMANN *et al*., 2023; WANG *et al*., 2023).

Water-use efficiency represents the area of greatest consensus among researchers, with hydroponic systems reducing water consumption by approximately 70% to 95% compared with conventional soil cultivation (GEBREEGZIHER, 2023; KARIMZADEH *et al*., 2025). Nutrient-use efficiency is also superior in closed-loop systems, allowing fertilizer savings of up to 85% (KARIMZADEH *et al*., 2025), while artificial intelligence-based models have demonstrated the potential to optimize nutrient formulations by an additional 40% (MOHMED *et al*., 2025).

Furthermore, hydroponic production requires approximately 75% less land to achieve equivalent output (GEBREEGZIHER, 2023). On the other hand, energy efficiency remains one of the principal limitations of hydroponic cultivation because of the requirements for pumping and, in some cases, environmental control. Nevertheless, the adoption of photovoltaic solar energy and other renewable energy sources can mitigate these operational impacts, particularly in regions with high solar radiation availability (CASAMAYOR *et al*., 2024; KARIMZADEH *et al*., 2025).

The variability observed among studies can be attributed to environmental, economic, and management-related factors. Initial investment costs, electricity expenses, pumping requirements, nutrient solution temperature management, and root-zone oxygenation are frequently cited as major barriers to hydroponic adoption (CASAMAYOR *et al*., 2024; ZHA *et al*., 2024).

Quanto à arquitetura radicular, o cultivo em solo tende a estimular raízes mais longas pela necessidade de exploração física do perfil edáfico, enquanto a hidroponia pode favorecer maior biomassa radicular total em razão da disponibilidade imediata de água e nutrientes. A qualidade nutricional também apresenta resultados variáveis: o acúmulo de nitratos na hidroponia pode ser favorecido pela alta disponibilidade de nitrogênio nítrico na solução e por menor atividade da redutase do nitrato sob determinadas condições de luminosidade, mas estratégias como bioponia e substituição da solução por água antes da colheita podem reduzir esses teores (GARTMANN *et al*., 2023; WANG *et al*., 2023).

A eficiência no uso de água é o ponto de maior consenso entre os autores, com a hidroponia apresentando reduções de consumo entre 70% e 95% em comparação ao solo (GEBREEGZIHER, 2023; KARIMZADEH *et al*., 2025). A eficiência de nutrientes também é superior em sistemas de circuito fechado, permitindo economias de fertilizantes de até 85% (KARIMZADEH *et al*., 2025), com o auxílio de modelos de Inteligência Artificial que podem otimizar as formulações em mais 40% (MOHMED *et al*., 2025).

Além disso, a hidroponia utiliza cerca de 75% menos terras para a mesma produção (GEBREEGZIHER, 2023). Por outro lado, a eficiência energética permanece como uma das principais limitações da hidroponia, devido à necessidade de bombeamento e, em alguns casos, de controle climático; contudo, a adoção de energia solar fotovoltaica e outras fontes renováveis pode amenizar esse impacto operacional, especialmente em regiões com elevada disponibilidade de radiação solar (CASAMAYOR *et al*., 2024; KARIMZADEH *et al*., 2025).

A variabilidade dos resultados é explicada por fatores ambientais, econômicos e de manejo. O investimento inicial, os custos de eletricidade, a necessidade de bombeamento, o controle da temperatura da solução e a oxigenação radicular aparecem como barreiras importantes para a adoção da hidroponia (CASAMAYOR *et al*., 2024; ZHA *et al*., 2024).

Moreover, many studies are derived from researcher-managed experiments, which may overestimate yields relative to those achieved by commercial growers under practical production conditions. Nutrient solution composition, electrical conductivity, and light intensity also exert significant influence on crop performance, necessitating context-specific interpretation and preventing the direct extrapolation of results across cultivars, regions, and production scales (GOH *et al*., 2023; GÓIS *et al*., 2024).

