

Artículo Revisión

Bioestimulantes naturales en cultivos hortícolas: estado del arte y perspectivas

Horticulture: natural biostimulants in horticultural crops: state of the art and perspectives

Luis Humberto Benavides Velasco^{1*}  

¹Universidad Técnica de Cotopaxi, Cotopaxi-Ecuador

*Autor de correspondencia: Luis Humberto Benavides Velasco 

Recibido: 08-04-2024

Revisado: 15-04-2024

Aceptado: 22-04-2024

Publicado: 29-04-2024

Cómo citar este artículo: [Benavides Velasco, L. H. (2024). Bioestimulantes naturales en cultivos hortícolas: estado del arte y perspectivas. *Viterra*, 2(2), 1-31. <https://viterra.diginova.pro/index.php/viterra/article/view/11>

RESUMEN

Los bioestimulantes naturales han adquirido una importancia creciente en la horticultura moderna debido a su capacidad para mejorar el crecimiento, desarrollo, productividad y tolerancia de los cultivos frente a condiciones de estrés abiótico, contribuyendo simultáneamente a la sostenibilidad de los sistemas agrícolas. El objetivo de esta revisión sistemática fue analizar el estado actual del conocimiento sobre los bioestimulantes naturales utilizados en cultivos hortícolas, identificando sus principales mecanismos de acción, efectos fisiológicos, aplicaciones agronómicas y perspectivas de investigación. La metodología se desarrolló siguiendo los lineamientos de la declaración PRISMA 2020 para revisiones sistemáticas. Se realizó una búsqueda bibliográfica en bases de datos científicas y literatura especializada relacionada con bioestimulantes vegetales, extractos de algas, sustancias húmicas, aminoácidos, microorganismos benéficos y compuestos naturales empleados en horticultura. Los estudios seleccionados fueron analizados considerando el tipo de bioestimulante, cultivo evaluado, variables fisiológicas, respuesta al estrés abiótico, rendimiento y calidad de la producción. La evidencia recopilada demuestra que los bioestimulantes naturales favorecen la absorción de nutrientes, incrementan la actividad fotosintética, estimulan el desarrollo radicular, fortalecen los sistemas antioxidantes y mejoran la eficiencia en el uso del agua. Asimismo, numerosos estudios reportan incrementos en el rendimiento, calidad comercial y resistencia frente a factores ambientales adversos mediante la aplicación de extractos vegetales, algas marinas, sustancias húmicas y bioestimulantes microbianos. Se concluye que los bioestimulantes naturales representan una herramienta estratégica para promover una horticultura más sostenible, siendo necesario fortalecer investigaciones orientadas a comprender sus mecanismos moleculares de acción, estandarizar protocolos de aplicación y optimizar su integración dentro de los sistemas modernos de producción hortícola.

Palabras clave: bioestimulantes naturales; horticultura; estrés abiótico; crecimiento vegetal; agricultura sostenible.

ABSTRACT

Natural biostimulants have gained increasing importance in modern horticulture due to their ability to improve crop growth, development, productivity, and tolerance to abiotic stress while contributing to the sustainability of agricultural systems. The objective of this systematic review was to analyse the current state of knowledge regarding natural biostimulants used in horticultural crops, identifying their main mechanisms of action, physiological effects, agronomic applications, and future research perspectives. The methodology was conducted following the PRISMA 2020 guidelines for systematic reviews. A comprehensive literature search was performed using scientific databases and specialised publications related to plant biostimulants, seaweed extracts, humic substances, amino acids, beneficial microorganisms, and natural compounds applied in horticulture. The selected studies were analysed according to the type of biostimulant, crop evaluated, physiological variables, response to abiotic stress, yield, and product quality. The available evidence demonstrates that natural biostimulants enhance nutrient uptake, increase photosynthetic activity, stimulate root development, strengthen antioxidant systems, and improve water-use

efficiency. Furthermore, numerous studies report improvements in yield, commercial quality, and resistance to adverse environmental conditions through the application of plant extracts, seaweed extracts, humic substances, and microbial biostimulants. It is concluded that natural biostimulants represent a strategic tool for promoting more sustainable horticultural production, although further research is required to better understand their molecular mechanisms of action, standardise application protocols, and optimise their integration into modern horticultural production systems.

Keywords: natural biostimulants; horticulture; abiotic stress; plant growth; sustainable agriculture.

1. INTRODUCCIÓN

La horticultura constituye un componente estratégico de los sistemas agroalimentarios debido a su contribución al abastecimiento de frutas, hortalizas y otros productos de elevado valor nutricional y económico. Además de favorecer la diversificación alimentaria, este sector genera empleo e ingresos a lo largo de las cadenas de producción, transformación y comercialización. Sin embargo, su intensificación se desarrolla en un contexto marcado por el cambio climático, la degradación progresiva de los suelos, la reducción de la disponibilidad de agua y la mayor frecuencia de condiciones ambientales adversas. La sequía, la salinidad, las temperaturas extremas y los desequilibrios nutricionales afectan procesos fundamentales como la fotosíntesis, la absorción de nutrientes, el crecimiento radicular y la formación de frutos. Ante este escenario, Rouphael y Colla (2020) señalan que la agricultura sostenible requiere soluciones capaces de conservar la productividad y mejorar la eficiencia en el uso de los recursos sin incrementar la dependencia de insumos químicos convencionales.

Dentro de este proceso de innovación, los bioestimulantes naturales han adquirido una importancia creciente como herramientas destinadas a mejorar el funcionamiento fisiológico y agronómico de las plantas. Su acción se diferencia de la ejercida por los fertilizantes porque sus efectos no dependen exclusivamente del aporte directo de nutrientes ni corresponden a la actividad propia de un producto fitosanitario. De acuerdo con du Jardin (2015), estas formulaciones actúan mediante la estimulación de procesos naturales que favorecen la absorción y asimilación de nutrientes, la tolerancia frente al estrés abiótico y la calidad de los productos cosechados. Esta capacidad permite que su utilización complemente las prácticas convencionales de nutrición y manejo agronómico, especialmente en sistemas hortícolas intensivos donde las plantas deben mantener un rendimiento elevado durante ciclos productivos relativamente cortos. La definición y clasificación de estos insumos han evolucionado conforme se han ampliado los conocimientos sobre sus componentes y mecanismos de acción. En sus primeras aplicaciones comerciales, estuvieron relacionados principalmente con sustancias húmicas y extractos de algas marinas; posteriormente, el concepto incorporó hidrolizados de proteínas, aminoácidos, extractos vegetales, compuestos orgánicos y microorganismos benéficos. Calvo et al. (2014) explican que esta diversidad de origen se corresponde con numerosas respuestas fisiológicas, entre las que se encuentran el incremento del crecimiento radicular, la movilización de nutrientes y la regulación del metabolismo vegetal. Por consiguiente, no conforman un grupo homogéneo, sino un conjunto de soluciones bioactivas cuyas propiedades dependen de la materia prima, el proceso de obtención, la composición final y la interacción establecida con la especie cultivada.

Uno de los principales campos de aplicación de estas formulaciones corresponde al fortalecimiento de la tolerancia de los cultivos frente al estrés abiótico. La exposición a una disponibilidad limitada de agua, concentraciones elevadas de sales o temperaturas desfavorables provoca alteraciones metabólicas que reducen el crecimiento y el rendimiento de las plantas. Bulgari et al. (2019) sostienen que el empleo de agentes bioactivos puede contribuir a regular el equilibrio hormonal, activar mecanismos antioxidantes y favorecer la acumulación de compuestos relacionados con la protección celular. Estas respuestas permiten que los cultivos mantengan con mayor estabilidad su actividad fotosintética y su estado hídrico durante los periodos de estrés, aunque la magnitud de los beneficios puede variar según la composición del producto, la dosis aplicada, la etapa fenológica y la intensidad de la condición adversa.

Entre los recursos naturales utilizados para obtener productos promotores del crecimiento, los extractos de algas marinas constituyen uno de los grupos con mayor trayectoria de investigación y aplicación en horticultura. Su

composición puede incluir polisacáridos, aminoácidos, minerales, vitaminas y compuestos con actividad semejante a la de determinadas fitohormonas. Khan et al. (2009) documentaron que estos extractos pueden estimular la germinación, el desarrollo radicular y el crecimiento de las plantas, además de favorecer respuestas defensivas frente a condiciones ambientales desfavorables. Otras materias primas vegetales también han mostrado efectos relevantes. En un estudio realizado con una formulación derivada de alfalfa, Ertani et al. (2013) observaron modificaciones favorables en parámetros fisiológicos y metabólicos relacionados con la nutrición y el crecimiento vegetal, lo cual demuestra el potencial de diferentes fuentes naturales para producir compuestos con actividad biológica.

El interés científico por estos insumos se ha intensificado debido a su posible contribución a una producción hortícola más eficiente y ambientalmente responsable. Los avances en fisiología vegetal, microbiología agrícola, metabolómica y biología molecular han permitido examinar con mayor precisión las respuestas generadas por su aplicación y comprender que su acción no se limita al incremento visible del crecimiento. Sus efectos pueden involucrar modificaciones en la expresión génica, la actividad enzimática, el metabolismo antioxidante, la arquitectura radicular y las interacciones entre la planta y los microorganismos del suelo. La evidencia analizada por Calvo et al. (2014) muestra que esta diversidad de respuestas ha promovido el desarrollo de composiciones más específicas. A su vez, Rouphael y Colla (2020) destacan la necesidad de transformar los resultados experimentales en prácticas agronómicas reproducibles y viables para los productores.

A pesar de los avances alcanzados, la eficacia de los productos bioactivos continúa presentando resultados variables entre especies, ambientes y sistemas de manejo. Una misma formulación puede ocasionar respuestas diferentes cuando cambian la variedad cultivada, las características del suelo, la dosis, la frecuencia de aplicación o la intensidad del estrés. Esta variabilidad dificulta la comparación directa entre investigaciones y limita la formulación de recomendaciones universales. Como advierte du Jardin (2015), la amplitud de categorías y mecanismos incluidos dentro de este campo exige una caracterización adecuada de los productos y de sus funciones. Bulgari et al. (2019) añaden que las respuestas observadas bajo condiciones adversas dependen de la interacción entre la composición aplicada y las características fisiológicas del cultivo, por lo que los resultados deben interpretarse considerando las condiciones específicas de cada estudio.

Las limitaciones descritas ponen de manifiesto la necesidad de integrar críticamente la evidencia disponible, diferenciar los efectos comprobados de las expectativas comerciales e identificar los factores que condicionan la eficacia de cada producto. También resulta necesario establecer protocolos de evaluación que permitan comparar composiciones, dosis y métodos de aplicación bajo condiciones controladas y de campo. La transición desde la experimentación hacia el uso productivo exige demostrar no solo la existencia de respuestas fisiológicas, sino también su estabilidad agronómica, viabilidad económica y compatibilidad con las prácticas habituales de manejo. Desde esta perspectiva, Rouphael y Colla (2020) consideran que la consolidación de estas soluciones dentro de la agricultura sostenible dependerá de la capacidad para vincular la investigación científica con aplicaciones prácticas suficientemente validadas.

En este contexto, la presente revisión sistemática tiene como objetivo analizar el estado del arte de los bioestimulantes naturales empleados en cultivos hortícolas, considerando sus principales categorías, mecanismos de acción y efectos sobre el crecimiento, la fisiología, la calidad y el rendimiento de las plantas. Asimismo, se pretende examinar su contribución a la tolerancia frente al estrés abiótico, identificar las condiciones que explican la variabilidad de los resultados y reconocer los principales vacíos de conocimiento. La síntesis de estos componentes permitirá establecer las tendencias actuales de investigación y valorar las perspectivas de incorporación de dichos insumos en sistemas hortícolas más eficientes, sostenibles y resilientes frente al cambio climático.

2. METODOLOGÍA

Diseño de la investigación

La investigación se desarrolló mediante una revisión sistemática de la literatura científica orientada a identificar, organizar y analizar la evidencia disponible sobre la aplicación de bioestimulantes naturales en cultivos hortícolas. El

procedimiento metodológico comprendió la formulación de la pregunta de investigación, la definición de las fuentes de información, el diseño de la estrategia de búsqueda, el establecimiento de los criterios de elegibilidad, la selección de los documentos, la extracción de los datos y la síntesis cualitativa de los hallazgos. Esta secuencia permitió examinar de manera estructurada los efectos de las formulaciones de origen natural sobre el crecimiento, la fisiología, el rendimiento, la calidad y la tolerancia de las especies hortícolas frente al estrés abiótico.

Diseño de la investigación

Se adoptó un diseño de revisión sistemática con enfoque cualitativo, debido a que el propósito del estudio consistió en integrar resultados procedentes de investigaciones con diferentes especies vegetales, formulaciones, dosis, métodos de aplicación, condiciones experimentales y variables de respuesta. Este enfoque permitió reconocer tendencias comunes, diferencias metodológicas y vacíos de conocimiento sin realizar una combinación estadística de los resultados. La diversidad de categorías comprendidas dentro del concepto de bioestimulante vegetal, así como la variedad de mecanismos fisiológicos atribuidos a estos productos, justificó la utilización de una síntesis interpretativa que considerara las particularidades de cada estudio. Como explica du Jardin (2015), este campo incluye sustancias y microorganismos con orígenes y funciones diferentes, lo que exige analizar la evidencia atendiendo tanto a la composición de los productos como a las respuestas específicas de los cultivos.

La planificación y presentación del proceso se orientaron mediante las recomendaciones de la declaración PRISMA 2020, cuyo propósito es fortalecer la transparencia y la reproducibilidad de las revisiones sistemáticas. Estas directrices proporcionaron una estructura para documentar las fuentes consultadas, las estrategias de búsqueda, los criterios de elegibilidad, las etapas de selección y los procedimientos de síntesis. Page et al. (2021) señalan que una revisión sistemática debe describir con claridad cómo fueron localizados, examinados y seleccionados los documentos, de manera que otros investigadores puedan comprender y reproducir el proceso. En correspondencia con estas recomendaciones, las decisiones adoptadas durante la identificación, el cribado y la evaluación de los textos completos fueron registradas de forma progresiva.

Estrategia de búsqueda bibliográfica

La búsqueda bibliográfica se realizó en Scopus, Web of Science, ScienceDirect, SpringerLink, PubMed y Google Scholar, debido a la cobertura que estas fuentes ofrecen en las áreas de agronomía, horticultura, fisiología vegetal, microbiología agrícola y ciencias ambientales. La consulta se complementó con tesis académicas, capítulos de libros y documentos técnicos relacionados con el empleo de productos naturales en la producción hortícola. Esta combinación permitió recuperar tanto investigaciones experimentales publicadas en revistas indexadas como documentos académicos relevantes para comprender la evolución conceptual y las aplicaciones agronómicas del campo. La inclusión de diferentes fuentes respondió a la necesidad de examinar una literatura caracterizada por su diversidad disciplinaria y metodológica.

La estrategia de recuperación combinó términos en español e inglés relacionados con el tipo de producto, el cultivo y las respuestas fisiológicas o agronómicas evaluadas. En inglés se utilizaron expresiones como plant biostimulants, natural biostimulants, horticultural crops, abiotic stress, seaweed extracts, humic substances, protein hydrolysates, microbial biostimulants, plant growth, crop yield y stress tolerance. En español se emplearon los términos bioestimulantes naturales, cultivos hortícolas, extractos de algas, sustancias húmicas, hidrolizados de proteínas, extractos vegetales, microorganismos promotores del crecimiento, rendimiento, calidad y estrés abiótico. Estas expresiones fueron seleccionadas considerando las principales categorías descritas en la literatura científica, entre las que Calvo et al. (2014) incluyen sustancias húmicas, extractos naturales y microorganismos capaces de favorecer el crecimiento y la nutrición vegetal.

Los descriptores se combinaron mediante los operadores booleanos AND y OR, adaptando la sintaxis a las características de cada base de datos. Entre las combinaciones empleadas se encontraron “plant biostimulants” AND “horticultural crops”, “natural biostimulants” AND “abiotic stress”, “seaweed extracts” AND “crop yield”, “microbial

biostimulants” AND “vegetable crops” y “bioestimulantes naturales” AND “cultivos hortícolas”. El operador OR se utilizó para integrar términos equivalentes o categorías relacionadas, mientras que AND permitió vincular el tipo de insumo con la especie, la condición ambiental o la variable de respuesta. El diseño de las ecuaciones buscó mantener un equilibrio entre la amplitud de la recuperación y la pertinencia temática de los documentos.

La búsqueda electrónica se complementó mediante la revisión manual de las listas de referencias de los artículos considerados relevantes. Esta estrategia permitió localizar investigaciones que no habían sido recuperadas mediante las ecuaciones iniciales debido a diferencias en la terminología empleada, la indexación o la antigüedad de las publicaciones. También se examinaron estudios clásicos que contribuyeron a establecer las bases conceptuales del área, como la revisión de Khan et al. (2009) sobre extractos de algas y el análisis de Calvo et al. (2014) acerca de los usos agrícolas de estos productos. Conforme a las recomendaciones de Page et al. (2021), las fuentes adicionales identificadas mediante búsqueda manual se incorporaron al mismo proceso de evaluación aplicado a los registros obtenidos en las bases de datos.

Criterios de inclusión y exclusión

Los criterios de elegibilidad se establecieron previamente para garantizar que los documentos seleccionados mantuvieran correspondencia con la pregunta y el objetivo de la revisión. Se incluyeron artículos científicos, revisiones, capítulos de libros, documentos técnicos y tesis académicas que analizaran el empleo de sustancias, extractos o microorganismos de origen natural en especies hortícolas. Se consideraron investigaciones desarrolladas en condiciones de campo, invernadero o ambientes controlados, siempre que proporcionaran información suficiente sobre el producto utilizado, la especie evaluada, el diseño experimental y los resultados obtenidos. También se incorporaron trabajos centrados en variables agronómicas, fisiológicas o bioquímicas relacionadas con el crecimiento, la nutrición, el rendimiento, la calidad, la eficiencia en el uso del agua y la tolerancia frente a factores ambientales adversos.

Dentro de las categorías elegibles se contemplaron los extractos de algas marinas, las sustancias húmicas, los aminoácidos, los hidrolizados de proteínas, los extractos vegetales y los microorganismos promotores del crecimiento. Esta delimitación se fundamentó en la clasificación propuesta por du Jardín (2015), quien diferencia los productos bioestimulantes de los fertilizantes y fitosanitarios a partir de su función sobre los procesos naturales de la planta. Asimismo, la revisión de Calvo et al. (2014) permitió reconocer la importancia de incluir tanto sustancias no microbianas como agentes biológicos capaces de mejorar la disponibilidad de nutrientes y el desempeño vegetal. De este modo, la selección no se limitó a una única clase de formulación, sino que contempló las principales categorías reportadas en la literatura especializada.

Se excluyeron los registros duplicados, las publicaciones sin información metodológica suficiente, los textos de divulgación carentes de respaldo científico y los documentos cuyo contenido completo no estuvo disponible. También se descartaron los trabajos centrados exclusivamente en fertilizantes convencionales, reguladores sintéticos del crecimiento o productos fitosanitarios cuya función principal fuera el control de plagas y enfermedades. Del mismo modo, no se incorporaron estudios realizados únicamente en cultivos extensivos cuando sus resultados no aportaban elementos conceptuales o metodológicos aplicables a la horticultura. Estas decisiones permitieron evitar la inclusión de productos que no cumplieran con la definición funcional adoptada y conservar la coherencia temática de la evidencia analizada.

Proceso de selección de los estudios

La selección de las publicaciones se desarrolló mediante las fases de identificación, cribado, elegibilidad e inclusión, de acuerdo con la estructura de PRISMA 2020. Durante la identificación se reunieron los registros recuperados en las bases de datos y en las fuentes documentales complementarias. Posteriormente, las referencias fueron organizadas para reconocer y eliminar duplicados antes de comenzar la evaluación temática. Page et al. (2021) recomiendan

informar de manera diferenciada los registros localizados, descartados e incluidos, debido a que esta trazabilidad permite valorar la amplitud de la búsqueda y la consistencia de las decisiones adoptadas.

En la fase de cribado se revisaron los títulos y resúmenes con el propósito de determinar su relación con la aplicación de formulaciones naturales en cultivos hortícolas. Los trabajos claramente desvinculados del objeto de estudio fueron excluidos durante esta etapa, mientras que aquellos cuya pertinencia no podía determinarse únicamente a partir del resumen avanzaron a la evaluación del texto completo. Este procedimiento permitió efectuar una primera depuración sin descartar prematuramente investigaciones potencialmente relevantes.

Durante la elegibilidad se efectuó la lectura íntegra de las publicaciones preseleccionadas y se verificó el cumplimiento de los criterios establecidos. La evaluación consideró la naturaleza del producto, la especie estudiada, las condiciones experimentales, las variables analizadas y la suficiencia de la información reportada. Se prestó especial atención a que los efectos atribuidos al tratamiento estuvieran respaldados por resultados fisiológicos, bioquímicos, productivos o de calidad. Finalmente, los documentos que cumplieron los requisitos fueron incorporados a la síntesis cualitativa y constituyeron la base documental de la revisión.

Extracción y organización de la información

La información de los documentos incluidos se sistematizó mediante una matriz de extracción elaborada para la investigación. Para cada publicación se registraron el autor, el año, el país o región, la especie hortícola, el tipo de producto evaluado, su origen o composición, la dosis, el método de aplicación, las condiciones experimentales, las variables analizadas y los principales resultados. También se recopiló las conclusiones de los autores y las limitaciones metodológicas identificadas, con el propósito de valorar la solidez y aplicabilidad de los hallazgos. Esta organización facilitó la comparación entre estudios que utilizaron tratamientos o indicadores diferentes.

Posteriormente, los datos se agruparon en categorías relacionadas con la clasificación de los insumos naturales, sus mecanismos de acción y sus efectos sobre el desarrollo de las plantas. Khan et al. (2009) permitieron delimitar la categoría correspondiente a los extractos de algas y sus compuestos bioactivos, mientras que Ertani et al. (2013) aportaron elementos para examinar los productos derivados de materiales vegetales. También se establecieron categorías vinculadas con microorganismos benéficos, sustancias húmicas, hidrolizados de proteínas, respuestas frente al estrés abiótico, rendimiento, calidad comercial y perspectivas de aplicación. La clasificación temática permitió identificar qué grupos han recibido mayor atención y cuáles permanecen insuficientemente estudiados.

Análisis de la evidencia científica

La evidencia se examinó mediante una síntesis narrativa de carácter descriptivo e interpretativo. No se realizó un metaanálisis debido a la heterogeneidad existente entre las especies, las formulaciones, las dosis, los métodos de aplicación, las condiciones ambientales y los indicadores utilizados. En una primera etapa se describieron las características generales de las investigaciones y, posteriormente, se compararon los resultados correspondientes a cada categoría temática. El análisis prestó atención a la consistencia de los efectos observados, las diferencias metodológicas y las condiciones que podrían explicar las variaciones entre estudios.

La interpretación también consideró los mecanismos fisiológicos y bioquímicos propuestos para explicar las respuestas de las plantas. Los hallazgos vinculados con la regulación hormonal, la actividad antioxidante, la nutrición y el crecimiento radicular se contrastaron con el marco conceptual presentado por Bulgari et al. (2019). De manera complementaria, los resultados relacionados con productividad y viabilidad agronómica se examinaron desde la perspectiva planteada por Rouphael y Colla (2020), quienes destacan la necesidad de vincular la evidencia experimental con aplicaciones consistentes bajo condiciones reales de cultivo.

Finalmente, la información se integró en una síntesis temática destinada a establecer el estado actual del conocimiento, los avances científicos, las limitaciones metodológicas y las perspectivas futuras. Este procedimiento permitió identificar las categorías de productos más estudiadas, las respuestas vegetales evaluadas con mayor frecuencia y los vacíos que dificultan la formulación de recomendaciones generales. La síntesis obtenida proporcionó

la base para discutir el potencial de estas soluciones dentro de sistemas hortícolas más eficientes, sostenibles y resilientes frente al cambio climático.

Nota: en la versión definitiva será necesario agregar el periodo exacto de búsqueda, el intervalo de años considerado y las cantidades de registros identificados, duplicados eliminados, textos completos evaluados y estudios incluidos. Estos datos son indispensables para completar correctamente el diagrama PRISMA 2020. La referencia de Page et al. (2021) también deberá incorporarse a la bibliografía final.

3. RESULTADOS

Caracterización general de los estudios incluidos

La evidencia seleccionada estuvo conformada por artículos científicos, revisiones especializadas, documentos técnicos y tesis académicas relacionados con el empleo de formulaciones naturales en cultivos hortícolas. Los trabajos analizados examinaron principalmente los mecanismos de acción de estos productos y sus efectos sobre el crecimiento, la nutrición, la productividad, la calidad y la tolerancia frente a condiciones ambientales adversas. La diversidad documental permitió integrar estudios experimentales desarrollados en campo, invernadero y ambientes controlados, junto con publicaciones conceptuales que contribuyeron a delimitar las categorías y funciones de estas sustancias. La clasificación formulada por du Jardin (2015) constituyó uno de los principales referentes para diferenciar estos insumos de los fertilizantes y productos fitosanitarios convencionales.

El análisis temporal mostró un crecimiento progresivo de las investigaciones durante las últimas décadas, con una intensificación visible a partir de 2015. Esta tendencia coincidió con el interés internacional por reducir la dependencia de insumos químicos, mejorar la eficiencia en el uso del agua y los nutrientes y fortalecer la adaptación de los sistemas agrícolas frente al cambio climático. Roupheal y Colla (2020) vinculan esta expansión con la necesidad de transformar los avances experimentales en aplicaciones agronómicas que contribuyan de manera efectiva a la sostenibilidad. Los estudios recientes ya no examinan estos productos únicamente como promotores del crecimiento, sino como componentes complementarios de estrategias integradas de nutrición, manejo del suelo y protección frente al estrés ambiental.

Las investigaciones se desarrollaron principalmente en especies de elevada importancia económica, entre las que destacaron tomate, lechuga, pepino, pimiento, espinaca, fresa y cebolla. También se identificaron trabajos efectuados en especies ornamentales y frutales, lo que amplió la comprensión de sus posibles aplicaciones dentro de la horticultura. Algunos estudios incluyeron cereales y otras plantas como modelos experimentales para examinar respuestas fisiológicas específicas. En este sentido, Ertani et al. (2013) evaluaron una formulación derivada de alfalfa en plantas de maíz y observaron modificaciones en parámetros metabólicos y fisiológicos; aunque no se trató de una especie hortícola, sus resultados aportaron información relevante sobre los mecanismos asociados con el crecimiento y la nutrición vegetal.

En cuanto a su procedencia, los productos examinados mostraron una amplia diversidad de materias primas y organismos. Las categorías con mayor presencia fueron los extractos de algas marinas, las sustancias húmicas, los aminoácidos, los hidrolizados de proteínas, los extractos vegetales y los microorganismos promotores del crecimiento. Calvo et al. (2014) señalan que esta diversidad explica la existencia de mecanismos de acción diferentes, relacionados con la absorción de nutrientes, la regulación hormonal, la actividad enzimática y la interacción entre las raíces y la microbiota del suelo. También se identificaron estudios sobre hongos micorrízicos y compuestos bioactivos obtenidos mediante procesos biotecnológicos, lo que demuestra una expansión progresiva de las fuentes empleadas para desarrollar nuevas formulaciones.

Las respuestas fisiológicas documentadas con mayor frecuencia comprendieron el desarrollo radicular, la acumulación de biomasa, la concentración de clorofila, la actividad fotosintética y la eficiencia en el uso del agua. Bulgari et al. (2019) observaron que estas modificaciones pueden contribuir a conservar el funcionamiento metabólico de los cultivos cuando se encuentran expuestos a factores ambientales desfavorables. Otros trabajos reportaron mejoras en la absorción de nutrientes y en la activación de mecanismos antioxidantes, efectos que pueden repercutir en la

estabilidad del crecimiento y del rendimiento. Sin embargo, la intensidad de las respuestas varió de acuerdo con la especie, el tipo de producto, la dosis, el momento de aplicación y las condiciones experimentales.

Una tendencia emergente correspondió a la incorporación de herramientas moleculares para explicar los cambios producidos en las plantas. Los estudios más recientes emplearon técnicas transcriptómicas, proteómicas y metabolómicas con el propósito de identificar modificaciones en la expresión génica, la síntesis de proteínas y la producción de metabolitos. Estos enfoques permitieron superar las evaluaciones centradas exclusivamente en características visibles, como la altura o la biomasa, y profundizar en las rutas metabólicas involucradas en la respuesta vegetal. Rouphael y Colla (2020) consideran que la comprensión de estos mecanismos resulta indispensable para avanzar hacia formulaciones más específicas y con efectos agronómicos reproducibles.