DISCUSSION

The comparative analysis indicates that the cultivation system is one of the main determinants of plant growth rate and architecture; however, it does not act in isolation. In hydroponic systems, the direct contact of roots with a balanced nutrient solution reduces limitations related to water and mineral availability, potentially promoting shorter production cycles and greater initial biomass accumulation. Nevertheless, this performance depends on nutrient solution stability, root-zone oxygenation, temperature, light availability, and plant density management (WANG *et al*., 2023; ZHA *et al*., 2024; QURESHI *et al*., 2026).

The divergence between experimental and commercial results represents a central aspect of this review. Under controlled experimental conditions, hydroponic systems tend to express their maximum potential because variables such as nutrient solution composition, environmental conditions, and crop health are rigorously managed. In commercial production units or simplified systems, however, inadequate control of planting density, oxygenation, and temperature may reduce productivity and diminish or even reverse the expected advantage over soil-based cultivation (GUMISIRIZA *et al*., 2023; ZHA *et al*., 2024).

Environmental conditions influence the two systems differently due to their buffering capacities. Soil functions as a physical, chemical, and biological reservoir, mitigating rapid fluctuations in temperature, pH, and nutrient availability. In hydroponic systems, the nutrient solution responds rapidly to environmental changes; consequently, elevated temperatures reduce oxygen solubility and may impair root growth, particularly in tropical regions and greenhouses with limited temperature control (SANTOS *et al*., 2022; WANG *et al*., 2023).

Além disso, muitos estudos derivam de experimentos controlados por pesquisadores, os quais podem superestimar os rendimentos quando comparados ao desempenho de produtores comerciais em condições reais. A composição da solução nutritiva, a condutividade elétrica e a intensidade luminosa também influenciam os resultados, exigindo interpretação contextualizada e impedindo a extrapolação direta entre cultivares, regiões e escalas de produção (GOH *et al*., 2023; GÓIS *et al*., 2024).

DISCUSSÃO

A análise comparativa indica que o sistema de cultivo é um dos principais condicionantes da velocidade de crescimento e da arquitetura das plantas, mas não atua de forma isolada. Na hidroponia, o contato direto das raízes com solução nutritiva balanceada reduz limitações de disponibilidade hídrica e mineral, podendo favorecer ciclos mais curtos e maior biomassa inicial. Esse desempenho, entretanto, depende da estabilidade da solução, da oxigenação radicular, da temperatura, da luminosidade e do manejo da densidade de plantio (WANG *et al*., 2023; ZHA *et al*., 2024; QURESHI *et al*., 2026).

A divergência entre resultados experimentais e comerciais é um aspecto central da revisão. Em experimentos controlados, a hidroponia tende a expressar seu potencial máximo, pois variáveis como solução nutritiva, ambiente e sanidade são rigidamente manejadas. Em unidades comerciais ou sistemas simplificados, falhas no controle de densidade, oxigenação e temperatura podem reduzir a produtividade e aproximar ou até inverter a vantagem esperada em relação ao solo (GUMISIRIZA *et al*., 2023; ZHA *et al*., 2024).

O ambiente exerce influência distinta sobre os sistemas devido à capacidade de tamponamento. O solo atua como reserva física, química e biológica, amortecendo variações rápidas de temperatura, pH e disponibilidade de nutrientes. Na hidroponia, a solução nutritiva responde rapidamente às mudanças ambientais; por isso, temperaturas elevadas reduzem a solubilidade do oxigênio e podem comprometer o crescimento radicular, especialmente em regiões tropicais e em estufas com controle térmico limitado (SANTOS *et al*., 2022; WANG *et al*., 2023).

Nutrient management, resource-use efficiency, and energy costs must be discussed in an integrated manner. Hydroponic cultivation enables greater control over nutrient solution composition, water reuse, and precise fertigation management, including the application of automation and Artificial Intelligence technologies. However, this precision increases dependence on electrical energy, sensors, pumps, and technical maintenance, factors that may reduce profitability in regions with high energy costs or limited technical support (CASAMAYOR *et al*., 2024; MOHMED *et al*., 2025; KARIMZADEH *et al*., 2025).