Entre los factores de estrés analizados predominaron la sequía, la salinidad, las temperaturas extremas y las deficiencias nutricionales. La exposición a estas condiciones puede reducir la actividad fotosintética, alterar el equilibrio hídrico y favorecer la acumulación de especies reactivas de oxígeno. Frente a estas alteraciones, Bulgari et al. (2019) documentaron que determinados productos de origen natural pueden fortalecer los mecanismos antioxidantes y contribuir al mantenimiento de la estabilidad fisiológica. Los resultados revisados también mostraron efectos relacionados con el ajuste osmótico, la conservación de pigmentos fotosintéticos y el desarrollo de sistemas radiculares capaces de explorar un mayor volumen de suelo.

Desde el punto de vista metodológico, se identificó una considerable heterogeneidad entre las investigaciones. Las dosis, concentraciones, frecuencias y vías de aplicación variaron ampliamente, pues algunos productos fueron suministrados de manera foliar, mientras que otros se incorporaron al suelo, al agua de riego o a las soluciones nutritivas. Esta diversidad dificultó la comparación directa de los resultados y limitó la posibilidad de establecer recomendaciones aplicables a diferentes cultivos. Du Jardin (2015) ya advertía que la amplitud de categorías incluidas dentro de este campo exige una caracterización precisa de la composición y función de cada producto. Por ello, la estandarización de los protocolos continúa siendo uno de los principales desafíos de la investigación.

En conjunto, la evidencia analizada mostró que estas soluciones naturales poseen un potencial significativo para fortalecer la productividad y sostenibilidad de los sistemas hortícolas. No obstante, los resultados también evidenciaron la necesidad de realizar ensayos de mayor duración, validar los efectos bajo condiciones comerciales y establecer protocolos específicos para cada especie. Rouphael y Colla (2020) sostienen que la transición desde los resultados experimentales hacia aplicaciones prácticas requiere demostrar la consistencia de los beneficios en diferentes ambientes. En consecuencia, el desarrollo futuro deberá integrar la caracterización química de las formulaciones con evaluaciones fisiológicas, productivas, económicas y ambientales.

Tabla 1.

Características generales de los principales estudios incluidos

Autor y año	Tipo de documento	Categoría analizada	Cultivo o ámbito de aplicación	Principal contribución
Khan et al. (2009)	Revisión	Extractos de algas marinas	Diversos cultivos	Describe su composición y sus efectos sobre el crecimiento y la tolerancia al estrés. Evidencia cambios favorables en la biomasa, los pigmentos y la actividad metabólica.
Ertani et al. (2013)	Estudio experimental	Derivado vegetal de alfalfa	Maíz como modelo fisiológico	

Autor y año	Tipo de documento	Categoría analizada	Cultivo o ámbito de aplicación	Principal contribución
Calvo et al. (2014)	Revisión	Sustancias y microorganismos promotores	Aplicaciones agrícolas generales	Sistematiza las principales categorías, funciones y aplicaciones agrícolas. Propone una definición funcional y una clasificación ampliamente empleada. Analiza los mecanismos fisiológicos relacionados con la respuesta al estrés. Examina la transición desde la evidencia experimental hacia aplicaciones sostenibles. Analiza respuestas fisiológicas y moleculares relacionadas con la adaptación. Sintetiza los efectos frente a la sequía, salinidad y temperaturas extremas. Examina los mecanismos de acción y el desempeño de estos agentes en campo. Analiza el uso de corrientes residuales para desarrollar bioproductos agrícolas sostenibles.
du Jardin (2015)	Revisión conceptual	Definición, clasificación y regulación	Producción vegetal	
Bulgari et al. (2019)	Revisión	Tolerancia al estrés abiótico	Cultivos hortícolas	
Rouphael y Colla (2020)	Revisión	Aplicaciones agronómicas	Agricultura y horticultura	
“Plant Biostimulants and Crop Stress Tolerance” (2021)	Revisión	Tolerancia al estrés	Diversos cultivos	
“Abiotic Stress and Biostimulants in Horticultural Crops” (2022)	Revisión	Estrés abiótico	Cultivos hortícolas	
“Microbial Biostimulants for Horticultural Crops” (2023)	Revisión	Microorganismos benéficos	Cultivos hortícolas	
Priya et al. (2023)	Revisión crítica	Productos agrícolas de base biológica	Economía circular y aprovechamiento de residuos	

Nota. La tabla presenta las características de los principales estudios utilizados para estructurar la revisión y no incluye la totalidad de los documentos identificados durante la búsqueda bibliográfica.

Clasificación de los bioestimulantes naturales

Los productos naturales identificados en la revisión fueron clasificados de acuerdo con su origen, composición y mecanismo predominante de acción. Las principales categorías incluyeron extractos de algas, sustancias húmicas, aminoácidos e hidrolizados de proteínas, microorganismos benéficos y extractos obtenidos de distintas fuentes

vegetales. Aunque estos grupos presentan características diferentes, comparten la capacidad de estimular procesos naturales relacionados con la nutrición, el crecimiento, la calidad y la tolerancia frente al estrés. Du Jardin (2015) establece que su función principal no consiste en aportar nutrientes en cantidades convencionales, sino en mejorar la eficiencia de los procesos fisiológicos que permiten a la planta aprovechar los recursos disponibles.

Extractos de algas marinas

Los extractos de algas marinas constituyeron una de las categorías más estudiadas y utilizadas en la producción hortícola. Estas formulaciones pueden contener polisacáridos, aminoácidos, minerales, vitaminas y compuestos con actividad semejante a determinadas hormonas vegetales. Entre las materias primas mencionadas con mayor frecuencia se encontraron *Ascophyllum nodosum*, *Ecklonia maxima* y especies pertenecientes al género *Sargassum*. La composición final depende de la especie utilizada, el ambiente de procedencia y el método de extracción, factores que también pueden modificar su actividad fisiológica y explicar las diferencias observadas entre productos comerciales.

Khan et al. (2009) señalaron que los compuestos presentes en las algas pueden favorecer la división celular, el crecimiento de las raíces y la acumulación de clorofila. Estas respuestas contribuyen a incrementar la superficie de absorción y a conservar la actividad fotosintética durante el desarrollo del cultivo. Los autores también describieron efectos sobre la regulación del metabolismo vegetal y la producción de compuestos relacionados con las respuestas defensivas. Por esta razón, su aplicación se ha extendido en especies hortícolas en las que se busca mejorar simultáneamente el crecimiento, la calidad y la estabilidad productiva.

Los resultados también mostraron que los extractos marinos pueden fortalecer la tolerancia frente a sequía, salinidad y temperaturas desfavorables. Bulgari et al. (2019) relacionan este efecto con la activación de enzimas antioxidantes, la regulación hormonal y el mantenimiento del equilibrio hídrico de los tejidos. Sin embargo, los beneficios no fueron uniformes en todos los estudios, debido a que dependieron de la concentración aplicada, la etapa fenológica y las condiciones ambientales. Esta variabilidad pone de manifiesto la necesidad de caracterizar cada formulación y establecer dosis específicas para las distintas especies hortícolas.

Sustancias húmicas y ácidos fúlvicos

Las sustancias húmicas conformaron otro grupo relevante dentro de los estudios seleccionados. Se originan durante los procesos de transformación y descomposición de la materia orgánica y comprenden principalmente ácidos húmicos y fúlvicos. Su aplicación puede modificar favorablemente las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, al tiempo que influye sobre la arquitectura radicular y la absorción de nutrientes. Calvo et al. (2014) explican que estos compuestos pueden actuar tanto sobre la disponibilidad de elementos minerales como sobre procesos fisiológicos de la planta, razón por la cual su función supera la de una enmienda orgánica convencional.

La evidencia revisada indicó que estas sustancias favorecen la formación y elongación de raíces, incrementando la superficie disponible para captar agua y nutrientes. También pueden estimular enzimas y transportadores relacionados con la nutrición mineral, lo cual mejora el aprovechamiento del nitrógeno, fósforo, potasio y determinados micronutrientes. Rouphael y Colla (2020) destacan que este efecto adquiere especial importancia en sistemas hortícolas intensivos, donde la eficiencia de la fertilización resulta fundamental para conservar la productividad y reducir las pérdidas de nutrientes hacia el ambiente.

Los beneficios asociados con la retención de agua y la capacidad de intercambio catiónico también explican su interés en condiciones de estrés hídrico o degradación del suelo. Al favorecer un ambiente radicular más estable, los ácidos húmicos y fúlvicos pueden contribuir indirectamente al mantenimiento de la actividad fisiológica de los cultivos. No obstante, la magnitud de la respuesta depende del origen de la materia prima, del método de obtención y de la concentración empleada. Por ello, Calvo et al. (2014) advierten que los resultados deben interpretarse considerando las características químicas particulares de cada producto.

Aminoácidos e hidrolizados de proteínas

Los aminoácidos y los hidrolizados de proteínas representaron una fuente importante de péptidos y moléculas orgánicas capaces de intervenir en diferentes rutas metabólicas. Estas formulaciones pueden obtenerse a partir de materiales vegetales o animales mediante procedimientos químicos, enzimáticos o térmicos. Sus componentes participan en la síntesis de proteínas, enzimas y metabolitos secundarios, además de influir sobre la nutrición y el crecimiento. La respuesta producida depende tanto del origen del material como del tamaño y composición de los péptidos generados durante la hidrólisis.

Ertani et al. (2013) observaron que una formulación derivada de alfalfa incrementó la biomasa, el contenido de pigmentos y la actividad de enzimas relacionadas con el metabolismo vegetal. Estos resultados permitieron demostrar que los hidrolizados no actúan únicamente como fuentes de nitrógeno orgánico, sino también como moduladores de procesos fisiológicos. En los cultivos hortícolas, sus posibles beneficios se han asociado con un mayor desarrollo radicular, una mejor actividad fotosintética y una recuperación más rápida después de periodos de estrés.

La literatura también relacionó los aminoácidos con el ajuste osmótico y la protección de las estructuras celulares. Bajo condiciones de sequía o salinidad, determinadas moléculas orgánicas pueden contribuir a conservar el agua en los tejidos y estabilizar proteínas y membranas. Bulgari et al. (2019) indican que estos mecanismos forman parte de una respuesta integrada frente al estrés abiótico, en la que intervienen la regulación hormonal, el metabolismo antioxidante y la acumulación de osmoprotectores. Sin embargo, se requieren investigaciones adicionales que determinen qué fracciones peptídicas producen los efectos más consistentes en cada especie.

Bioestimulantes microbianos

Los productos microbianos incluyeron bacterias promotoras del crecimiento vegetal, hongos micorrícicos arbusculares y otros microorganismos capaces de establecer relaciones favorables con las raíces. Estas asociaciones pueden mejorar la disponibilidad y absorción de nutrientes, estimular el crecimiento radical y fortalecer la respuesta de las plantas frente a condiciones adversas. Calvo et al. (2014) reconocen a los microorganismos benéficos como una categoría relevante debido a su capacidad para intervenir simultáneamente en la nutrición, el desarrollo y la interacción de la planta con el suelo.

Entre los mecanismos descritos se encontraron la fijación biológica de nitrógeno, la solubilización de fósforo, la producción de fitohormonas y la síntesis de sideróforos. Algunas bacterias también pueden modificar la arquitectura de las raíces y favorecer la formación de pelos absorbentes, incrementando el volumen de suelo explorado. La revisión sobre estimulantes microbianos en horticultura sostiene que estos organismos pueden mejorar la eficiencia en el uso del agua y de los nutrientes, aunque su desempeño en campo se encuentra condicionado por el suelo, el clima, el cultivo y la capacidad de colonización de las cepas utilizadas (“Microbial Biostimulants for Horticultural Crops”, 2023). Los estudios recientes también analizaron su participación en la regulación de genes relacionados con el estrés, la defensa y el metabolismo antioxidante. Estas modificaciones pueden favorecer una respuesta más rápida frente a la sequía, la salinidad o las deficiencias nutricionales. No obstante, los resultados obtenidos en ambientes controlados no siempre se reproducen con la misma intensidad en condiciones comerciales, debido a la competencia con las comunidades microbianas nativas. En consecuencia, el desarrollo de inoculantes eficaces requiere seleccionar cepas adaptadas a las características de cada suelo y sistema productivo.

Extractos vegetales y nuevas fuentes naturales

Los extractos vegetales constituyeron una categoría en expansión debido a la diversidad de compuestos bioactivos que pueden obtenerse de hojas, tallos, semillas, raíces y subproductos agrícolas. Estas materias primas contienen metabolitos secundarios, compuestos fenólicos, flavonoides, polisacáridos y antioxidantes con capacidad para intervenir en la regulación del crecimiento y la respuesta al estrés. A diferencia de las formulaciones tradicionales, las nuevas líneas de investigación buscan identificar moléculas específicas y establecer procesos de extracción que conserven su actividad biológica.

Priya et al. (2023) resalta el potencial de las fuentes vegetales renovables para desarrollar productos con mayor estabilidad, concentración y uniformidad entre lotes. Esta necesidad resulta especialmente importante porque la composición de un extracto puede variar según la especie, el tejido utilizado, la etapa de desarrollo y el procedimiento de obtención. La estandarización química y biológica constituye, por tanto, una condición fundamental para garantizar que las respuestas observadas en los ensayos puedan reproducirse posteriormente en condiciones productivas.

El aprovechamiento de residuos agroindustriales también apareció como una alternativa vinculada con la economía circular. La transformación de subproductos vegetales en formulaciones de uso agrícola permite recuperar compuestos bioactivos y reducir la cantidad de residuos destinados a eliminación. Además de sus posibles beneficios fisiológicos, esta estrategia puede disminuir los costos de las materias primas y fortalecer la sostenibilidad de las cadenas agroalimentarias. Sin embargo, antes de su aplicación deben evaluarse la inocuidad, la estabilidad, la composición y la ausencia de sustancias potencialmente perjudiciales.

En conjunto, la clasificación obtenida mostró que las distintas categorías presentan mecanismos complementarios y no necesariamente excluyentes. Mientras los extractos marinos y vegetales actúan principalmente mediante compuestos bioactivos, las sustancias húmicas influyen sobre el suelo y la nutrición, y los microorganismos intervienen en las relaciones entre la raíz y la rizosfera. Du Jardin (2015) señala que esta diversidad representa una fortaleza, pero también un desafío para la regulación y evaluación de los productos. La selección de una formulación debe considerar la especie cultivada, el objetivo agronómico, el ambiente y las prácticas de manejo, evitando asumir que todos los productos generarán respuestas equivalentes.

Tabla 2.

Clasificación de los principales bioestimulantes naturales utilizados en horticultura

Tipo de bioestimulante	Origen o componentes	Principales mecanismos de acción	Beneficios en cultivos hortícolas
Extractos de algas marinas	Especies de los géneros <i>Ascophyllum</i> , <i>Ecklonia</i> y <i>Sargassum</i>	Regulación hormonal, estimulación de la fotosíntesis y activación de mecanismos antioxidantes	Mayor crecimiento, rendimiento y tolerancia frente al estrés abiótico
Sustancias húmicas y ácidos fúlvicos	Materia orgánica humificada	Estimulación radicular, mejora de la disponibilidad de nutrientes y modificación de las propiedades del suelo	Incremento del crecimiento y de la eficiencia nutricional e hídrica
Aminoácidos e hidrolizados de proteínas	Proteínas vegetales o animales sometidas a hidrólisis	Activación metabólica, síntesis proteica, regulación enzimática y ajuste osmótico	Mayor desarrollo vegetativo y recuperación frente a condiciones adversas
Bioestimulantes microbianos	Bacterias promotoras del crecimiento, hongos micorrícicos y otros microorganismos benéficos	Producción de fitohormonas, fijación de nitrógeno, solubilización de fósforo y estimulación de las raíces	Mejor absorción de nutrientes y mayor resistencia frente al estrés
Extractos vegetales y subproductos agroindustriales	Plantas superiores, biomasa y residuos de origen vegetal	Aporte de compuestos fenólicos, antioxidantes, polisacáridos y otros metabolitos secundarios	Estimulación fisiológica, protección celular y aprovechamiento sostenible de residuos

Nota. La clasificación se elaboró a partir de du Jardin (2015), Calvo et al. (2014), Khan et al. (2009), Ertani et al. (2013), Bulgari et al. (2019) y Roupheal y Colla (2020).

Efectos de los bioestimulantes naturales sobre el crecimiento y desarrollo de cultivos hortícolas

El crecimiento y el desarrollo de los cultivos hortícolas dependen de la interacción entre factores genéticos, fisiológicos y ambientales que regulan la división celular, la elongación de los tejidos, la absorción de nutrientes y la acumulación de biomasa. En este contexto, los productos naturales con actividad bioestimulante pueden actuar como moduladores del metabolismo vegetal y favorecer el establecimiento de las plantas desde las primeras etapas del ciclo productivo. Du Jardin (2015) explica que su acción no se limita al aporte de compuestos nutritivos, sino que comprende la estimulación de procesos relacionados con la eficiencia nutricional, el crecimiento y la calidad. Esta función resulta especialmente relevante en horticultura, donde el desarrollo equilibrado de las raíces y de la parte aérea condiciona tanto el rendimiento como las características comerciales de la cosecha.

Uno de los efectos documentados con mayor frecuencia corresponde a la modificación de la arquitectura radicular. La aplicación de determinadas formulaciones puede favorecer la elongación de las raíces principales, la aparición de raíces laterales y el aumento de la densidad de pelos absorbentes. Estas modificaciones amplían el volumen de suelo explorado y permiten aprovechar con mayor eficiencia el agua y los nutrientes disponibles. Ertani et al. (2013) observaron que un producto derivado de alfalfa produjo cambios favorables en parámetros fisiológicos y metabólicos relacionados con el crecimiento de las plantas. Aunque el estudio fue realizado en maíz, sus resultados aportaron información sobre mecanismos que posteriormente han sido examinados en especies hortícolas.

El desarrollo de un sistema radicular más amplio también repercute sobre la nutrición mineral, debido a que incrementa la superficie de contacto entre la planta y el suelo. Rouphael y Colla (2020) señalan que estas formulaciones pueden mejorar la eficiencia en el uso de nutrientes mediante la estimulación de transportadores, enzimas y procesos metabólicos vinculados con la absorción y asimilación de elementos minerales. Este efecto adquiere particular importancia en sistemas intensivos de producción, donde se busca mantener el rendimiento reduciendo las pérdidas de nitrógeno, fósforo y otros nutrientes. Sin embargo, una mayor actividad radicular no sustituye completamente la fertilización, sino que permite aprovechar mejor los recursos disponibles cuando el programa nutricional se encuentra adecuadamente planificado.

La evidencia analizada también mostró respuestas favorables en el crecimiento de la parte aérea. Entre las modificaciones registradas se encontraron un mayor número de hojas, una expansión foliar más amplia, un incremento del diámetro del tallo y una mayor acumulación de materia fresca y seca. Calvo et al. (2014) relacionan estas respuestas con la interacción de diferentes mecanismos, entre ellos la regulación del metabolismo, el mejoramiento de la nutrición y la estimulación de procesos fisiológicos asociados con el desarrollo vegetal. La intensidad de los efectos varió entre estudios, lo que indica que el crecimiento observado depende de la composición del producto, la especie, la concentración y el momento de aplicación.

Los extractos de algas marinas aparecieron entre los insumos más estudiados para estimular el establecimiento y el vigor vegetativo. Khan et al. (2009) documentaron que estos productos contienen diversos compuestos bioactivos capaces de influir sobre la división celular, el crecimiento radicular y la producción de pigmentos. Su actividad no debe atribuirse exclusivamente a la presencia directa de fitohormonas, pues también puede involucrar polisacáridos, minerales, aminoácidos y moléculas capaces de modular las rutas hormonales propias de la planta. La acción conjunta de estos componentes puede favorecer el desarrollo foliar y la formación de estructuras reproductivas, aunque la respuesta depende del procedimiento utilizado para obtener el extracto y de su composición final.

La actividad fotosintética constituyó otro de los procesos favorecidos por la aplicación de determinados agentes naturales. Bulgari et al. (2019) señalan que el mantenimiento de la concentración de clorofila y de la eficiencia fotoquímica permite conservar la fijación de carbono y la producción de carbohidratos necesarios para el crecimiento. Algunas investigaciones reportaron incrementos en los pigmentos fotosintéticos y una mayor estabilidad del aparato fotosintético, especialmente cuando las plantas estuvieron sometidas a condiciones ambientales adversas. Estas respuestas pueden contribuir a sostener el desarrollo de hojas, tallos, flores y frutos durante etapas en las que el estrés normalmente reduciría la actividad metabólica.

La protección del aparato fotosintético se encuentra estrechamente relacionada con la capacidad antioxidante de las plantas. Zhang y Schmidt (2000) observaron que ciertos productos con actividad hormonal modificaron el estado antioxidante de especies de césped, reduciendo el deterioro asociado con condiciones desfavorables. Aunque estas especies no pertenecen al grupo de cultivos hortícolas, los resultados contribuyeron a explicar cómo la activación de enzimas y compuestos antioxidantes puede proteger los pigmentos y las membranas celulares. En horticultura, este mecanismo adquiere relevancia porque la conservación de la integridad celular favorece la continuidad del crecimiento y limita la reducción de la productividad causada por el estrés oxidativo.

Las modificaciones en el crecimiento también pueden estar relacionadas con la regulación de las rutas hormonales. Algunos extractos vegetales, hidrolizados de proteínas y productos marinos contienen moléculas capaces de estimular o modular procesos asociados con auxinas, citocininas, giberelinas y ácido abscísico. Du Jardin (2015) sostiene que estas interacciones permiten explicar parte de las respuestas observadas en la formación de raíces, la elongación de los tejidos y la adaptación frente a condiciones adversas. No obstante, la actividad hormonal debe evaluarse con cautela, debido a que la composición de los productos puede variar y una respuesta fisiológica semejante no demuestra necesariamente la presencia directa de una hormona determinada.

La mayor producción de biomasa representa el resultado integrado de los cambios ocurridos en el sistema radicular, la nutrición, la fotosíntesis y la regulación metabólica. Ertani et al. (2013) encontraron que la aplicación de una formulación vegetal incrementó la acumulación de biomasa y la actividad de enzimas relacionadas con el metabolismo. En los cultivos hortícolas, estos efectos pueden expresarse como un establecimiento más rápido, mayor superficie foliar y mejor formación de órganos comerciales. Sin embargo, el aumento del crecimiento vegetativo no siempre garantiza un incremento proporcional del rendimiento, especialmente cuando existe un desequilibrio entre el desarrollo de la parte aérea y la formación de frutos u otros órganos cosechables.

Desde el punto de vista bioquímico, los productos evaluados pueden modificar la actividad de enzimas relacionadas con el metabolismo del nitrógeno, la respiración celular y la protección antioxidante. Bulgari et al. (2019) indican que estas respuestas favorecen la acumulación de aminoácidos, proteínas solubles y metabolitos secundarios que intervienen tanto en el crecimiento como en la defensa vegetal. La interacción entre estos cambios metabólicos y las respuestas morfológicas explica por qué los efectos no deben evaluarse únicamente mediante la altura o el peso de las plantas. Una caracterización más completa requiere integrar indicadores fisiológicos, bioquímicos y productivos.

La magnitud de las respuestas estuvo condicionada por la especie, el cultivar, la etapa fenológica, la dosis y las condiciones de manejo. Rouphael y Colla (2020) advierten que los resultados obtenidos con una formulación determinada no pueden generalizarse automáticamente a otros cultivos o ambientes. Mientras algunos estudios informaron aumentos importantes del crecimiento y la biomasa, otros mostraron efectos moderados o dependientes de la presencia de estrés. Esta variabilidad confirma la necesidad de establecer protocolos específicos y realizar ensayos en condiciones comerciales que permitan determinar la dosis, frecuencia y vía de aplicación más apropiadas. En síntesis, la evidencia mostró que estas formulaciones pueden favorecer el crecimiento de los cultivos hortícolas mediante mecanismos interrelacionados. El desarrollo radicular, la eficiencia nutricional, la conservación de la actividad fotosintética, la regulación metabólica y la protección antioxidante contribuyen conjuntamente al establecimiento y vigor de las plantas. Calvo et al. (2014) destacan que la utilidad agronómica de estos productos reside precisamente en su capacidad para intervenir en múltiples procesos naturales. No obstante, su incorporación en los programas de manejo debe sustentarse en la caracterización de cada formulación y en resultados experimentales obtenidos para la especie y el ambiente donde será utilizada.

Tabla 3.

Principales efectos fisiológicos de los bioestimulantes naturales en cultivos hortícolas

Variable fisiológica	Efecto observado	Categorías asociadas
Desarrollo radicular	Incremento de la longitud, el volumen, la ramificación y la densidad de pelos absorbentes	Extractos de algas, sustancias húmicas e hidrolizados de proteínas

Variable fisiológica	Efecto observado	Categorías asociadas
Absorción de nutrientes	Mayor eficiencia en la captación y asimilación de nitrógeno, fósforo, potasio y micronutrientes	Sustancias húmicas y productos microbianos
Actividad fotosintética	Incremento o conservación del contenido de clorofila, la eficiencia fotoquímica y la fijación de carbono	Extractos de algas y formulaciones vegetales
Regulación hormonal	Modulación de rutas relacionadas con auxinas, citocininas, giberelinas y ácido abscísico	Extractos de algas e hidrolizados de proteínas
Producción de biomasa	Mayor crecimiento de la parte aérea y radical y aumento de la acumulación de materia seca	Hidrolizados de proteínas y extractos vegetales
Actividad antioxidante	Activación de enzimas antioxidantes y reducción del daño oxidativo celular	Extractos de algas, formulaciones vegetales y productos microbianos

Nota. La síntesis se elaboró a partir de Khan et al. (2009), Ertani et al. (2013), Calvo et al. (2014), du Jardin (2015), Bulgari et al. (2019) y Rouphael y Colla (2020). Los efectos pueden variar según la especie, la composición del producto, la dosis, el método de aplicación y las condiciones ambientales.

Bioestimulantes naturales y tolerancia al estrés abiótico

Uno de los principales aportes de los bioestimulantes naturales en la horticultura corresponde a su capacidad para fortalecer las respuestas de las plantas frente a condiciones ambientales desfavorables. La sequía, la salinidad, las temperaturas extremas, las deficiencias nutricionales y la radiación excesiva alteran procesos como la fotosíntesis, la respiración, la absorción de nutrientes y el equilibrio hídrico. Bulgari et al. (2019) señalan que determinadas formulaciones pueden reducir la intensidad de estas alteraciones mediante la activación de mecanismos fisiológicos y bioquímicos relacionados con la protección celular. Su aplicación no elimina el factor de estrés, pero puede ayudar a que los cultivos mantengan un funcionamiento más estable durante los periodos críticos.

Las respuestas observadas comprenden cambios en la arquitectura radicular, la regulación estomática, la acumulación de osmoprotectores y la actividad antioxidante. Rouphael y Colla (2020) explican que estos mecanismos pueden actuar de manera simultánea y favorecer un uso más eficiente del agua y los nutrientes. La intensidad de la respuesta depende de la especie, la formulación, la dosis y el momento de aplicación, así como de la duración y severidad del estrés. Por ello, los beneficios documentados en condiciones controladas deben confirmarse mediante ensayos de campo antes de establecer recomendaciones para los productores.

Respuesta frente al estrés hídrico

El déficit hídrico constituye uno de los factores que más afectan el desarrollo de los cultivos hortícolas. La reducción del agua disponible limita la expansión celular, disminuye la absorción de nutrientes y provoca el cierre de los estomas, lo que reduce el intercambio gaseoso y la actividad fotosintética. Estas alteraciones también favorecen la generación de especies reactivas de oxígeno, capaces de ocasionar daños en las membranas y en los pigmentos. Bulgari et al. (2019) destacan que el empleo de determinadas formulaciones naturales puede atenuar estos efectos al fortalecer los mecanismos de protección fisiológica y antioxidante.

Una de las respuestas más relevantes corresponde al desarrollo de un sistema radicular capaz de explorar un mayor volumen de suelo. Los extractos de algas, las sustancias húmicas y algunos hidrolizados pueden favorecer la elongación y ramificación de las raíces, aumentando las posibilidades de captar agua durante periodos de disponibilidad limitada. Calvo et al. (2014) explican que estas modificaciones también incrementan la superficie de contacto con los nutrientes presentes en la solución del suelo. Como resultado, las plantas pueden conservar durante más tiempo su actividad

metabólica, aunque la eficacia del tratamiento depende de que se aplique antes de que el daño hídrico alcance niveles irreversibles.

Otro mecanismo importante es el ajuste osmótico, proceso mediante el cual las células acumulan aminoácidos, azúcares y otros solutos compatibles que contribuyen a conservar el agua y la estabilidad de las estructuras celulares. La literatura también reporta modificaciones en la regulación estomática y en la eficiencia del uso del agua. De acuerdo con Bulgari et al. (2019), estos cambios pueden ayudar a mantener la fotosíntesis y reducir la pérdida de agua por transpiración. No obstante, una regulación estomática excesiva también puede limitar la fijación de carbono, por lo que el beneficio depende del equilibrio alcanzado por la planta.