Hydroponics presents considerable potential as a strategy for reducing water consumption and intensifying production in resource-constrained environments. Nevertheless, its sustainability depends on energy sources, component durability, nutrient solution disposal or reuse practices, and production scale. As a historical reference, BARBOSA *et al*. (2015) highlighted the substantial savings in water and land associated with hydroponic cultivation, while also identifying higher energy requirements. This observation has been confirmed by recent studies emphasizing the trade-off between water-use efficiency and energy consumption.

Soil-based cultivation remains an alternative characterized by lower economic barriers and greater operational simplicity, particularly for producers with limited initial capital. However, this system is more susceptible to soil compaction, nutrient leaching, salinization, and climatic variability. Hybrid systems, such as bioponics and soilless cultivation using organic nutrient sources, may balance some of these advantages, although they increase the complexity of microbiological and nutritional management (GARTMANN *et al*., 2023; SANTOS *et al*., 2022; KARIMZADEH *et al*., 2025).

This review identified that a substantial proportion of the available data for both conventional soil-based and hydroponic systems originates from researcher-controlled experiments, which may not accurately reflect the challenges and yields achieved by commercial growers under real production conditions (GOH *et al*., 2023). This limitation should be considered when interpreting results, as both soil and hydroponic cultivation systems are subject to variation associated with production scale, technological level, grower experience, cultivar selection, climate, nutrient management, and pest and disease control. Furthermore, there is a scarcity of studies incorporating comprehensive Life Cycle Assessment (LCA) analyses that consider not only the cultivation phase but also the manufacture of hydroponic components, including batteries and plastic infrastructure (CASAMAYOR *et al*., 2024).

Manejo nutricional, eficiência de recursos e custo energético devem ser discutidos de forma integrada. A hidroponia permite maior controle da solução nutritiva, reuso de água e ajuste fino da fertirrigação, inclusive com apoio de automação e Inteligência Artificial. Por outro lado, essa precisão aumenta a dependência de energia elétrica, sensores, bombas e manutenção técnica, fatores que podem reduzir a lucratividade em locais onde o custo energético é elevado ou onde há baixa assistência técnica (CASAMAYOR *et al*., 2024; MOHMED *et al*., 2025; KARIMZADEH *et al*., 2025).

A hidroponia apresenta potencial relevante como estratégia para redução do consumo hídrico e intensificação produtiva em ambientes com restrição de recursos. Entretanto, sua sustentabilidade depende da fonte de energia, da durabilidade dos componentes, do descarte ou reuso da solução nutritiva e da escala de produção. Como referência histórica, Barbosa *et al*. (2015) já apontavam grande economia de água e terra na hidroponia, mas também maior demanda energética, aspecto confirmado por estudos recentes que destacam o trade-off entre eficiência hídrica e consumo de energia.

O cultivo em solo permanece como alternativa de menor barreira econômica e maior simplicidade operacional, especialmente para produtores com menor capital inicial. Todavia, esse sistema está mais exposto à compactação, lixiviação de nutrientes, salinização e variações climáticas. Sistemas híbridos, como bioponia e cultivo sem solo com fontes orgânicas, podem equilibrar parte dessas vantagens, mas aumentam a complexidade do manejo microbiológico e nutricional (GARTMANN *et al*., 2023; SANTOS *et al*., 2022; KARIMZADEH *et al*., 2025).

A revisão identifica que parte expressiva dos dados disponíveis para ambos os sistemas, convencional em solo e hidropônico, provém de experimentos controlados por pesquisadores, os quais podem não refletir com precisão os desafios e rendimentos obtidos por produtores comerciais em condições reais (GOH *et al*., 2023). Essa limitação deve ser considerada na interpretação dos resultados, pois tanto o cultivo em solo quanto a hidroponia apresentam variações decorrentes de escala produtiva, nível tecnológico, experiência do produtor, cultivar, clima, manejo nutricional e controle fitossanitário. Há também escassez de estudos que integrem análises de ciclo de vida (LCA) completos, considerando não apenas a fase de cultivo, mas a fabricação de componentes hidropônicos, como baterias e infraestrutura plástica (CASAMAYOR *et al*., 2024).