Tolerancia a la salinidad

La salinidad representa una limitación importante en regiones áridas y semiáridas, así como en sistemas donde se utilizan aguas de riego con concentraciones elevadas de sales. Inicialmente, este estrés dificulta la absorción de agua debido a la reducción del potencial osmótico del suelo; posteriormente, la acumulación de sodio y cloro puede ocasionar toxicidad y desequilibrios nutricionales. Estas alteraciones afectan el crecimiento de las raíces, la fotosíntesis y la formación de los órganos comerciales, reduciendo el rendimiento y la calidad de frutas y hortalizas.

La aplicación de extractos naturales, sustancias húmicas y productos formulados con aminoácidos puede contribuir a conservar el equilibrio iónico y osmótico de las células. Rouphael y Colla (2020) indican que estos insumos favorecen la eficiencia nutricional y pueden limitar parcialmente los efectos negativos de la acumulación de sales. La protección se relaciona con el mantenimiento de una proporción más adecuada entre potasio y sodio, la acumulación de osmoprotectores y la activación de mecanismos antioxidantes. Sin embargo, los tratamientos no sustituyen las prácticas de manejo de la salinidad, como el drenaje, la selección de agua de riego y el monitoreo de la conductividad eléctrica.

Los microorganismos benéficos también pueden favorecer la adaptación a ambientes salinos mediante su interacción con el sistema radicular. Algunas bacterias promotoras del crecimiento producen sustancias relacionadas con la regulación hormonal, mejoran la disponibilidad de nutrientes y estimulan el desarrollo de las raíces. Calvo et al. (2014) reconocen que los agentes microbianos pueden modificar favorablemente la nutrición y el crecimiento de las plantas. No obstante, su desempeño depende de la capacidad de las cepas para establecerse y conservar su actividad en suelos con elevada concentración de sales.

Respuesta frente a temperaturas extremas

Las temperaturas elevadas alteran la estabilidad de las membranas, incrementan la respiración y pueden reducir la eficiencia fotosintética de los cultivos. Los episodios de frío, por su parte, afectan la fluidez de las membranas, disminuyen la actividad enzimática y pueden causar lesiones en los tejidos. Estas condiciones resultan particularmente perjudiciales durante la germinación, la floración y la formación de frutos, etapas en las que pequeñas alteraciones térmicas pueden provocar reducciones significativas del rendimiento.

Algunos extractos de algas y formulaciones vegetales pueden favorecer la conservación de pigmentos y la activación de enzimas antioxidantes durante los episodios térmicos. Zhang y Schmidt (2000) observaron que productos con actividad hormonal modificaron el estado antioxidante de las plantas y contribuyeron a reducir el deterioro fisiológico provocado por condiciones adversas. Aunque el estudio fue realizado en especies de césped, sus resultados ayudaron a explicar la relación entre regulación hormonal, protección antioxidante y estabilidad fisiológica.

La respuesta frente a temperaturas extremas también puede involucrar proteínas asociadas con la protección celular, modificaciones en la composición de las membranas y acumulación de metabolitos compatibles. Bulgari et al. (2019) señalan que estos mecanismos contribuyen a conservar la funcionalidad del aparato fotosintético y a reducir el daño oxidativo. Sin embargo, la evidencia disponible en especies hortícolas todavía presenta diferencias metodológicas importantes, por lo que se requieren estudios que comparen formulaciones y dosis bajo eventos térmicos de distinta intensidad y duración.

Mitigación del estrés nutricional

Las deficiencias de nitrógeno, fósforo, potasio y micronutrientes limitan la formación de proteínas, pigmentos y compuestos necesarios para el metabolismo energético. En los cultivos hortícolas, estas carencias pueden expresarse mediante clorosis, reducción del crecimiento, baja formación de frutos y disminución de la calidad comercial. Los problemas nutricionales no siempre se originan por la ausencia del elemento en el suelo, sino también por condiciones de pH, humedad o temperatura que restringen su disponibilidad y absorción.

Las sustancias húmicas pueden favorecer la disponibilidad de determinados elementos minerales y estimular la formación de raíces. Rouphael y Colla (2020) relacionan estos efectos con una mayor eficiencia en la captación y asimilación de nutrientes. Los microorganismos promotores del crecimiento también intervienen mediante procesos como la fijación biológica de nitrógeno, la solubilización de fósforo y la producción de sideróforos. Estas funciones pueden mejorar el acceso de las plantas a los recursos presentes en el suelo, especialmente cuando su disponibilidad se encuentra limitada.

Calvo et al. (2014) señalan que una de las principales funciones de estos productos consiste en optimizar la eficiencia nutricional, lo que puede permitir un ajuste más racional de los programas de fertilización. Sin embargo, esto no significa que sustituyan completamente los fertilizantes minerales. Su utilización debe integrarse con análisis del suelo, diagnóstico foliar y requerimientos específicos del cultivo, evitando reducciones generalizadas de la fertilización que puedan comprometer la productividad.

Activación de mecanismos antioxidantes

La acumulación de especies reactivas de oxígeno constituye una respuesta común frente a la sequía, la salinidad, las temperaturas extremas y las deficiencias nutricionales. En concentraciones moderadas, estas moléculas participan en la señalización celular; sin embargo, cuando su producción supera la capacidad defensiva de la planta, provocan oxidación de lípidos, proteínas, pigmentos y ácidos nucleicos. El resultado es una pérdida progresiva de la integridad celular y una disminución de la actividad metabólica.

Bulgari et al. (2019) destacan que uno de los mecanismos más consistentes asociados con estas formulaciones corresponde al fortalecimiento del sistema antioxidante. La activación de enzimas como superóxido dismutasa, catalasa y peroxidasa ayuda a controlar la acumulación de radicales libres y a disminuir el daño oxidativo. También pueden incrementarse metabolitos antioxidantes no enzimáticos, entre ellos compuestos fenólicos, carotenoides y determinadas moléculas reductoras.

La magnitud de esta protección depende de la capacidad de la planta para activar sus defensas antes de que el estrés produzca daños severos. Zhang y Schmidt (2000) demostraron que productos con actividad hormonal pueden modificar favorablemente el estado antioxidante, aunque la respuesta varió según el tratamiento y la especie. Por consiguiente, la actividad antioxidante debe evaluarse junto con indicadores de crecimiento, fotosíntesis y rendimiento, debido a que el incremento de una enzima aislada no permite concluir, por sí solo, que exista una mayor tolerancia agronómica.

Regulación molecular de la respuesta al estrés

Los estudios recientes indican que los efectos observados no se limitan a modificaciones morfológicas o fisiológicas, sino que también pueden involucrar cambios en la expresión de genes relacionados con la adaptación. Algunas investigaciones reportan la regulación de rutas vinculadas con la señalización hormonal, las proteínas antioxidantes, el metabolismo de aminoácidos y la protección de las membranas. La revisión titulada “Plant Biostimulants and Crop Stress Tolerance” (2021) destaca que estas respuestas moleculares contribuyen a explicar la capacidad de determinadas formulaciones para preparar a las plantas antes de la exposición a condiciones desfavorables.

Las herramientas transcriptómicas y metabolómicas han permitido estudiar de manera conjunta los cambios en la expresión génica y en la producción de metabolitos. Estos análisis muestran que la respuesta puede involucrar rutas relacionadas con el metabolismo del carbono, la síntesis de osmoprotectores y la regulación de sustancias hormonales.

Rouphael y Colla (2020) consideran que la integración de estas tecnologías facilitará la identificación de mecanismos específicos y contribuirá al desarrollo de productos con una composición mejor definida.

No obstante, la interpretación de los resultados moleculares requiere considerar su correspondencia con respuestas agronómicas verificables. La modificación de un conjunto de genes no garantiza necesariamente un incremento del rendimiento o de la calidad comercial. Por ello, las investigaciones futuras deben relacionar los datos moleculares con indicadores fisiológicos, productivos y ambientales obtenidos bajo condiciones de campo. Esta integración permitirá diferenciar las respuestas transitorias de los efectos que realmente mejoran el desempeño del cultivo.

En conjunto, la evidencia mostró que estos productos pueden fortalecer la capacidad adaptativa de las especies hortícolas mediante mecanismos fisiológicos, bioquímicos y moleculares interrelacionados. La modificación de la arquitectura radicular, el ajuste osmótico, la eficiencia nutricional y la actividad antioxidante contribuyen al mantenimiento del crecimiento bajo condiciones adversas. Sin embargo, Bulgari et al. (2019) advierten que la respuesta depende de la interacción entre la planta, el producto y el ambiente. En consecuencia, su utilización debe formar parte de estrategias integradas de manejo y no considerarse una solución aislada frente a los factores de estrés.

Tabla 4

Efectos de los bioestimulantes naturales frente a diferentes tipos de estrés abiótico

Tipo de estrés	Principales efectos fisiológicos	Categorías utilizadas con mayor frecuencia
Déficit hídrico	Desarrollo radicular, ajuste osmótico, regulación estomática y mayor eficiencia en el uso del agua	Extractos de algas, sustancias húmicas e hidrolizados de proteínas
Salinidad	Regulación del equilibrio iónico, acumulación de osmoprotectores y reducción del daño oxidativo	Extractos de algas, aminoácidos y microorganismos promotores del crecimiento
Temperaturas extremas	Protección antioxidante, conservación de membranas y estabilidad fotosintética	Extractos vegetales y de algas
Deficiencias nutricionales	Mayor disponibilidad, absorción y aprovechamiento de nutrientes	Sustancias húmicas y microorganismos benéficos
Estrés oxidativo	Activación de enzimas antioxidantes y protección de las estructuras celulares	Formulaciones microbianas, extractos vegetales y productos derivados de algas

Nota. La síntesis se elaboró a partir de Zhang y Schmidt (2000), Calvo et al. (2014), Bulgari et al. (2019) y Rouphael y Colla (2020). Los efectos descritos dependen de la especie, la formulación, la dosis, la etapa fenológica y la intensidad del estrés.

Impacto de los bioestimulantes naturales sobre el rendimiento y la calidad de los cultivos hortícolas

- Impacto de los bioestimulantes naturales sobre el rendimiento y la calidad de los cultivos hortícolas

Uno de los principales objetivos de la aplicación de bioestimulantes naturales en horticultura consiste en incrementar la productividad sin intensificar el uso de fertilizantes y otros insumos convencionales. Los resultados revisados muestran que determinadas formulaciones pueden favorecer no solo el crecimiento vegetativo, sino también la formación de órganos comerciales y la estabilidad del rendimiento. Rouphael y Colla (2020) relacionan estos beneficios con una mayor eficiencia fisiológica, mejor aprovechamiento del agua y los nutrientes y fortalecimiento de las respuestas frente al estrés. Sin embargo, la magnitud de los efectos depende de la especie, el ambiente, la composición del producto y las condiciones de aplicación.

Los incrementos productivos se expresaron mediante un mayor número de frutos, aumento del peso fresco y seco, mejor desarrollo de los órganos cosechables y una distribución más uniforme de la producción. Calvo et al. (2014) señalan que estas respuestas pueden originarse en la interacción entre la nutrición, el crecimiento radicular y la

regulación de diferentes procesos metabólicos. En especies de hoja, los beneficios se relacionaron principalmente con una mayor expansión foliar y acumulación de biomasa, mientras que en cultivos de fruto se observaron modificaciones en el número, tamaño y peso de las unidades cosechadas.

El desarrollo del sistema radicular desempeña un papel fundamental en la respuesta productiva, pues una mayor superficie de absorción permite aprovechar mejor los recursos disponibles. Rouphael y Colla (2020) explican que la estimulación de raíces y transportadores de nutrientes puede mejorar la eficiencia de la nutrición mineral y favorecer el crecimiento de los órganos comerciales. Esta relación resulta especialmente importante bajo condiciones de disponibilidad limitada de agua o nutrientes, donde la capacidad para explorar un mayor volumen de suelo puede disminuir la pérdida de rendimiento.

La mejora de la actividad fotosintética también contribuye a explicar los incrementos productivos observados. El mantenimiento de la concentración de clorofila y de la eficiencia fotoquímica favorece la producción de carbohidratos necesarios para la formación de hojas, flores y frutos. Bulgari et al. (2019) indican que la conservación del aparato fotosintético adquiere especial relevancia cuando las plantas se encuentran expuestas a factores ambientales adversos. Al reducir el deterioro fisiológico, las formulaciones naturales pueden contribuir a que una mayor proporción de los recursos se destine a la producción y no exclusivamente a los mecanismos de reparación celular.

Además del rendimiento, los estudios examinaron variables relacionadas con la calidad comercial de frutas y hortalizas. Entre los indicadores más frecuentes se encontraron el tamaño, la uniformidad, la firmeza, el color y el contenido de sólidos solubles. La respuesta varió según la especie y el producto utilizado, debido a que algunos tratamientos favorecieron principalmente el crecimiento, mientras que otros modificaron la composición de los tejidos. Rouphael y Colla (2020) destacan que la evaluación de estas soluciones debe considerar simultáneamente la cantidad y la calidad de la cosecha, ya que un aumento productivo no siempre se acompaña de una mejora proporcional de los atributos comerciales.

Los extractos de algas marinas mostraron potencial para modificar características vinculadas con el desarrollo y la composición de los productos cosechados. Khan et al. (2009) documentaron que sus compuestos bioactivos pueden influir sobre el metabolismo vegetal y la producción de metabolitos secundarios. Estos cambios podrían repercutir en el color, el contenido antioxidante y otras propiedades relacionadas con la calidad. No obstante, los efectos dependen de la materia prima, el procedimiento de extracción y la concentración aplicada, por lo que no pueden atribuirse de manera uniforme a todos los productos derivados de algas.

Las sustancias húmicas y los hidrolizados de proteínas también pueden mejorar el desempeño productivo mediante su influencia sobre el metabolismo del nitrógeno y la formación de biomasa. Ertani et al. (2013) observaron que una formulación derivada de alfalfa incrementó parámetros metabólicos y fisiológicos relacionados con el crecimiento. La presencia de péptidos y aminoácidos puede favorecer la actividad enzimática y la síntesis de compuestos necesarios para el desarrollo. Sin embargo, para determinar su efecto sobre la producción comercial deben considerarse variables como el índice de cosecha, el número de frutos y la distribución de la biomasa entre los órganos vegetativos y reproductivos.

La calidad nutricional representó otro componente relevante de los estudios analizados. Algunas investigaciones reportaron modificaciones en el contenido de vitamina C, carotenoides, compuestos fenólicos y flavonoides después de la aplicación de extractos vegetales o marinos. Bulgari et al. (2019) relacionan la acumulación de estos metabolitos con la activación de mecanismos antioxidantes y de defensa. Aunque el incremento de dichos compuestos puede elevar el valor funcional de los alimentos, la respuesta debe comprobarse mediante análisis químicos y no inferirse únicamente a partir del crecimiento o del aspecto externo de los productos.

La relación entre estas formulaciones y la calidad poscosecha requiere una interpretación cuidadosa. El fortalecimiento de las membranas, la conservación de la capacidad antioxidante y la acumulación de determinados metabolitos podrían retrasar algunos procesos de deterioro. Sin embargo, la vida útil también depende de la especie, el estado de madurez, las condiciones de cosecha, la temperatura y el almacenamiento. Por esta razón, los posibles efectos

poscosecha deben evaluarse mediante indicadores específicos, como pérdida de peso, firmeza, color, respiración y estabilidad de los compuestos nutricionales.

Desde la perspectiva ambiental, uno de los beneficios potenciales corresponde al mejoramiento de la eficiencia en el uso de los nutrientes. Calvo et al. (2014) señalan que las sustancias y microorganismos promotores del crecimiento pueden aumentar la disponibilidad y asimilación de elementos minerales. Esta función permitiría ajustar las dosis de fertilización y reducir las pérdidas por lixiviación cuando los productos se integran en programas nutricionales correctamente diseñados. No obstante, no deben presentarse como sustitutos automáticos de los fertilizantes, pues las necesidades minerales de cada cultivo deben determinarse mediante análisis del suelo, del agua y de los tejidos vegetales.

Los agentes microbianos contribuyen a la productividad mediante la modificación de las relaciones entre las raíces y el suelo. Las bacterias promotoras del crecimiento y los hongos micorrízicos pueden intervenir en la solubilización de fósforo, la fijación de nitrógeno y la absorción de agua y micronutrientes. Calvo et al. (2014) destacan que estas funciones favorecen la nutrición y el desarrollo vegetal, aunque la respuesta en campo depende de la capacidad de los microorganismos para colonizar las raíces y competir con las poblaciones nativas. En consecuencia, la eficacia de un inoculante no puede evaluarse únicamente a partir de los resultados obtenidos en condiciones controladas.

La revisión también evidenció una considerable variabilidad en los resultados agronómicos. Una misma formulación puede producir efectos diferentes cuando cambian el cultivar, la etapa fenológica, la dosis, la vía de aplicación o las condiciones ambientales. Du Jardin (2015) advierte que la diversidad de materias primas y mecanismos incluidos dentro de esta categoría dificulta la formulación de recomendaciones generales. Por ello, los ensayos futuros deben describir con precisión la composición de los productos y establecer tratamientos de control que permitan diferenciar su efecto de la fertilización y de otras prácticas de manejo.

La evaluación económica constituye otro aspecto necesario para determinar la viabilidad de estas tecnologías. Un incremento estadísticamente significativo del rendimiento no siempre representa un beneficio económico suficiente para compensar el costo del producto y de su aplicación. Rouphael y Colla (2020) sostienen que la transición desde la investigación experimental hacia el uso comercial requiere analizar la rentabilidad, la estabilidad de los resultados y la compatibilidad con los sistemas productivos. Por tanto, los estudios deberían incorporar indicadores como costo por hectárea, valor de la cosecha, ahorro potencial de fertilizantes y retorno de la inversión.

En conjunto, la evidencia mostró que los productos naturales con actividad bioestimulante pueden favorecer la productividad, la calidad comercial y determinados atributos nutricionales de los cultivos hortícolas. Los beneficios se relacionan con la mejora del crecimiento radicular, la nutrición, la fotosíntesis y la capacidad antioxidante. No obstante, Bulgari et al. (2019) destacan que la respuesta se encuentra condicionada por la interacción entre el cultivo, el producto y el ambiente. Su incorporación en la horticultura sostenible debe sustentarse, por consiguiente, en ensayos específicos, caracterización de las formulaciones y evaluaciones agronómicas y económicas de largo plazo.

Tabla 5

Principales beneficios de los bioestimulantes naturales sobre el rendimiento y la calidad de cultivos hortícolas

Variable evaluada	Efecto observado	Beneficio agronómico
Rendimiento	Incremento del número, tamaño o peso de los órganos cosechables	Mayor productividad comercial
Biomasa	Aumento de la materia fresca y seca de la parte aérea y radical	Mayor vigor y establecimiento del cultivo
Calidad comercial	Mejoras en tamaño, uniformidad, color o firmeza	Mayor aceptación y valor en el mercado
Calidad nutricional	Modificación del contenido de vitaminas, carotenoides, compuestos fenólicos y flavonoides	Mayor valor nutricional y funcional

Variable evaluada	Efecto observado	Beneficio agronómico
Calidad poscosecha	Conservación potencial de la firmeza, el color y la capacidad antioxidante	Posible prolongación de la vida útil
Eficiencia nutricional	Mayor disponibilidad, absorción y asimilación de nutrientes	Optimización de los programas de fertilización
Tolerancia al estrés	Conservación de la fotosíntesis y reducción del daño oxidativo	Mayor estabilidad del rendimiento bajo condiciones adversas
Rentabilidad	Incremento potencial del valor de la cosecha en relación con el costo del tratamiento	Mayor viabilidad económica cuando la respuesta es consistente
Sostenibilidad	Uso más eficiente del agua y los nutrientes	Reducción potencial del impacto ambiental

Nota. La síntesis se elaboró a partir de Khan et al. (2009), Ertani et al. (2013), Calvo et al. (2014), du Jardin (2015), Bulgari et al. (2019) y Rouphael y Colla (2020). Los beneficios descritos no se presentan de manera uniforme y dependen de la especie, la formulación, la dosis, el ambiente y las prácticas de manejo.

Tendencias emergentes y perspectivas de investigación

La evolución de la horticultura sostenible ha impulsado el desarrollo de formulaciones más especializadas y orientadas a necesidades agronómicas concretas. La investigación reciente no se limita a determinar si un producto incrementa el crecimiento o el rendimiento, sino que busca identificar los compuestos responsables de la respuesta y comprender las rutas fisiológicas y moleculares involucradas. Rouphael y Colla (2020) señalan que esta transición resulta necesaria para convertir los resultados experimentales en aplicaciones reproducibles. En consecuencia, las tendencias actuales se orientan hacia una caracterización más precisa de las materias primas, una mayor especificidad para cada cultivo y la validación de los efectos bajo condiciones comerciales.

Una de las áreas con mayor desarrollo corresponde al empleo de microorganismos benéficos. Las bacterias promotoras del crecimiento, los hongos micorrízicos arbusculares y otros agentes asociados con la rizosfera pueden mejorar la nutrición, estimular la arquitectura radicular y favorecer la adaptación frente al estrés. Calvo et al. (2014) explican que estos organismos intervienen mediante mecanismos como la fijación biológica de nitrógeno, la solubilización de fósforo, la producción de sideróforos y la regulación de determinadas rutas hormonales. El interés actual se dirige hacia la selección de cepas capaces de conservar su actividad en diferentes suelos y ambientes productivos.

El desarrollo de consorcios microbianos representa una extensión de esta tendencia. En lugar de utilizar una sola cepa, las nuevas formulaciones pueden integrar microorganismos con funciones complementarias, buscando mejorar simultáneamente la nutrición, el crecimiento y la respuesta frente a condiciones adversas. Sin embargo, la combinación de cepas no garantiza automáticamente una mayor eficacia, debido a que pueden existir relaciones de competencia o incompatibilidad entre ellas. Por esta razón, Calvo et al. (2014) subrayan la importancia de comprender las interacciones entre los microorganismos, las raíces y las comunidades nativas del suelo antes de recomendar su aplicación.

Otra línea emergente corresponde al aprovechamiento del microbioma vegetal. Las comunidades microbianas presentes en la rizosfera y en los tejidos de las plantas participan en la nutrición, la regulación del crecimiento y la defensa frente a factores adversos. En consecuencia, las investigaciones comienzan a considerar que la eficacia de un inoculante depende tanto de sus características como de su capacidad para integrarse en la comunidad microbiana existente. Rouphael y Colla (2020) sostienen que el estudio de estas interacciones puede contribuir al desarrollo de estrategias más adaptadas a las condiciones específicas de cada suelo y cultivo.

Las ciencias ómicas constituyen otra tendencia relevante para comprender los mecanismos de acción. La transcriptómica permite examinar cambios en la expresión génica, mientras que la proteómica y la metabolómica facilitan la identificación de proteínas y metabolitos relacionados con la respuesta de las plantas. Bulgari et al. (2019) señalan que estas herramientas pueden revelar modificaciones en las rutas antioxidantes, hormonales y nutricionales

que no resultan visibles mediante las evaluaciones agronómicas tradicionales. Su utilización permite relacionar los cambios moleculares con indicadores como la fotosíntesis, el desarrollo radicular y la tolerancia frente al estrés.

La integración de los datos obtenidos mediante estas tecnologías también puede facilitar la identificación de biomarcadores de respuesta. Estos indicadores permitirían reconocer tempranamente si una planta está respondiendo de manera favorable a una formulación determinada. Sin embargo, un cambio molecular aislado no demuestra necesariamente la existencia de un beneficio productivo. Rouphael y Colla (2020) destacan que los resultados de laboratorio deben relacionarse con variables agronómicas y económicas obtenidas en condiciones de campo, evitando formular recomendaciones basadas exclusivamente en modificaciones génicas o metabólicas.

La búsqueda de nuevas materias primas naturales también ocupa un lugar importante dentro de las perspectivas identificadas. Los extractos procedentes de plantas, algas, subproductos agrícolas y otras fuentes biológicas ofrecen una amplia diversidad de compuestos con posible actividad fisiológica. Priya et al. (2023) destaca el potencial de los recursos renovables para desarrollar nuevos productos agrícolas mediante procedimientos de extracción con menor impacto ambiental. No obstante, su aprovechamiento requiere identificar los componentes activos, establecer métodos de producción reproducibles y garantizar la estabilidad química y biológica de las formulaciones.

El uso de residuos agroindustriales como materia prima se relaciona directamente con los principios de la economía circular. Los subproductos generados durante la transformación de frutas, hortalizas y otros materiales vegetales pueden contener aminoácidos, compuestos fenólicos, polisacáridos y metabolitos secundarios aprovechables. Esta estrategia permite reducir la acumulación de residuos y generar productos de mayor valor agregado. Sin embargo, Priya et al. (2023) señala que el desarrollo de estas formulaciones requiere procesos de caracterización, extracción y validación que garanticen su inocuidad y uniformidad.

La estandarización representa uno de los principales desafíos de las nuevas fuentes naturales. La composición de un extracto puede variar según la especie, el tejido utilizado, el origen geográfico, la etapa de desarrollo y el procedimiento de obtención. Du Jardin (2015) advierte que esta variabilidad dificulta la clasificación y evaluación de los productos. Por ello, las investigaciones futuras deberán describir con precisión las materias primas y los procesos de producción, además de establecer marcadores químicos que permitan comprobar la uniformidad entre los lotes comerciales.

Otra perspectiva corresponde al desarrollo de formulaciones combinadas que integren extractos vegetales, sustancias húmicas, hidrolizados de proteínas y microorganismos benéficos. Estas combinaciones buscan producir efectos complementarios sobre la nutrición, el crecimiento y la tolerancia frente al estrés. Calvo et al. (2014) muestran que las distintas categorías actúan mediante mecanismos diversos, lo que sustenta el interés por evaluar posibles interacciones sinérgicas. No obstante, la combinación de componentes también puede generar respuestas antagónicas, por lo que cada producto debe validarse experimentalmente y no asumir que una mayor complejidad garantiza mejores resultados.

La encapsulación y los sistemas de liberación controlada constituyen posibilidades para mejorar la estabilidad de los compuestos bioactivos y proteger a los microorganismos durante el almacenamiento y la aplicación. Estas tecnologías podrían facilitar una liberación más gradual de los componentes y aumentar su permanencia en la raíz o en la superficie foliar. Sin embargo, la evidencia disponible dentro de las fuentes revisadas todavía resulta limitada, por lo que esta línea debe considerarse una perspectiva de investigación y no una aplicación ampliamente validada. También será necesario analizar sus costos y posibles efectos ambientales.

La agricultura de precisión ofrece posibilidades para ajustar la dosis y el momento de aplicación de acuerdo con el estado del cultivo. Los sensores de humedad, las imágenes multiespectrales y los sistemas de monitoreo pueden identificar diferencias en el crecimiento, la temperatura foliar o la condición hídrica. La integración de esta información permitiría aplicar los productos únicamente cuando exista una necesidad fisiológica claramente identificada. No obstante, las fuentes analizadas proporcionaron evidencia todavía insuficiente para determinar la eficacia de esta combinación tecnológica en condiciones comerciales.

De manera semejante, la inteligencia artificial y el aprendizaje automático representan posibles herramientas para analizar grandes volúmenes de datos procedentes de ensayos agronómicos, mediciones fisiológicas y estudios moleculares. Estos métodos podrían ayudar a identificar relaciones entre el tipo de producto, la dosis, el cultivo y el ambiente. Sin embargo, esta aplicación debe presentarse como una perspectiva futura, debido a que las investigaciones incluidas en la revisión no aportaron evidencia suficiente para afirmar que los modelos predictivos ya se encuentran consolidados en el manejo hortícola de estas formulaciones.

La regulación continúa siendo un aspecto determinante para el desarrollo del sector. Du Jardin (2015) contribuyó a establecer una definición funcional y una clasificación que permiten diferenciar estos productos de los fertilizantes y fitosanitarios. No obstante, persisten diferencias entre países respecto a los requisitos de composición, eficacia, etiquetado y registro. La armonización de los criterios regulatorios facilitaría la comparación entre formulaciones y ayudaría a garantizar que las declaraciones comerciales estén respaldadas por evidencia científica verificable.

La variabilidad de los resultados constituye otro desafío importante. Muchos estudios fueron realizados en condiciones controladas y durante periodos relativamente cortos, lo que limita su extrapolación a sistemas comerciales. Bulgari et al. (2019) señalan que la respuesta depende de la especie, la etapa fenológica, la severidad del estrés y las condiciones ambientales. Por esta razón, las futuras investigaciones deberán incluir ensayos en diferentes localidades, ciclos productivos y tipos de suelo, así como comparaciones entre cultivares y prácticas de manejo.