Within the Brazilian context, comparisons between hydroponic and soil-based cultivation should consider the tropical climate, electricity costs, regional water availability, producer profiles, marketing logistics, and quality requirements of the fresh produce market. In hot regions, nutrient solution temperature control may be decisive for maintaining adequate oxygenation, whereas in areas characterized by seasonal water availability, hydroponics may represent a strategic alternative provided that operational costs remain compatible with market prices.

Variability among cultivars and nutrient solution formulations complicates the generalization of results. Complementary studies involving other leafy vegetables, such as choy sum (Brassica rapa), were considered only as interpretative support for discussing quality attributes in cultivation systems and not as central evidence regarding lettuce production (SIA *et al*., 2026). Therefore, the principal inferences of this study remain based on research involving lettuce or directly comparable leafy vegetable production systems.

For sustainable lettuce production, system selection should be guided by local conditions and production objectives. In urban centers, regions with water scarcity, or high-value markets, hydroponics may enhance efficiency and supply consistency. Conversely, on farms with limited capital resources, greater land availability, and lower automation capacity, soil cultivation may remain competitive, particularly when associated with appropriate irrigation, fertility, and crop health management practices.

A major research gap identified is the need for standardized national studies conducted under commercial conditions, particularly in tropical regions, integrating productivity, quality, water consumption, energy expenditure, establishment costs, profitability, and life cycle assessment. Further research is also recommended on heat-tolerant cultivars, solar energy utilization, low-cost automation technologies, hydroponic drainage management, and economic comparisons among small-, medium-, and large-scale production systems in Brazil.

No contexto brasileiro, a comparação entre hidroponia e solo deve considerar clima tropical, custo da energia elétrica, disponibilidade regional de água, perfil dos produtores, logística de comercialização e exigência de qualidade pelo mercado de hortifruti. Em regiões quentes, o controle da temperatura da solução nutritiva pode ser decisivo para manter oxigenação adequada, enquanto em áreas com disponibilidade hídrica sazonal a hidroponia pode representar alternativa estratégica, desde que o custo operacional seja compatível com o preço de venda.

A variabilidade nas cultivares utilizadas e nas formulações de soluções nutritivas dificulta a generalização dos resultados. Estudos complementares com outras hortaliças folhosas, como choy sum (*Brassica rapa*), foram considerados apenas como apoio interpretativo para discutir qualidade em sistemas de cultivo, não como evidência central sobre alface (SIA *et al*., 2026). Assim, as inferências principais deste trabalho permanecem baseadas nos estudos que envolvem alface ou sistemas diretamente comparáveis de produção de folhosas.

Para a produção sustentável de alface, a escolha do sistema deve ser guiada pelo contexto local e pelo objetivo produtivo. Em centros urbanos, áreas com restrição hídrica ou mercados de alto valor, a hidroponia pode ampliar eficiência e regularidade de oferta. Em propriedades com menor capital disponível, maior disponibilidade de terra e menor capacidade de automação, o solo pode permanecer competitivo, sobretudo quando associado a manejo adequado de irrigação, fertilidade e sanidade.

Como lacuna de pesquisa destaca-se: estudos nacionais padronizados em condições comerciais, especialmente em regiões tropicais, que integrem produtividade, qualidade, consumo de água, gasto energético, custo de implantação, lucratividade e análise de ciclo de vida. Recomenda-se, ainda, pesquisas sobre cultivares adaptadas ao calor, uso de energia solar, automação de baixo custo, manejo de drenagem hidropônica e comparação econômica entre sistemas de pequena, média e grande escala no Brasil.

CONCLUSIONS

Lettuce cultivation under hydroponic and conventional soil-based systems demonstrates that both approaches possess agronomic potential, with performance influenced by management practices, technological level, and environmental conditions. Hydroponics is distinguished by its greater efficiency in water and nutrient use, enhanced control of the growing environment, and the ability to reduce the direct influence of climatic conditions on production, particularly when conducted under protected cultivation. In contrast, conventional soil cultivation remains highly relevant due to its lower initial investment requirements, operational simplicity, and broad applicability across different production scales, despite its greater dependence on edaphoclimatic conditions and management practices.