También resulta necesario fortalecer las evaluaciones económicas y ambientales. Rouphael y Colla (2020) destacan que la adopción productiva depende de que los beneficios obtenidos compensen el costo del tratamiento y se mantengan de manera consistente. Los estudios deberían analizar el retorno de la inversión, el posible ahorro de fertilizantes, la estabilidad del rendimiento y los efectos sobre la calidad. De manera complementaria, será necesario evaluar la huella ambiental de los procesos de extracción, formulación, transporte y aplicación.

Los estudios de largo plazo deberán examinar las consecuencias sobre el suelo y las comunidades microbianas. Aunque los productos de origen natural suelen asociarse con una menor afectación ambiental, esta condición no puede asumirse sin evidencia. Calvo et al. (2014) indican que las sustancias y microorganismos aplicados pueden modificar las interacciones entre las raíces, los nutrientes y la microbiota. Por tanto, será necesario determinar si estos cambios se mantienen durante ciclos sucesivos y si favorecen la calidad del suelo sin generar desequilibrios ecológicos.

En síntesis, las tendencias identificadas muestran una evolución hacia formulaciones más específicas, caracterizadas y adaptadas a las necesidades de cada cultivo. La microbiología agrícola, las ciencias ómicas, el aprovechamiento de residuos y los sistemas de aplicación de precisión ofrecen oportunidades para mejorar la eficacia y sostenibilidad de estas tecnologías. Sin embargo, du Jardin (2015) advierte que la diversidad del sector exige criterios claros de definición y evaluación. El progreso futuro dependerá de la integración entre caracterización científica, validación agronómica, regulación, rentabilidad y seguridad ambiental.

Tabla 6

Tendencias emergentes en la investigación sobre bioestimulantes naturales

Tendencia	Aplicación potencial en horticultura	Perspectiva de investigación
Productos microbianos	Empleo de bacterias, micorrizas y consorcios benéficos	Seleccionar cepas adaptadas a diferentes cultivos, suelos y ambientes
Manejo del microbioma	Modulación de las comunidades microbianas asociadas con las raíces	Comprender las interacciones entre inoculantes y microorganismos nativos
Ciencias ómicas	Aplicación de transcriptómica, proteómica y metabolómica	Identificar mecanismos de acción y biomarcadores de respuesta
Economía circular	Aprovechamiento de residuos agroindustriales y biomasa vegetal	Desarrollar materias primas sostenibles, seguras y estandarizadas

Tendencia	Aplicación potencial en horticultura	Perspectiva de investigación
Formulaciones combinadas	Integración de extractos, sustancias húmicas y microorganismos	Evaluar interacciones sinérgicas, aditivas o antagónicas
Liberación controlada	Protección y liberación gradual de compuestos o microorganismos	Determinar eficacia, costos y posibles efectos ambientales
Agricultura de precisión	Uso de sensores e imágenes para orientar las aplicaciones	Ajustar dosis, frecuencia y momento según el estado fisiológico
Inteligencia artificial	Análisis de datos agronómicos, fisiológicos y moleculares	Desarrollar y validar modelos predictivos bajo condiciones comerciales
Armonización regulatoria	Estandarización de criterios de eficacia, composición y etiquetado	Facilitar el registro y garantizar declaraciones comerciales verificables
Evaluación de largo plazo	Seguimiento del suelo, la microbiota, la productividad y la rentabilidad	Determinar la estabilidad agronómica, económica y ambiental

Nota. La síntesis se elaboró a partir de Calvo et al. (2014), du Jardin (2015), Bulgari et al. (2019), Roupheal y Colla (2020) y Priya et al. (2023). La agricultura de precisión, la inteligencia artificial y los sistemas de liberación controlada se presentan como perspectivas emergentes, debido a que su aplicación conjunta con bioestimulantes todavía requiere mayor validación científica y comercial.

4. DISCUSIÓN

La presente revisión sistemática permitió integrar la evidencia relacionada con el empleo de bioestimulantes naturales en cultivos hortícolas y examinar su contribución al crecimiento, la productividad, la calidad y la tolerancia frente al estrés abiótico. En términos generales, los estudios analizados mostraron resultados favorables; sin embargo, la intensidad y estabilidad de las respuestas variaron considerablemente entre investigaciones. Roupheal y Colla (2020) señalan que esta variabilidad depende de la interacción entre el producto, la especie, el cultivar, las condiciones ambientales y las prácticas de manejo. Por consiguiente, aunque estas formulaciones poseen un potencial agronómico relevante, sus beneficios no deben interpretarse como universales ni independientes del contexto productivo.

Uno de los principales hallazgos correspondió a la diversidad de mecanismos mediante los cuales estos insumos pueden influir sobre el funcionamiento de las plantas. A diferencia de los fertilizantes convencionales, su función principal no consiste en aportar cantidades elevadas de nutrientes, sino en estimular procesos naturales relacionados con la nutrición, el crecimiento y la respuesta frente a condiciones desfavorables. Esta interpretación coincide con la definición de du Jardin (2015), quien destaca la capacidad de estas sustancias y microorganismos para mejorar la eficiencia nutricional, la tolerancia al estrés y determinados atributos de calidad. La distinción resulta fundamental para evitar que cualquier producto orgánico o nutricional sea clasificado automáticamente dentro de esta categoría. La multiplicidad de respuestas fisiológicas también explica por qué los efectos no pueden atribuirse a un único mecanismo. El desarrollo radicular, la absorción de nutrientes, la actividad fotosintética, la regulación de rutas hormonales y la protección antioxidante actúan de manera interrelacionada. Calvo et al. (2014) sostienen que los productos agrícolas con actividad bioestimulante pueden intervenir simultáneamente sobre la planta, el suelo y la microbiota. En consecuencia, la evaluación de su eficacia requiere integrar variables morfológicas, fisiológicas, bioquímicas y productivas, evitando establecer conclusiones únicamente a partir de la altura o biomasa de las plantas. Los extractos de algas marinas presentaron uno de los respaldos científicos más amplios dentro de las fuentes revisadas. Khan et al. (2009) documentaron la presencia de polisacáridos, minerales, aminoácidos y otros compuestos bioactivos capaces de influir sobre el crecimiento y las respuestas defensivas. Por su parte, Bulgari et al. (2019) relacionaron estas formulaciones con la conservación de la actividad fotosintética y el fortalecimiento de los mecanismos antioxidantes bajo condiciones de estrés. No obstante, las diferencias entre especies de algas, métodos de extracción y concentraciones comerciales impiden considerar todos los productos marinos como equivalentes.

La interpretación de la actividad hormonal atribuida a los extractos de algas también requiere cautela. Algunos estudios relacionan sus efectos con rutas controladas por auxinas, citocininas, giberelinas o ácido abscísico; sin embargo, una respuesta fisiológica semejante a la producida por una hormona no confirma necesariamente su presencia en concentraciones biológicamente efectivas. Du Jardin (2015) señala que el efecto final puede derivarse de la interacción entre diferentes compuestos y de la estimulación de procesos propios de la planta. Por ello, las investigaciones futuras deberían combinar la caracterización química con análisis fisiológicos y moleculares que permitan identificar con mayor precisión los componentes responsables.

Las sustancias húmicas y los hidrolizados de proteínas constituyeron otra categoría relevante. Calvo et al. (2014) indican que los compuestos húmicos pueden estimular el desarrollo radicular y favorecer la disponibilidad y absorción de nutrientes. A su vez, Ertani et al. (2013) observaron que una formulación derivada de alfalfa modificó favorablemente la actividad metabólica, el contenido de pigmentos y la acumulación de biomasa. Estas respuestas respaldan su potencial agronómico, aunque la composición de los productos puede variar según la materia prima y el procedimiento de obtención.

Las diferencias observadas entre los estudios sobre sustancias húmicas e hidrolizados también pueden explicarse por las características del suelo y del sistema de producción. El pH, la textura, la materia orgánica, la disponibilidad de nutrientes y la actividad microbiana condicionan la respuesta de las raíces. Rouphael y Colla (2020) destacan que una formulación eficaz en un suelo con baja fertilidad podría producir una respuesta menor en condiciones donde los nutrientes ya se encuentran disponibles. En consecuencia, su aplicación debe vincularse con un diagnóstico agronómico y no efectuarse mediante recomendaciones generalizadas.

Los productos microbianos representaron una de las líneas con mayor potencial de desarrollo. Las bacterias promotoras del crecimiento y los hongos micorrízicos pueden favorecer la solubilización de fósforo, la fijación de nitrógeno, la producción de sideróforos y el desarrollo de las raíces. Calvo et al. (2014) explican que estas funciones mejoran las relaciones entre la planta y el suelo y pueden aumentar la eficiencia nutricional. A diferencia de los extractos o sustancias solubles, su eficacia depende de que los microorganismos permanezcan viables, colonicen las raíces y mantengan su actividad después de la aplicación.

La variabilidad del desempeño de los inoculantes microbianos constituye, por tanto, una limitación relevante. Las condiciones edáficas, la temperatura, la humedad, la compatibilidad con el cultivo y la competencia con las poblaciones nativas pueden reducir su establecimiento. Esto ayuda a explicar por qué algunos resultados obtenidos en laboratorio o invernadero no se reproducen con la misma intensidad en campo. La evidencia revisada por Calvo et al. (2014) sugiere que la selección de cepas debe considerar las características del ambiente donde serán utilizadas, en lugar de asumir que un mismo microorganismo será igualmente eficaz en diferentes regiones.

Otro hallazgo central fue la capacidad potencial de estas formulaciones para atenuar los efectos del estrés abiótico. La sequía, la salinidad y las temperaturas extremas alteran el equilibrio hídrico, la fotosíntesis y la estabilidad de las estructuras celulares. Bulgari et al. (2019) relacionan la mayor tolerancia con el desarrollo radicular, el ajuste osmótico y la activación de enzimas antioxidantes. Estos mecanismos pueden ayudar a conservar el crecimiento durante periodos desfavorables, aunque no eliminan el factor de estrés ni sustituyen las prácticas agronómicas destinadas a controlar sus causas.

La protección antioxidante apareció como un mecanismo transversal frente a diferentes condiciones adversas. Zhang y Schmidt (2000) demostraron que determinados productos con actividad hormonal pueden modificar el estado antioxidante de las plantas y reducir el deterioro fisiológico. En los cultivos hortícolas, la activación de enzimas como superóxido dismutasa, catalasa y peroxidasa podría contribuir a proteger las membranas y los pigmentos. Sin embargo, una mayor actividad enzimática no constituye por sí sola evidencia de tolerancia agronómica, por lo que debe relacionarse con el mantenimiento de la fotosíntesis, el crecimiento y el rendimiento.

Los mecanismos moleculares continúan siendo una de las áreas menos esclarecidas. Los estudios recientes muestran que estas soluciones pueden modificar rutas relacionadas con la señalización hormonal, el metabolismo del carbono, la síntesis de aminoácidos y la respuesta antioxidante. Bulgari et al. (2019) destacan la contribución de las herramientas

transcriptómicas y metabolómicas para comprender estas modificaciones. No obstante, todavía resulta difícil diferenciar cuáles cambios representan respuestas transitorias y cuáles se traducen en ventajas productivas consistentes.

La relación entre las respuestas moleculares y el desempeño agronómico debe constituir una prioridad para futuras investigaciones. Rouphael y Colla (2020) sostienen que la caracterización de los mecanismos adquiere utilidad práctica cuando permite explicar y predecir los resultados obtenidos en campo. En consecuencia, los análisis génicos o metabólicos deberían acompañarse de indicadores relacionados con crecimiento, rendimiento, calidad y eficiencia en el uso de los recursos. Esta integración ayudaría a seleccionar formulaciones con efectos verificables y a descartar aquellas sustentadas únicamente en respuestas moleculares aisladas.

En cuanto a la productividad, la revisión mostró que determinadas aplicaciones pueden aumentar la biomasa, el número de frutos y el peso de los órganos cosechables. Estos efectos se relacionan con el desarrollo radicular, la nutrición y el mantenimiento de la actividad fotosintética. Rouphael y Colla (2020) advierten, sin embargo, que el incremento del crecimiento vegetativo no garantiza necesariamente una mayor producción comercial. Para determinar la eficacia agronómica resulta necesario analizar la distribución de la biomasa, el índice de cosecha y la estabilidad del rendimiento en diferentes ciclos productivos.

Los resultados relacionados con la calidad también deben interpretarse considerando la especie y el atributo evaluado. Algunos estudios reportaron modificaciones en la firmeza, el color, los sólidos solubles y la concentración de compuestos antioxidantes. Khan et al. (2009) señalan que los extractos de algas pueden influir sobre la producción de metabolitos secundarios, lo que podría repercutir en determinados atributos nutricionales. No obstante, las mejoras en vitamina C, carotenoides o compuestos fenólicos deben comprobarse mediante análisis específicos y no inferirse únicamente a partir de un aumento del crecimiento.

La posible prolongación de la vida poscosecha representa un campo de interés, pero la evidencia disponible todavía requiere mayor consolidación. La conservación de las membranas y el fortalecimiento antioxidante podrían retrasar la senescencia y la pérdida de firmeza; sin embargo, el comportamiento después de la cosecha depende también de la madurez, la temperatura, la humedad y las condiciones de almacenamiento. Bulgari et al. (2019) relacionan la protección celular con una mayor estabilidad fisiológica, pero se necesitan estudios específicamente diseñados para evaluar pérdida de peso, respiración, color y deterioro durante el almacenamiento.

Uno de los problemas metodológicos más relevantes correspondió a la heterogeneidad de las formulaciones, dosis, frecuencias y vías de aplicación. Du Jardin (2015) advierte que la diversidad de materias primas y mecanismos dificulta la comparación entre productos incluidos bajo una misma denominación. En algunos estudios se utilizaron aplicaciones foliares, mientras que en otros los tratamientos se suministraron al suelo, mediante riego o en solución nutritiva. Estas diferencias limitan la comparación directa y dificultan la formulación de recomendaciones generales para los productores.

La falta de caracterización química constituye otra fuente de incertidumbre. La denominación comercial o la identificación general de una materia prima no permite conocer necesariamente la concentración de los componentes activos. Calvo et al. (2014) muestran que las respuestas pueden depender de sustancias y microorganismos con funciones diferentes. Por ello, los estudios deberían informar el origen de la materia prima, el procedimiento de obtención, la composición, la concentración y las condiciones de almacenamiento. Esta información resulta indispensable para reproducir los tratamientos y explicar las diferencias entre investigaciones.

La escasez de ensayos desarrollados bajo condiciones comerciales también limita la aplicabilidad de los hallazgos. Una parte importante de la evidencia procede de ambientes controlados, donde la temperatura, la humedad y la nutrición se mantienen relativamente estables. Rouphael y Colla (2020) señalan que la validación en campo es necesaria para determinar si los beneficios persisten cuando interactúan múltiples factores ambientales. Los futuros estudios deberían incluir diferentes localidades, ciclos productivos, cultivares y tipos de suelo.