There is no absolute superiority between the two systems, as agronomic performance results from the interaction among cultivar characteristics, nutrient management, water availability, temperature, light intensity, planting density, production scale, and producer expertise. In this context, hydroponics should be regarded as a highly efficient alternative when combined with appropriate management practices, whereas soil cultivation remains a relevant production system because of its operational simplicity, lower capital requirements, and greater stability under certain environmental fluctuations.

It is concluded that the choice of cultivation system should be based on an integrated evaluation of technical, economic, and environmental factors. In scenarios characterized by water scarcity, high demand for production consistency, and greater investment capacity, hydroponics tends to offer significant advantages. Conversely, in situations involving limited initial capital, greater land availability, and adequate soil management, soil cultivation may remain competitive. Standardized studies under real commercial conditions, encompassing integrated economic, energy, and environmental analyses, are still required to improve understanding of the comparative viability of these production systems.

CONCLUSÕES

O cultivo de alface em sistemas hidropônico e convencional (em solo) evidencia que ambos apresentam potencial agronômico, com desempenho influenciado pelas práticas de manejo, pelo nível tecnológico adotado e pelas condições ambientais. A hidroponia destaca-se pela maior eficiência no uso da água e dos nutrientes, pelo maior controle do ambiente de cultivo e pela possibilidade de reduzir a interferência direta das condições climáticas sobre a produção, especialmente quando conduzida em ambiente protegido. Por outro lado, o sistema convencional em solo mantém sua relevância em razão da menor exigência de investimento inicial, da simplicidade operacional e da ampla aplicabilidade em diferentes escalas produtivas, embora apresente maior dependência das condições edafoclimáticas e do manejo adotado.

Não há superioridade absoluta entre os sistemas, uma vez que o desempenho agronômico resulta da interação entre cultivar, manejo nutricional, disponibilidade hídrica, temperatura, luminosidade, densidade de plantio, escala produtiva e capacidade técnica do produtor. Nesse contexto, a hidroponia deve ser compreendida como uma alternativa de elevada eficiência quando associada ao manejo adequado, enquanto o cultivo em solo permanece como um sistema relevante em função da simplicidade operacional, do menor investimento inicial e da maior estabilidade frente a determinadas variações ambientais.

Conclui-se que a escolha do sistema deve ser orientada por uma análise integrada de aspectos técnicos, econômicos e ambientais. Em cenários caracterizados por restrição hídrica, elevada exigência de regularidade produtiva e maior capacidade de investimento, a hidroponia tende a apresentar vantagens; por outro lado, em contextos marcados por menor disponibilidade de capital inicial, maior oferta de área e manejo edáfico adequado, o cultivo em solo pode manter sua competitividade. Permanecem necessários estudos padronizados em condições comerciais reais, contemplando análises econômicas, energéticas e ambientais integradas, de modo a ampliar a compreensão acerca da viabilidade comparativa entre os sistemas.

CITED SCIENTIFIC LITERATURE

ABCSEM - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO COMÉRCIO DE SEMENTES E MUDAS. Dados socioeconômicos da cadeia produtiva de hortaliças no Brasil. Campinas: ABCSEM, 2015.

AHMED, Z. F. R.; ALNUAIMI, A. K. H.; ASKRI, A.; TZORTZAKIS, N. Evaluation of lettuce (*Lactuca sativa* L.) production under hydroponic system: nutrient solution derived from fish waste vs. inorganic nutrient solution. **Horticulturae**, v. 7, n. 9, p. 292, 2021. DOI: https://doi.org/10.3390/horticulturae7090292.

AL MESELMANI, M. A. Nutrient solution for hydroponics. In: TURAN, M.; ARGIN, S.; YILDIRIM, E.; GÜNEŞ, A. (Eds.). Recent Research and Advances in Soilless Culture. London: IntechOpen, 2022. DOI: https://doi.org/10.5772/intechopen.101604.

BARBOSA, G.; GADELHA, F.; KUBLIK, N.; PROCTOR, A.; REICHELM, L.; WEISSINGER, E.; WOHLLEB, G.; HALDEN, R. Comparison of land, water, and energy requirements of lettuce grown using hydroponic vs. conventional agricultural methods. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 12, n. 6, p. 6879-6891, 2015. DOI: https://doi.org/10.3390/ijerph120606879.