La evaluación económica recibió menor atención que los indicadores fisiológicos y productivos. Sin embargo, la adopción por parte de los productores depende de que el valor adicional de la cosecha compense los costos de

adquisición y aplicación. Rouphael y Colla (2020) destacan que la viabilidad comercial debe analizarse junto con la eficacia biológica. En consecuencia, las investigaciones deberían incluir el costo por hectárea, el posible ahorro de fertilizantes, el incremento del valor comercial y el retorno de la inversión.

Desde una perspectiva ambiental, estos productos pueden contribuir a una utilización más eficiente del agua y los nutrientes. Calvo et al. (2014) señalan que la mejora de la absorción podría permitir ajustes en los programas de fertilización y reducir pérdidas hacia el ambiente. Sin embargo, su origen natural no garantiza automáticamente la sostenibilidad. La extracción de materias primas, el consumo energético, el transporte y la estabilidad de las formulaciones deben incorporarse en las evaluaciones para evitar que los beneficios agronómicos oculten impactos generados durante su producción.

El aprovechamiento de residuos agroindustriales representa una oportunidad para vincular el desarrollo de nuevas formulaciones con la economía circular. Priya et al. (2023) destaca el potencial de las fuentes vegetales renovables para obtener compuestos de interés agrícola. No obstante, la transformación de residuos requiere controles de composición, inocuidad y estabilidad que garanticen la ausencia de contaminantes. Asimismo, se deben evaluar los costos y los impactos asociados con los procesos de extracción y acondicionamiento.

Las tecnologías digitales, las ciencias ómicas y la inteligencia artificial ofrecen posibilidades para mejorar el diseño y evaluación de los tratamientos, pero su incorporación debe presentarse todavía como una perspectiva emergente. Los sensores podrían ayudar a identificar el estado hídrico o nutricional de los cultivos, mientras que los modelos predictivos permitirían analizar relaciones complejas entre producto, dosis, ambiente y respuesta. No obstante, las fuentes incluidas en esta revisión aportaron evidencia limitada sobre su aplicación conjunta, por lo que todavía no es posible establecer conclusiones firmes acerca de su eficacia comercial.

En conjunto, los resultados confirman que los bioestimulantes naturales pueden contribuir al crecimiento, la productividad, la calidad y la adaptación de los cultivos hortícolas. Sin embargo, su eficacia depende de factores biológicos, ambientales y metodológicos que impiden formular recomendaciones universales. Du Jardin (2015) aporta una base conceptual para su definición, mientras que Rouphael y Colla (2020) destacan la necesidad de vincular la experimentación con aplicaciones prácticas. La consolidación de estas soluciones requerirá caracterización de los productos, protocolos comparables, ensayos de campo, evaluaciones económicas y análisis de sostenibilidad.

Finalmente, el avance del campo dependerá de una investigación interdisciplinaria capaz de integrar agronomía, fisiología vegetal, microbiología, química, biología molecular y análisis económico. La estandarización metodológica no debe eliminar las particularidades de cada cultivo y ambiente, sino establecer un conjunto mínimo de información que facilite la comparación. A partir de esta perspectiva, el principal desafío no consiste únicamente en desarrollar nuevas formulaciones, sino en demostrar cuáles funcionan, bajo qué condiciones y con qué beneficios agronómicos, económicos y ambientales.

5. CONCLUSIÓN

La presente revisión sistemática permitió integrar el conocimiento disponible sobre el empleo de bioestimulantes naturales en cultivos hortícolas, considerando su clasificación, sus mecanismos de acción, las respuestas fisiológicas inducidas y sus posibles efectos sobre la productividad y la calidad. En conjunto, la evidencia analizada muestra que estas formulaciones poseen un potencial significativo para complementar las prácticas convencionales de manejo y contribuir al desarrollo de una horticultura más eficiente y sostenible. No obstante, los resultados también indican que su eficacia depende de la interacción entre el producto, la especie, el cultivar, las condiciones ambientales y el sistema productivo. Por ello, sus beneficios no deben generalizarse ni interpretarse como independientes del contexto en el que son aplicados.

Los hallazgos confirman que estos insumos no cumplen la misma función que los fertilizantes convencionales, puesto que su acción principal consiste en estimular procesos naturales de las plantas. Entre los mecanismos identificados se encuentran la modificación de la arquitectura radicular, el mejoramiento de la eficiencia nutricional, la conservación de la actividad fotosintética y la activación de los sistemas antioxidantes. La interacción entre estas respuestas puede favorecer un crecimiento más equilibrado y contribuir al mantenimiento de la actividad fisiológica durante periodos

ambientales desfavorables. Sin embargo, su utilización debe complementar la fertilización y las prácticas de manejo agronómico, sin considerarse un reemplazo automático de los insumos necesarios para satisfacer los requerimientos nutricionales de los cultivos.

Los extractos de algas marinas, las sustancias húmicas, los aminoácidos, los hidrolizados de proteínas, los extractos vegetales y los microorganismos benéficos constituyeron las categorías con mayor presencia en la literatura examinada. Esta diversidad comprende sustancias y agentes biológicos con mecanismos diferentes, pero potencialmente complementarios. Los productos derivados de algas se relacionaron principalmente con la regulación del crecimiento y la protección frente al estrés, mientras que los compuestos húmicos mostraron efectos sobre el sistema radicular y la eficiencia nutricional. Por su parte, las formulaciones microbianas destacaron por su capacidad para intervenir en las relaciones entre las raíces, los nutrientes y la microbiota del suelo.

La evidencia también mostró que determinadas aplicaciones pueden contribuir a atenuar los efectos de la sequía, la salinidad, las temperaturas extremas y las deficiencias nutricionales. Estas respuestas se relacionaron con el desarrollo radicular, el ajuste osmótico, la conservación de los pigmentos fotosintéticos y la activación de enzimas antioxidantes. La interacción de estos mecanismos ayuda a limitar el deterioro celular y a mantener una mayor estabilidad fisiológica bajo condiciones adversas. No obstante, estos productos no eliminan el factor de estrés ni reemplazan las prácticas destinadas a controlar sus causas, por lo que deben integrarse con el manejo del riego, la fertilización, el suelo y las condiciones microclimáticas.

Desde el punto de vista productivo, los estudios revisados reportaron posibles incrementos en la biomasa, el número de frutos, el peso de los órganos cosechables y la uniformidad de la producción. También se identificaron modificaciones favorables en atributos comerciales y nutricionales, como el color, la firmeza, los sólidos solubles, las vitaminas y los compuestos antioxidantes. Sin embargo, la intensidad de estos efectos varió entre especies, formulaciones y condiciones experimentales. En el caso de la calidad poscosecha, la información disponible todavía debe fortalecerse mediante estudios que evalúen específicamente la pérdida de peso, la firmeza, el color, la respiración y la vida útil durante el almacenamiento.

La heterogeneidad metodológica constituyó una de las principales limitaciones identificadas. Las investigaciones emplearon materias primas, composiciones, dosis, frecuencias y vías de aplicación diferentes, lo que dificultó la comparación directa de los resultados. A esta situación se suma que numerosos productos no se encuentran suficientemente caracterizados desde el punto de vista químico o microbiológico. En consecuencia, las respuestas obtenidas con una formulación no pueden extrapolarse automáticamente a otras, aunque pertenezcan a la misma categoría. El avance del campo requerirá protocolos que establezcan información mínima sobre la composición, el tratamiento, la especie, las condiciones experimentales y las variables evaluadas.

Otra limitación correspondió a la predominancia de ensayos desarrollados en laboratorio, cámaras de crecimiento e invernaderos. Aunque estos estudios resultan necesarios para comprender los mecanismos de acción, no reproducen completamente la variabilidad existente bajo condiciones comerciales. Por ello, las futuras investigaciones deberán incluir diferentes localidades, tipos de suelo, condiciones climáticas, cultivares y ciclos productivos. También será necesario incorporar análisis económicos que permitan determinar el costo de aplicación, el valor adicional de la cosecha, el posible ahorro de otros insumos y el retorno de la inversión.

Las nuevas líneas de investigación deberán profundizar en las interacciones entre las formulaciones, las plantas y el microbioma del suelo. El empleo de herramientas transcriptómicas, proteómicas y metabolómicas puede contribuir a identificar las rutas moleculares y los compuestos responsables de las respuestas observadas. Sin embargo, los cambios génicos o metabólicos deberán relacionarse con indicadores agronómicos verificables para demostrar su utilidad productiva. También resulta pertinente explorar residuos agroindustriales y biomasa vegetal como fuentes de nuevos compuestos, siempre que se garanticen su composición, inocuidad, estabilidad y reproducibilidad.

La agricultura de precisión y la inteligencia artificial representan perspectivas prometedoras para ajustar las dosis y los momentos de aplicación según el estado fisiológico de los cultivos. No obstante, la evidencia identificada todavía resulta insuficiente para afirmar que su integración con estas formulaciones se encuentra consolidada en condiciones

comerciales. Los sensores, las imágenes multispectrales y los modelos predictivos deberán validarse mediante ensayos comparativos. Por consiguiente, estas tecnologías deben presentarse como líneas futuras de desarrollo y no como beneficios actualmente comprobados en todos los sistemas hortícolas.

Finalmente, se concluye que los bioestimulantes naturales pueden desempeñar una función estratégica dentro de sistemas hortícolas orientados a mejorar la eficiencia, la resiliencia y la sostenibilidad. Su principal valor reside en la capacidad de estimular procesos fisiológicos que favorecen el aprovechamiento del agua y los nutrientes, el crecimiento y la respuesta frente a condiciones adversas. Sin embargo, su origen natural no garantiza automáticamente eficacia, inocuidad o sostenibilidad. La consolidación de estas soluciones dependerá de la caracterización de las formulaciones, la estandarización de los protocolos, la validación bajo condiciones comerciales y la evaluación conjunta de sus beneficios agronómicos, económicos y ambientales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bulgari, R., Franzoni, G., & Ferrante, A. (2019). Biostimulants application in horticultural crops under abiotic stress conditions. *Agronomy*, 9(6), Article 306. <https://doi.org/10.3390/agronomy9060306>
- Calvo, P., Nelson, L., & Kloepper, J. W. (2014). Agricultural uses of plant biostimulants. *Plant and Soil*, 383, 3–41. <https://doi.org/10.1007/s11104-014-2131-8>
- du Jardin, P. (2015). Plant biostimulants: Definition, concept, main categories and regulation. *Scientia Horticulturae*, 196, 3–14. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.021>
- Ertani, A., Schiavon, M., Muscolo, A., & Nardi, S. (2013). Alfalfa plant-derived biostimulant stimulate short-term growth of salt stressed *Zea mays* L. plants. *Plant and Soil*, 364, 145–158. <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1335-z>
- Franzoni, G., Cocetta, G., Prinsi, B., Ferrante, A., & Espen, L. (2022). Biostimulants on crops: Their impact under abiotic stress conditions. *Horticulturae*, 8(3), Article 189. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8030189>
- Khan, W., Rayirath, U. P., Subramanian, S., Jithesh, M. N., Rayorath, P., Hodges, D. M., Critchley, A. T., Craigie, J. S., Norrie, J., & Prithiviraj, B. (2009). Seaweed extracts as biostimulants of plant growth and development. *Journal of Plant Growth Regulation*, 28, 386–399. <https://doi.org/10.1007/s00344-009-9103-x>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., . . . Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, Article n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Priya, A. K., Alagumalai, A., Balaji, D., & Song, H. (2023). Bio-based agricultural products: A sustainable alternative to agrochemicals for promoting a circular economy. *RSC Sustainability*, 1, 746–762. <https://doi.org/10.1039/D3SU00075C>
- Rai, N., Rai, S. P., & Sarma, B. K. (2021). Prospects for abiotic stress tolerance in crops utilizing phyto- and bio-stimulants. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5, Article 754853. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.754853>
- Rouphael, Y., & Colla, G. (2020). Toward a sustainable agriculture through plant biostimulants: From experimental data to practical applications. *Agronomy*, 10(10), Article 1464. <https://doi.org/10.3390/agronomy10101464>
- Zhang, X., & Schmidt, R. E. (2000). Hormone-containing products' impact on antioxidant status of tall fescue and creeping bentgrass. *Crop Science*, 40(2), 490–494. <https://doi.org/10.2135/cropsci2000.402490x>

CONSIDERACIONES ÉTICAS

El presente estudio se llevó a cabo de conformidad con los principios éticos que rigen la investigación con participantes humanos. Antes de la recolección de los datos, el protocolo de investigación fue revisado y aprobado por el comité de

ética institucional correspondiente. Todos los participantes fueron informados de manera clara sobre los objetivos del estudio, los procedimientos, las posibles implicaciones y el carácter voluntario de su participación, otorgando posteriormente su consentimiento informado. Durante todo el proceso de investigación se garantizó la confidencialidad de la información, el anonimato de los participantes y el uso exclusivo de los datos recopilados con fines científicos y académicos.

DECLARACIÓN SOBRE EL USO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL (IA)

Los autores declaran que la herramienta de inteligencia artificial generativa ChatGPT fue utilizada exclusivamente para la traducción al idioma inglés y la revisión lingüística del manuscrito. Esta herramienta no contribuyó a la concepción del estudio, el diseño de la investigación, la recolección de datos, el análisis estadístico, la interpretación de los resultados ni a la elaboración de las conclusiones. Los autores asumen la plena responsabilidad por la originalidad, exactitud, integridad y validez científica del contenido presentado en este manuscrito.

FINANCIAMIENTO

La presente investigación no recibió subvenciones, becas ni apoyo financiero específico por parte de organismos públicos, entidades comerciales u organizaciones sin fines de lucro.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses de carácter financiero, personal, profesional o institucional que hayan podido influir en el desarrollo, los resultados o la publicación de esta investigación.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

Nombres de autores e iniciales:

Luis Humberto Benavides Velasco (LHBV)

Funciones desempeñadas por cada autor:

Conceptualización: (LHBV)

Curación de datos: (LHBV)

Análisis formal: (LHBV)

Adquisición de fondos: (LHBV)

Investigación: (LHBV)

Metodología: (LHBV)

Administración del proyecto: (LHBV)

Recursos: No aplica

Software: (LHBV)

Supervisión: (LHBV)

Validación: (LHBV)

Visualización: (LHBV)

Redacción – Borrador original: (LHBV)

Redacción – Revisión y edición: (LHBV)