CASAMAYOR, J.; MUÑOZ, E.; FRANCHINO, M.; GALLEGO-SCHMID, A.; SHIN, H. Human-powered hydroponic systems: an environmental and economic assessment. **Sustainable Production and Consumption**, v. 46, p. 268-281, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.02.026.

CRUZ, S. L.; ALVES, J. M. A.; MOURA, R. C. S.; SANTOS NETO, J. S.; GUEDES, Y. A.; TOSIN, B. K. M.; LUCENA, J. L. Q. Asparagus in the Amazonian Savanna: cultivation, challenges, and potential for regional agricultural diversification. **Agro@mbiente On-line**, v. 20, e8871, p. 1–20, 2026. DOI: https://doi.org/10.18227/1982-8470ragro.v20i00.8871.

FAOSTAT. Crops and livestock products: lettuce and chicory. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2025. Disponível em: https://www.fao.org/faostat/. Acesso em: 24 maio 2026.

FARIAS, D.; LUCAS, A.; MOREIRA, M.; NASCIMENTO, L.; FILHO, J. Cobertura do solo e adubação orgânica na produção de alface. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 60, n. 2, p. 173-176, 2017. DOI: https://doi.org/10.4322/rca.2493.

FATHIDAREHNIJEH, E.; NADEEM, M.; CHEEMA, M.; THOMAS, R.; KRISHNAPILLAI, M.; GALAGEDARA, L. Current perspective on nutrient solution management strategies to improve the nutrient and water use efficiency in hydroponic systems. **Canadian Journal of Plant Science**, v. 104, n. 2, 2024. DOI: https://doi.org/10.1139/cjps-2023-0034.

GARTMANN, F.; HÜGLY, J.; KRÄHENBÜHL, N.; BRINKMANN, N.; SCHMAUTZ, Z.; SMITS, T.; JUNGE, R. Bioponics-An organic closed-loop soilless cultivation system: yields and characteristics compared to hydroponics and soil cultivation. **Agronomy**, v. 13, n. 6, p. 1436, 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/agronomy13061436.

GEBREEGZIHER, W. G. Soilless culture technology to transform vegetable farming, reduce land pressure and degradation in drylands. **Cogent Food & Agriculture**, v. 9, n. 2, p. 2265106, 2023. DOI: https://doi.org/10.1080/23311932.2023.2265106.

GIRARDELLO, R.; SILVA, D.; GUERRA, D.; LANZANOVA, M.; SOUZA, E. Produção de alface sob plantio direto em sistema de transição agroecológica. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável,** v. 12, n. 2, p. 273-279, 2017**.** DOI: https://doi.org/10.18378/rvads.v12i2.4827

GOH, Y.; HUM, Y.; LEE, Y.; LAI, K.; YAP, W.; TEE, Y. A meta-analysis: food production and vegetable crop yields of hydroponics. **Scientia Horticulturae**, [s. l.], v. 321, art. 112339, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112339

GÓIS, H.; OLIVEIRA, F.; OLIVEIRA, R.; PINTO, F.; AROUCHA, E.; QUEIROZ, G.; ALMEIDA, J.; OLIVEIRA, C. Lettuce growing in different hydroponic systems and nutrient concentrations of the nutrient solution. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 28, n. 8, e279686, 2024. DOI: https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v28n8e279686

GUMISIRIZA, M.; NDAKIDEMI, P.; NAMPIJJA, Z.; MBEGA, E. Soilless urban gardening as a post covid-19 food security salvage technology: a study on the physiognomic response of lettuce to hydroponics in Uganda. **Scientific African**, [s. l.], v. 20, e01643, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2023.e01643

HOSSEINI, M.; JAHANSHAHLOU, F.; AKBARZADEH, M.; ZAREI, M.; VAEZ-GHARAMALEKI, Y. Formulating research questions for evidence-based studies. **Journal of Medicine, Surgery, and Public Health**, v. 2, p. 100046, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.glmedi.2023.100046

KARIMZADEH, S.; DACCACHE, A.; RULLI, M.; AHAMED, M. Global water-nutrient-salinity-energy nexus in lettuce production: from open-field irrigation to closed-loop hydroponics in greenhouses. **Journal of Agriculture and Food Research**, [s. l.], v. 21, art. 101935, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jafr.2025.101935

LEBEDA, A.; MAJESKÝ, L.; KŘÍSTKOVÁ, E.; PINK, D.; SIMKO, I. Unraveling the variation, phylogeny, and taxonomy of Lactuca spp. for germplasm management and breeding. **Planta**, v. 262, n. 6, art. 148, 2025. DOI: https://doi.org/10.1007/s00425-025-04851-6

MOHMED, G.; HASANALIYEVA, G.; O'MAHONY, R.; LU, C. Optimizing nutrient formulations through artificial intelligence model to reduce excessive fertigation in lettuce grown in hydroponic systems. **IEEE Access**, [s. l.], v. 13, p. 100183-100197, 2025. DOI: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3571730

OUZZANI, M.; HAMMADY, H.; FEDOROWICZ, Z.; ELMAGARMID, A. Rayyan - a web and mobile app for systematic reviews. **Systematic Reviews**, v. 5, n. 1, art. 210, 2016. DOI: https://doi.org/10.1186/s13643-016-0384-4

QURESHI, W.; GAO, J.; TUNIO, M.; ELSHERBINY, O.; GAO, X.; WANG, L.; MOSHA, A. Smart plasma-enhanced aeroponic cultivation of lettuce (*Lactuca sativa* L.): comparative evaluation with soil and hydroponic systems on growth responses, nitrogen absorption, and nutritional quality. **Smart Agricultural Technology**, v. 13, p. 101776, 2026. DOI: https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.101776

SANTOS, M. G.; MOREIRA, G. S.; PEREIRA, R. B.; CARVALHO, S. M. P. Assessing the potential use of drainage from open soilless production systems: a case study from an agronomic and ecotoxicological perspective. **Agricultural Water Management**, v. 273, p. 107906, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107906

SHATILOV, M.; RAZIN, A.; IVANOVA, M. Analysis of the world lettuce market. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 395, p. 012053, 2019. DOI: https://doi.org/10.1088/1755-1315/395/1/012053

SIA, E.; CHAN, S.; SINGARAM, N.; LIEW, C.; LIM, P. Comparative study of physicochemical, nutritional, antioxidant, and sensory qualities of hydroponically grown and soil-grown choy sum (Brassica rapa subsp. chinensis var. parachinensis). **Journal of Food Measurement and Characterization**, 2026. DOI: https://doi.org/10.1007/s11694-026-04278-x

TADEVOSYAN, A.; MARTIROSYAN, G.; TOVMASYAN, G.; TERTERYAN, H.; GASPARYAN, N. Evaluation of several lettuce varieties based on economically valuable traits and nutritional value under vertical hydroponic cultivation conditions. **Bioactive Compounds in Health and Disease**, v. 8, n. 3, p. 104-113, 2025. DOI: https://doi.org/10.31989/bchd.v8i3.1595

WANG, L.; NING, S.; ZHENG, W.; GUO, J.; LI, Y.; LI, Y.; CHEN, X.; BEN-GAL, A.; WEI, X. Performance analysis of two typical greenhouse lettuce production systems: commercial hydroponic production and traditional soil cultivation. **Frontiers in Plant Science**, v. 14, art. 1165856, 2023. DOI: https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1165856

ZAIDI, S.; BEGUM, S.; NOOR, M.; CHAUDHRY, G.; KHAN, S.; ADNAN, M. Morpho-physiological responses of selected vegetables in hydroponic and soil-based systems under climatic stress. **Tropical Life Sciences Research**, 2025. DOI: https://doi.org/10.21315/tlsr2025.36.3.8

ZHA, L.; WANG, Z.; HUANG, C.; DUAN, Y.; TIAN, Y.; WANG, H.; ZHANG, J. Comparative analysis of leaf vegetable productivity, quality, and profitability among different cultivation modes: a case study. **Agronomy**, v. 14, n. 1, art. 76, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/agronomy14010076